PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Modèle de planification tactique adaptée aux PME œuvrant dans un contexte ETO
Auteur: Author:	Mathieu Lalagüe
Date:	2021
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Lalagüe, M. (2021). Modèle de planification tactique adaptée aux PME œuvrant dans un contexte ETO [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/5603/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/5603/
Directeurs de recherche: Advisors:	Robert Pellerin, Adnène Hajji, & Monia Rekik
Programme: Program:	Maîtrise recherche en génie industriel

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Modèle de planification tactique adaptée aux PME œuvrant dans un contexte ETO

MATHIEU LALAGÜE

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Février 2021

© Mathieu Lalagüe, 2021.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Modèle de planification tactique adaptée aux PME œuvrant dans un contexte ETO

présenté par **Mathieu LALAGÜE**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Martin TRÉPANIER, président
Robert PELLERIN, membre et directeur de recherche
Adnène HAJJI, membre et codirecteur de recherche
Monia REKIK, membre et codirectrice de recherche
Maha BEN ALI, membre

DÉDICACE

À ma famille,

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, Robert Pellerin, pour m'avoir guidé dans ce long projet et prodigué de précieux conseils. Je souhaite également remercier mon codirecteur et ma codirectrice de recherche, Adnène Hajji et Monia Rekik, qui ont su, grâce à leur bienveillance, m'aider tout au long de cette recherche.

Il me paraît important de remercier chaleureusement mes collègues de bureau Joffrey, Lucas et Marine sans qui les journées passées à Polytechnique n'auraient vraiment pas été les mêmes. Merci également à Jérémie, Quentin, Marc et Clément qui ont fait de cette expérience à Montréal quelque chose d'inoubliable.

Je veux également dire merci à notre partenaire industriel pour avoir eu l'opportunité de mener ce projet en leur collaboration. Je tiens tout particulièrement à remercier son Vice-Président Opérations, Recherche et Développement pour l'aide qu'il m'a apportée, sa gentillesse et son accueil toujours chaleureux.

J'aimerais évidemment remercier Kévin, Étienne et Melania qui ont égayé toutes ces journées de confinement. Que ce soit dans les moments heureux ou dans les instants plus difficiles, ils ont toujours été là pour moi. Un immense merci à Cedric pour avoir été à mes côtés à chaque instant et pour m'avoir toujours soutenu.

Enfin, je veux remercier ma famille pour m'avoir constamment encouragé même depuis l'autre côté de l'Atlantique. Un merci très particulier à mes parents qui ont toujours été là pour moi.

RÉSUMÉ

La demande de personnalisation des produits est une réalité toujours plus présente dans le milieu industriel. La place des projets réalisés selon la stratégie d'affaires d'ingénierie sur commande ou *Engineer-To-Order* (ETO), dont la spécificité est de réaliser tout ou partie de l'ingénierie du produit en fonction des demandes du client, est de plus en plus importante. De plus, la place toujours plus grande occupée par les technologies de l'industrie 4.0 permet de regrouper l'ensemble des ressources d'une entreprise au sein de systèmes de gestion intégrés (ERP). Ces ERP ont d'abord été développés pour être utilisés par des grandes entreprises. Cependant, une grande partie du tissu industriel, et notamment dans le domaine de l'ETO, est constitué de PME. Il faut donc adapter ces systèmes aux spécificités des PME et du contexte des projets ETO.

Dans les projets ETO, une des premières étapes à réaliser est de faire la planification tactique du projet en vue de renseigner les caractéristiques de l'offre qui va être faite au client lors de la phase d'appel d'offres. Des outils de planification tactique existent, mais ils sont peu utilisés par les planificateurs, car ils sont souvent trop complexes et ne prennent pas assez en compte le manque d'informations inhérent aux stades initiaux des projets ETO.

Quelques recherches en processus de planification tactique, en outils de calcul ou en modèles de données adaptés à ce domaine existent. Cependant, il n'existe pas de modèle regroupant ces trois éléments adaptés à ce contexte. Ce mémoire a pour objectif de développer un modèle intégré de planification tactique adaptée au contexte de projets ETO menés par des PME. Ce modèle est composé d'un processus de planification tactique, d'un modèle de données supportant les données de ce modèle et d'un outil de calcul qui permet la création d'échéanciers initiaux adaptés aux spécificités du contexte ETO et PME

Pour cela, la méthodologie *Design Research Methodology* (DRM) a été employée. En suivant cette méthodologie, nous avons d'abord confirmé la problématique soulevée grâce à la revue de littérature. Une analyse de l'existant a ensuite été réalisée chez un partenaire industriel qui développe un ERP possédant un outil de planification tactique. C'est à partir de cette analyse que nous avons pu construire notre modèle intégré. Enfin, une expérimentation du modèle proposé a été réalisée. Cela nous permet de montrer que le modèle intégré proposé permet de prendre en compte les incertitudes de manière plus intéressante que le simple ajout de moyens de robustesse à une solution optimale.

ABSTRACT

The demand for product customization is an increasingly present reality in industrial settings. The proportion of projects that use an Engineer-To-Order (ETO) approach, which perform all or part of the engineering of the product according to the customer's requests, is becoming more and more important. In addition, the ever-increasing presence of industry 4.0 technologies allows a company to consolidate all its resources within its enterprise resource planning (ERP) software. These ERP were first developed for use by large companies. However, a large part of the industrial fabric, particularly in the ETO field, is composed of SMEs. These systems must therefore be adapted to the particularities of SMEs and the context of ETO projects.

In ETO projects, one of the first steps to perform is the tactical planning of the project in order to inform the details of the offer that will be made to the customer during the bid phase. Tactical planning tools do exist, but they are rarely used by planners because they are often too complex and do not consider the lack of information inherent in the initial stages of ETO projects.

Some research exists into tactical planning processes, calculation tools or data models adapted to this field. However, there is no general approach that combines these three elements adapted to this context. Therefore, we propose developing an integrated tactical planning model adapted to the context of ETO projects conducted by SMEs. This model includes a tactical planning process, a data model supporting data of this model and a calculation tool for the creation of initial schedules adapted to the particularities of the ETO and SME context.

To achieve this, the Design Research Methodology (DRM) was used. Following this methodology, we first confirmed the issue raised through a literature review. An analysis of the existing situation was then performed at an industrial partner who is developing an ERP with a tactical planning tool. Bases on this analysis, we were then able to build our integrated model. Finally, a trial of the proposed model was performed. This allows us to show that the proposed integrated model allows to consider uncertainties in a more interesting way than simply adding robustness means to an optimal solution.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VII

LISTE DES TABLEAUX X

LISTE DES FIGURES XI

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XII

LISTE DES ANNEXES XIII

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE 4

2.1 Introduction 4

2.2 Caractéristiques du contexte ETO 4

2.2.1 Définitions de l'ETO 4

2.2.2 Problèmes associés aux processus ETO 6

2.3 Les processus de planification hiérarchique 7

2.4 Outils de calculs pour la planification tactique de projets 12

2.4.1 Heuristiques constructives simples 13

2.4.2 Heuristiques basées sur la programmation linéaire 13

2.4.3 Métaheuristiques 14

2.4.4 Méthodes exactes 15

2.5 Modèles de données soutenant les processus de planification tactique 17

2.6 Revue critique de la littérature 18

2.7 Conclusion....20
CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE....21
3.1 Introduction....21
3.2 Objectifs de recherche....21
3.3 Méthodologie de recherche....21
3.3.1 L'analyse de l'existant....23
3.3.2 Construction du modèle général....24
3.3.3 Expérimentation....24
3.4 Conclusion....25
CHAPITRE 4 ANALYSE DE L'EXISTANT....26
4.1 Introduction....26
4.2 Cartographie du processus de planification tactique....26
4.2.1 Outils d'élaboration du processus....26
4.2.2 Acquisition des informations nécessaires à la cartographie....27
4.2.3 Processus de planification tactique....27
4.2.4 Avantages et limites du processus de planification tactique existant....37
4.3 Modèle de données....37
4.4 Conclusion....39
CHAPITRE 5 CONSTRUCTION DU MODÈLE INTÉGRÉ....40
5.1 Introduction....40
5.2 Adaptation du processus de planification tactique existant....40
5.3 Adaptation du modèle de données existant....45
5.4 Outil de calcul....47
5.4.1 Résolution d'un problème RCCP....47

5.4.2 Description formelle du problème 48
5.4.3 Modélisation mathématique du problème 48
5.5 Conclusion 53
CHAPITRE 6 EXPÉRIMENTATION 54
6.1 Introduction 54
6.2 Validation du processus de planification et du modèle de données 54
6.3 Expérimentation 57
6.3.1 Génération des instances de projet test 58
6.3.2 Analyse du temps de calcul 59
6.3.3 Analyse de sensibilité 60
6.3.4 Comparaison avec le modèle de Cherkaoui (2017) 67
6.4 Conclusion 68
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 70
RÉFÉRENCES 73
ANNEXES 77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Matrice de classification des échéanciers adaptée de (AACE International, 2020; Cherkaoui, 2017) 9

Tableau 2.2 Description des différentes phases du FEL 11

Tableau 2.3 Littérature sur le problème de planification tactique (adapté de Cherkaoui, 2017) ... 16

Tableau 5.1 Description des paramètres 49

Tableau 5.2 Description des variables 49

Tableau 6.1 Indicateurs de similarités adaptés au contexte de notre processus 55

Tableau 6.2 Résultat du pourcentage de similarité 56

Tableau 6.3 Temps de calcul (en secondes) 60

Tableau 6.4 Résultats de l'analyse de sensibilité du *Buffer* 62

Tableau 6.5 Différence entre i_1 et i_2 en fonction de la durée du *Buffer* 63

Tableau 6.6 Résultats de l'analyse de sensibilité du *Rope* 64

Tableau 6.7 Résultats de l'analyse de sensibilité sur la date minimale de début 66

Tableau 6.8 Résultats de l'étude comparative entre le modèle DBR et le modèle optimal 68

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Structure de planification hiérarchique proposée par De Boer (1998) 7

Figure 3.1 Méthode DRM et application au projet de recherche 22

Figure 4.1 Symboles de cartographie des processus sous le formalisme EPC 27

Figure 4.2 Définition des caractéristiques principales du projet 30

Figure 4.3 Définition des items liés au projet 31

Figure 4.4 Création des lots de travail et définition des caractéristiques des employés liés à ces lots de travail 32

Figure 4.5 Définition des ressources et les liens de précédence 33

Figure 4.6 Planification sans ressource critique et définition des caractéristiques du *Drum* 34

Figure 4.7 Planification du lot de travail associé à la ressource critique ainsi que des autres lots de travail (dans la situation où un *Drum* est identifié) 35

Figure 4.8 Définition des caractéristiques de l'offre 36

Figure 4.9 Modèle de données existant 38

Figure 5.1 Zone du processus de planification tactique existant qui est à modifier (partie 1) 41

Figure 5.2 Zone du processus de planification tactique existant qui est à modifier (partie 2) 42

Figure 5.3 Zone du processus de planification tactique adaptée pour tenir compte de la contrainte associée aux pièces critiques 43

Figure 5.4 Zone du processus de planification tactique adaptée à l'outil de calcul 44

Figure 5.5 Modèle de données adapté au modèle intégré de planification tactique 46

Figure A.1 Processus d'affaires de planification tactique existant 77

Figure A.2 Processus d'affaires de planification tactique existant (suite et fin) 78

Figure B.1 Processus d'affaires de planification tactique modifié 79

Figure B.2 Processus d'affaires de planification tactique modifié (suite et fin) 80

Figure C.1 Codage de l'outil de calcul 81

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AACE	Association for the Advancement of Cost Engineering
ASAP	As Soon As Possible
ATO	Assemble-To-Order
ATW	Allowed Time Window
BPMN	Business Process Model and Notation
DBR	Drum Buffer Rope
DRM	Design Research Methodology
DTO	Design-To-Order
EPC	Modélisation de processus d'affaires par Chaines de Processus Événementielles
ERP	Enterprise resource planning
ETO	Engineer-To-Order
FEL	Front-End Loading
ICPA	Incremental Capacity Planning Algorithm
IPA	Independent Project Analysis
LAP	Largest Activity Part
MTO	Make-To-Order
PME	Petites et Moyennes Entreprises
PMIS	Project Management Information System
RCCP	Rough-Cut Capacity Planning
RCPSP	Resource-Constrained Project Scheduling Problem
TI	Technologies de l'Information
TOC	Théorie Des Contraintes
WBS	Work Breakdown Structure

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Processus d'affaires de planification tactique existant 77

Annexe B Processus d'affaires de planification tactique modifié.....79

Annexe C Codage de l'outil de calcul.....81

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La situation économique actuelle entraîne une forte pression sur les entreprises canadiennes, et en particulier sur les Petites et Moyennes Entreprises (PME), à améliorer leur productivité et mieux répondre aux exigences de coûts, de qualité et de délais. Les défis auxquels les PME doivent faire face sont nombreux. Avec une numérisation de plus en plus avancée au sein des usines, une présence toujours plus importante de l'Internet des objets, des systèmes cyber physiques ainsi que de l'infonuagique, on assiste à un nouveau changement fondamental de paradigme dans la production industrielle : l'industrie 4.0. D'après Lasi et al. (2014), l'Industrie 4.0 engendre des changements majeurs : périodes de développement des produits plus courtes, fortes demandes d'individualisation des produits, plus grande flexibilité, décentralisation ou encore utilisation plus efficace des ressources. L'enjeu est donc de réussir ce virage puis de tirer avantage de cette nouvelle ère manufacturière.

En particulier, la demande toujours plus grande de personnalisation conduit plusieurs PME à adopter une stratégie d'affaires d'ingénierie sur commande, appelée aussi ETO (*Engineer-To-Order*). D'après Pandit & Zhu (2007), ETO est un type de processus opérationnel menant à la production de biens hautement personnalisés qui doivent être conçus et fabriqués en détail selon les spécifications de la commande passée par les clients. Les difficultés principales liées à ce type de mode de gestion et de production sont liées à la complexité d'assurer la synergie entre les différentes parties prenantes ainsi que de gérer le degré d'incertitude très élevé. En effet, dans ce type de processus, l'absence d'ingénierie complète, de nomenclature ou encore de gammes dans les stages initiaux du projet soulève des difficultés et des incertitudes notamment pour la planification.

Pour faire face à ces particularités, la production dans un contexte ETO est planifiée en recourant à une approche hiérarchique : des échéanciers très agrégés sont développés en début de projet avant d'être détaillés par la suite (De Leon, 2011). La phase où l'échéancier est le plus agrégé est la phase tactique. Dans un contexte ETO, cette phase est aussi nommée phase de planification initiale. Pour établir des engagements de budget et de dates jalons avec le client au moment de cette phase tactique, les entreprises font généralement appel à un planificateur qui va, grâce à son expérience, positionner les grandes étapes du projet en utilisant des méthodes classiques de planification (Pinedo, 2005). Mais cette méthode à ses limites et certaines entreprises utilisent un système

d'information de type ERP (*Enterprise Resource Planning*) pour effectuer cette phase de planification initiale (Metaxiotis et al., 2003). Mais l'utilisation des ERP pour cette phase de planification, correspondant ici à la phase d'appel d'offre et d'acceptation du projet (soit la phase au cours de laquelle l'entreprise propose un projet avec une durée et un coût estimé à un client), pose certains problèmes. Alfieri et al. (2011) soulignent notamment le manque de données inhérent à ces projets ETO (ingénierie incomplète, absence de nomenclature et de gamme détaillée) qui rend difficile le développement d'échéanciers agrégés suffisamment précis pour y déterminer des dates de jalons robustes et des budgets suffisamment précis.

De plus, il est important de souligner qu'une grande partie des acteurs travaillant dans des contextes ETO sont des PME. Pour ces PME, qui possèdent des ressources humaines et financières plus limitées que les grandes entreprises (Poba-Nzaou & Raymond, 2011), il est impératif de formuler des offres qui répondent aux besoins de leurs clients tout en respectant les capacités en ressources. Malheureusement, les systèmes de gestion intégrée dédiés aux PME fournissent rarement des outils permettant la planification initiale de projets ou de commandes potentielles. Reconnaissant ce besoin grandissant au sein des PME manufacturières canadiennes, ce projet de recherche s'inscrit dans un programme de recherche plus global visant le développement de nouvelles pratiques et d'outils de gestion performants adaptés au contexte des PME et de l'industrie 4.0 pour un éditeur logiciel ERP du Québec. **L'objectif principal** de ce mémoire est ainsi de **développer un modèle intégré de planification, comprenant à la fois un processus d'affaires, un modèle de données et un outil de calcul permettant la planification initiale de nouvelles commandes par une PME œuvrant en contexte ETO**. Ce modèle intégré doit être développé en favorisant son implantation avec la solution actuelle de l'éditeur ERP.

Pour y arriver, nous commencerons par une revue de littérature des modèles de processus de planification, des outils de calculs et des modèles de données adaptés au contexte ETO. Cette revue sera présente dans le chapitre 2 et sera suivie d'une analyse des limites des modèles existants ce qui permettra d'identifier les opportunités de recherche. Le chapitre 3 permettra ensuite de décrire les objectifs spécifiques de recherche, la méthodologie utilisée ainsi que la démarche scientifique qui sera suivie. Dans le chapitre 4, le modèle et le processus existants du système ERP du partenaire seront décrits. Ce processus et ce modèle seront adaptés dans le chapitre 5 afin de s'arrimer à un outil de calcul permettant de répondre aux contraintes liées à la planification de la production manufacturière en mode ETO. Le chapitre 6 permet d'expérimenter l'approche proposée. Ce

mémoire se termine avec l'identification des contributions et des limitations de cette recherche et la proposition de pistes de recherche futures.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter une revue de la littérature scientifique traitant des processus de planification, des modèles de données et des outils de calcul utilisés en planification initiale ou tactique. En premier lieu, nous présenterons les caractéristiques du contexte ETO. Ensuite, les différents processus de planification hiérarchiques sont décrits. En effet, ces processus permettent de décrire et de comprendre les différentes logiques de planification existantes. Par la suite, les méthodes de calcul utilisées en planification tactique seront abordées. Étant donné l'importance des données prises en compte lors des phases de planification initiale et de la nécessité d'intégrer éventuellement nos propositions à un système ERP existant, une revue des modèles de données disponibles pour soutenir ces processus est présentée par la suite. Enfin, le chapitre se termine avec une analyse critique de tous ces modèles dans le contexte bien précis de cette recherche, le but étant de préciser les besoins et opportunités de recherche.

2.2 Caractéristiques du contexte ETO

2.2.1 Définitions de l'ETO

Différentes manières de classer les différents types d'industrie manufacturière sont proposées par Porter et al. (1999). Ils proposent cinq classes de processus de fabrication: *make-to-stock*, *assemble-to-order* (ATO), *make-to-order* (MTO), *engineer-to-order* (ETO) et *design-to-order* (DTO). Dans ce cas, l'ETO est défini comme un processus de fabrication de produits standards offerts avec la possibilité de modifications et de personnalisations. Le DTO est défini comme un processus permettant la fabrication de nouveaux produits avec la conception, l'ingénierie et la fabrication redéfinis entièrement en fonction de chaque nouvelle commande d'un client. Cependant, cette distinction n'est pas adoptée uniformément dans toute la littérature et il n'existe pas de consensus général sur la définition de l'ETO. Nous allons donc chercher à préciser les définitions existantes de l'ETO.

Dans leur revue de la littérature, Gosling & Naim (2009) donnent un aperçu des principales variations des définitions. Il est communément admis que la production d'un produit ETO est liée

à une commande réelle d'un client, le point de découplage se situant au stade de la conception. Certains chercheurs (Bertrand & Muntslag ,1993; Konijnendijk, 1994) soulignent que l'ETO signifie le développement d'un produit entièrement nouveau pour une commande spécifique d'un client, tandis que d'autres (Caron & Fiore, 1995) affirment que l'ETO signifie l'adaptation de produits déjà existants aux spécifications du client.

Hicks et al. (2000) considèrent qu'un processus de fabrication ETO est un processus pouvant être découpé en trois grandes étapes : le marketing stratégique, l'appel d'offres et l'exécution du contrat. La conception et la gestion de projet sont considérées comme des compétences essentielles dans la plupart des entreprises ETO, tandis que le processus de fabrication proprement dit peut inclure des fonctions de fabrication, d'assemblage en usine, d'essais, de construction, d'installation et de mise en service sur les sites des clients. Les participants typiques sont les ingénieurs, les concepteurs, les estimateurs, les fournisseurs, les fabricants, les entrepreneurs, les architectes, les propriétaires et leurs systèmes d'information, qui doivent tous partager des informations sur le produit ETO. Ces informations évoluent à mesure que la conception ou la fabrication du produit progresse dans le cycle de vie de l'ingénierie, de la conception détaillée, de l'approvisionnement, de la fabrication, des essais, de la livraison, de l'installation, de l'utilisation, et de la maintenance, après l'attribution du contrat.

Amaro et al. (1999) font la distinction entre les « secteurs manufacturiers polyvalents » qui sont impliqués dans une situation d'appel d'offres pour chaque commande et les « habitués », qui peuvent recevoir une série de commandes similaires de la part de clients particuliers. En outre, Amaro et al. (1999) proposent quatre types d'ETO dans leur classification des entreprises manufacturières polyvalentes. Les quatre types d'ETO ont en commun le fait qu'ils permettent un haut degré de personnalisation (un nouveau design est produit pour chaque commande). Les quatre différents types d’ETO se différencient par les responsabilités gérées en interne, telles que la conception et les achats, ainsi que par le nombre et le type d'activités qui sont réalisées après la réception d'une commande. Hicks et al. (2000) définissent également quatre types de sociétés d'ETO. Les quatre types d’ETO ont comme point commun la réalisation d’un nouveau design à chaque commande, mais diffèrent sur les compétences de base, les sources d'avantages concurrentiels, le degré d'intégration verticale, les relations avec les fournisseurs, l'environnement et les types de risques.

Un autre facteur élément important est que la mise en œuvre d'une stratégie ETO implique à la fois une étape non physique (comprenant des activités d'appel d'offres, d'ingénierie, de conception et de planification des processus), avec différentes configurations possibles (c'est-à-dire l'ingénierie d'un nouveau produit ou des modifications techniques à un produit existant) (Amaro et al., 1999; Wikner & Rudberg, 2005; Gosling & Naim, 2009), et une étape physique (englobant la fabrication, l'assemblage et l'installation des composants), comme le suggèrent Bertrand & Muntslag (1993). Ces deux étapes doivent être prises en compte pour fabriquer chaque produit. En effet, la stratégie ETO implique un niveau élevé d'incertitude en termes de spécification des produits, de composition de la demande, de délais d'approvisionnement et de livraison et de durée des processus de production (Wikner & Rudberg, 2005).

2.2.2 Problèmes associés aux processus ETO

Certains des problèmes les plus courants associés aux processus ETO sont les difficultés d'estimation des délais et des dates de livraison, la réalisation tardive d'erreurs nécessitant des retouches coûteuses, la mauvaise qualité du produit et le gaspillage de matériaux résultant de la procédure d'appel d'offres, ainsi que les conflits entre les calendriers de projet et de fabrication. La plupart de ces difficultés ont pour cause principale l'inefficacité ou le manque d'échange d'informations (Pandit & Zhu, 2007).

Elfving (2003) souligne que, dans le cas des produits ETO, la principale incertitude réside dans le contenu des spécifications du client, où un léger écart par rapport aux produits standards peut nécessiter un investissement important dans le développement ou la conception du produit. L'ingénierie du produit est la plus complexe et détermine en grande partie le coût, le délai d'exécution et la qualité du produit.

Nous venons ainsi de montrer que la phase de planification tactique était essentielle dans un projet ETO. En effet, afin de répondre à un appel d’offres ou à une demande émanant d’un client, une entreprise doit estimer des dates de livraison possibles et un coût. Les incertitudes liées au manque d’information sont très importantes dans cette phase. Il s’agit maintenant de déterminer les caractéristiques de cette phase de planification initiale. C’est l’objet de la prochaine section.

2.3 Les processus de planification hiérarchique

Dans la section 2.2, nous avons vu que la phase de planification initiale était cruciale en milieu ETO. Nous allons chercher à savoir comment se définit cette phase de planification initiale et si ce découpage peut se rapprocher de la façon de faire dans d'autres contextes que l'ETO. Par exemple, les projets d'ingénierie sont souvent planifiés de façon hiérarchique. Les échéanciers sont ainsi élaborés de façon progressive tout au long du cycle de vie du projet (Cherkaoui, 2017). Cette décomposition en plusieurs niveaux d'agrégation permet de réduire la complexité du problème de planification et de le diviser en sous-problèmes plus facilement gérables. Il existe plusieurs manières de définir des classes d'échéancier et donc plusieurs manières de définir les différentes phases d'un projet. Les modèles présentés permettent tous de distinguer la phase dans laquelle une ingénierie partielle et imprécise permet d'estimer une durée de projet et un coût.

De Boer (1998) a proposé une structure hiérarchique pour des organisations qui fonctionnent par projet. Les quatre niveaux de planification qu'il distingue sont : stratégique, tactique, tactique/opérationnel et opérationnel. De nombreuses recherches ont ensuite utilisé ce découpage. Par exemple, Hans (2001) reprend cette structure pour établir une approche de modélisation qui offre un cadre générique pour modéliser divers problèmes de chargement des ressources.

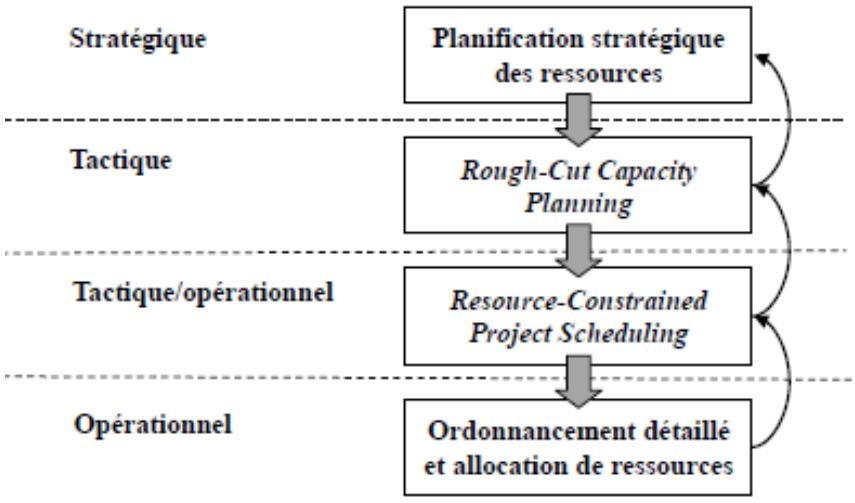

Figure 2.1 Structure de planification hiérarchique proposée par De Boer (1998)

Dans le niveau stratégique, on adresse des décisions comme la détermination de la capacité de l'entreprise en ressources. La planification au niveau stratégique relève de la haute direction et non pas du gestionnaire de projet. L'horizon de planification est situé à plusieurs années.

À partir du niveau tactique, la planification relève du gestionnaire de projet. Le niveau tactique correspond au problème RCCP (*Rough-Cut Capacity Planning*). C'est ce niveau qui est associé à la phase d'acceptation du projet, c'est-à-dire le moment de l'appel d'offres et/ou de la proposition du projet au client. L'enjeu de ce niveau tactique est donc de proposer au client un budget et des dates jalons. De Boer (1998) suggère un horizon de planification pour cette phase de l'ordre de six mois ou plus. Ce niveau tactique est proche de la planification initiale caractéristique du contexte ETO par le fait qu'il se conclue par la réponse à l'appel d'offres et/ou l'envoi d'une proposition du projet formelle au client.

Le niveau tactique/opérationnel correspond quant à lui à la planification de l'exécution des lots de travail (regroupement de plusieurs activités). Ce niveau est associé au problème RCPSP (*Resource-Constrained Project Scheduling Problem*). Ce problème se base sur les informations plus détaillées fournies par l'ingénierie sur les charges de travail et sur les ressources. Durant cette phase, les charges de travail et les ressources sont estimées grossièrement afin de s'adapter au degré de définition du projet.

Le niveau opérationnel est associé à l'ordonnancement des activités. Au terme de l'ordonnancement, les dates de début et des dates de fin pour toutes les activités sont établies. L'horizon de planification pour ce niveau opérationnel se situe de quelques semaines à quelques mois.

De Boer (1998) décrit également des phases ultérieures du cycle de vie du projet : l'ordonnancement détaillé et évaluation et service. L'ordonnancement détaillé se déroule durant la phase d'exécution et permet d'assigner les personnes et les machines/matériaux à chaque activité.

D'après l'AACE International (2010), on peut, dans le cadre d'une planification hiérarchique, définir cinq classes d'échéanciers distinctes. Pour définir ces classes, l'AACE se base sur le degré de définition du projet ce qui correspond généralement au degré d'avancement de l'ingénierie.

Tableau 2.1 Matrice de classification des échéanciers adaptée de (AACE International, 2020; Cherkaoui, 2017)

Classe d'échéancier	Degré de maturité du projet	Utilisation finale	Méthode de planification
Classe 5	0% à 2%	Sélection de concept	Jugement, analogie, planification descendante
Classe 4	1% à 15%	Étude de faisabilité	Planification descendante
Classe 3	10% à 40%	Autorisation ou contrôle de budget	Planification descendante avec des coûts unitaires semi-détaillés
Classe 2	30% à 75%	Contrôle ou soumission/appel d'offres	Planification ascendante
Classe 1	65% à 100%	Vérification d'estimation ou soumission/appel d'offres	Planification ascendante

L'échéancier de classe cinq correspond au plus faible degré de définition du projet : les objectifs de la planification sont ici stratégiques. On peut y retrouver les étapes du projet sans relations de précédence et cet échéancier fait ressortir les jalons majeurs du projet.

L'échéancier de classe quatre est plus détaillé que celui de classe cinq, car les jalons de haut-niveau de chaque phase en se basant sur un WBS (*Work Breakdown Structure*) préliminaire. Cet échéancier a pour but de mieux comprendre comment les principales étapes du projet s'enchaînent et/ou se superposent.

L'échéancier de classe trois prend en compte les contraintes de ressource et de précédence. Le niveau de détail se situe au niveau du lot de travail (ensemble de plusieurs activités). L'objectif de cet échéancier est d'appuyer des demandes de financement. C'est cet échéancier qui sert de

référence tant que la phase d'exécution du projet n'a pas été lancée. C'est cet échéancier qui se rapproche le plus de la planification initiale de l'ETO. En effet, on peut considérer que l'objectif de demande de financement se rapproche de l'appel d'offres en contexte ETO.

Le prochain échéancier, celui de classe deux, est développé durant la phase d'exécution du projet. Il devient alors l'échéancier de référence pour le contrôle des dates et des ressources. Dans cet échéancier, les contraintes de ressources et de précédence sont prises en compte. De plus, chaque lot de travail doit être suffisamment détaillé.

Enfin, l'échéancier de classe un permet une définition complète du projet. Il peut être considéré comme un calendrier de production et il définit le travail qui doit être effectué lors de chaque période de temps.

Il est à noter que l'AACE International (2010) précise que dans chaque classe d'échéancier, différents niveaux d'agrégation peuvent être présents afin de s'adapter à l'audience visée.

Les différents stades d'une planification hiérarchique peuvent également être définis selon les objectifs à atteindre dans chaque niveau. *Independent Project Analysis* (IPA) définit le terme de *Front-End Loading* (FEL) pour nommer un processus dont les différents niveaux de définition permettent de répondre à des objectifs d'affaires spécifiques. Van der Weijde (2008) résume les objectifs d'un FEL : répondre aux questions pourquoi, quoi, quand, comment, où et qui à chaque niveau d'un projet. À la fin de chacun des différents niveaux de définition, la décision de continuer ou non la poursuite du projet est prise. Ces niveaux de définition ou phases peuvent être au nombre de trois (Cooper & Kleinschmidt, 1995; Crawford & Di Benedetto, 2006) ou quatre (Clark & Wheelwright, 1992; Koen et al., 2001).

La phase FEL-0 correspond à l'analyse de la viabilité du projet et à la validation des opportunités d'affaires. Durant l'étape FEL-1, on évalue et sélectionne plusieurs alternatives de technologie, de processus et/ou de commercialisation. La phase FEL-2 permet de sélectionner une seule alternative. Enfin, au cours de l'étape FEL-3 on détaille l'alternative sélectionnée. Les détails et objectifs d'affaires sont détaillés dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Description des différentes phases du FEL

	Données disponibles	Sorties	Objectifs
FEL-0 Identification des opportunités	Plan d'affaires de l'entreprise	- Estimation initiale des montants de l'investissement à réaliser - Calcul des indicateurs principaux de viabilité économique	Décider de participer ou non à l'appel d'offres
FEL-1 Ingénierie conceptuelle	Indicateurs principaux de viabilité économique de FEL-0	- Spécifications liées au concept du projet - Estimations de coûts (précision de l'ordre de +/- 15 %) - WBS préliminaire et jalons majeurs	Évaluation et sélection des alternatives
FEL-2 Ingénierie préliminaire	Choix de la solution technique (FEL-1)	- Ingénierie préliminaire - Estimation des coûts (précision de l'ordre de +/- 5%) - Lots de travails avec contraintes de précédence et de ressources	Fournir une ingénierie grossière et une planification agrégée en vue de l'appel d'offres
FEL-3 Ingénierie détaillée	Ingénierie du FEL-2	- Ingénierie détaillée - Échéancier de référence	Ingénierie détaillée pour permettre la production

Ici, c'est bien la phase FEL-2 qui se rapporte à la phase de planification initiale de l'ETO. En effet, le but est bien d'estimer des coûts et des durées afin de participer à un appel d'offres.

Dans cette section 2.3, nous avons montré les façons de découper la planification d'un projet de manière hiérarchique. Ce découpage permet, normalement de gérer la grande complexité des projets menés. Cependant, nous pouvons également nous servir de ce découpage pour gérer les nombreuses incertitudes présentes avant l'appel d'offres en contexte ETO. Ces modèles permettent une estimation des durées et des coûts sans avoir à réaliser toute l'ingénierie qui est très complexe.

Mais, cela peut permettre également d'estimer durée et coût sans pouvoir réaliser toute l'ingénierie : c'est le cas dans les projets ETO.

Dans les différents modèles présentés, nous avons pu faire ressortir des caractéristiques propres à la phase de planification initiale en contexte ETO du fait de sa similarité avec les phases de planification tactique décrites dans ces modèles. Nous avons également vu que le problème de planification associé à cette phase était un problème RCCP. Ce problème et les méthodes pour le résoudre sont présentés dans la prochaine section.

2.4 Outils de calculs pour la planification tactique de projets

La planification initiale nécessite de résoudre des problèmes RCCP afin de déterminer des dates de début et de fin pour les lots de travail et d'estimer l'utilisation des ressources de manière agrégée. Tout cela a pour but de déterminer des dates jalons, une durée de projet ainsi qu'une estimation du coût du projet. Nous allons présenter les caractéristiques du problème RCCP puis nous allons réaliser une revue de littérature des différents outils de calcul existant pour résoudre ce problème RCCP. Cette revue inclut des modèles destinés au problème *Resource Loading*, car il représente l'équivalent du problème RCCP dans un environnement ETO ou *Manufacturing-To-Order* (MTO) (Hans, 2001).

De Boer (1998) distingue deux niveaux de planification. Le premier niveau est connu sous le nom de *Rough-Cut Capacity Planning* (RCCP). Le second niveau traite du problème de planification des projets à ressources limitées ou *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP). Le RCCP traite des problèmes de planification des capacités à moyen terme. À ce niveau, les projets sont divisés en lots de travail relativement importants, qui sont planifiés dans le temps en tenant compte de la disponibilité limitée des ressources. Le RCPSP traite de la planification opérationnelle à court terme. Dans ce cas, les lots de travail sont divisés en activités plus petites qui sont planifiées dans le temps. L'objectif habituel est de réduire au minimum la durée du projet, limitée par la disponibilité de ressources limitées. Nous allons maintenant voir les différentes méthodes existantes permettant de résoudre le problème RCCP.

2.4.1 Heuristiques constructives simples

Dans cette catégorie, on retrouve des algorithmes approximatifs qui construisent une solution réalisable. La solution peut être construite en une seule passe ou alors être améliorée grâce à plusieurs passes.

De Boer (1998) propose une heuristique à passe unique intitulée ICPA (*Incremental Capacity Planning Algorithm*). Les lots de travail sont d'abord triés selon un critère puis l'algorithme procède en deux phases. Premièrement, l'algorithme cherche à planifier chaque lot dans sa fenêtre de temps éligible sans recourir aux ressources supplémentaires. Dans un second temps, les lots non planifiés sont planifiés en utilisant les capacités non régulières.

Gademann & Schutten (2005) font remarquer que la littérature scientifique parle peu de la phase d'acceptation de la commande alors que cette phase est essentielle, car elle détermine quelle entreprise décroche le contrat. Il faut donc pouvoir déterminer au mieux un prix et une date de livraison et pour cela bien connaître la capacité disponible et la capacité nécessaire est essentiel. Dans leur modèle, les auteurs transforment la problématique de la planification de la capacité en contexte multi projets à un problème de planification de la capacité « simple projet ». Cela doit permettre de considérer un nouveau projet dans une planification comportant des projets déjà existants. De plus, ils se concentrent sur un RCCP guidé par le temps. Ils proposent deux heuristiques constructives basiques générant une solution en une seule passe. Cette solution ne considère pas les restrictions liées à la disponibilité des ressources.

Wullink (2005) définit une autre heuristique constructive à passe unique. Cette heuristique intitulée LAP (*Largest Activity Part*) se décompose en quatre phases. Dans la première phase, les activités dont la durée minimale est égale à la fenêtre de temps sont planifiées. Puis, dans un deuxième temps, les activités sont planifiées en utilisant seulement la capacité régulière. Dans la phase trois, on utilise la capacité non régulière pour terminer de planifier les activités partiellement planifiées dans la phase deux. Enfin dans la phase quatre, le reste des activités sont planifiées en utilisant la capacité non régulière.

2.4.2 Heuristiques basées sur la programmation linéaire

Gademann & Schutten (2005) distinguent trois classes pour ce type d'heuristiques. Dans la première classe, on retrouve des heuristiques qui se basent sur une solution faisable issue d'une

heuristique constructive. La programmation linéaire permet alors de trouver la répartition optimale des charges de travail. Dans la classe deux, on retrouve des heuristiques qui permettent de planifier la capacité en choisissant un ensemble aléatoire de fenêtres ATW (*Allowed To Work*). Une vérification est ensuite effectuée pour savoir si les liens de précédence sont bien respectés. Si ce n'est pas le cas, un des liens problématiques est choisi et est réparé. On recommence ensuite le processus jusqu'à l'obtention d'une solution réalisable. Pour la classe trois, une initialisation est réalisée en choisissant un ensemble de fenêtres ATW réalisable et on résout le problème de planification de la capacité. Des critères d'optimisation sont ensuite utilisés pour savoir si on peut s'arrêter ou s'il faut recommencer le processus.

L'heuristique LAP de Wullink (2005) lui sert de base pour plusieurs heuristiques de classe un. De Boer (1998) propose lui une heuristique de classe deux dans laquelle une première étape consiste à résoudre le programme linéaire sans tenir compte des relations de précédence. Dans un second temps, les fenêtres de temps des lots de travail sont modifiées de façon itérative jusqu'à ce que toutes les relations de précédence soient respectées. Enfin, une heuristique appartenant à la classe trois peut être retrouvée dans les modèles proposés par Gademann & Schutten (2005). Elle débute par la définition d'une solution initiale grâce à une heuristique constructive. Dans cette solution initiale, les fenêtres de temps assurent le respect des relations de précédence. Ensuite, de manière itérative, l'heuristique quel changement de fenêtre de temps permet d'améliorer les coûts marginaux. Ces itérations s'arrêtent quand aucun changement ne permet une amélioration de la solution.

2.4.3 Métaheuristiques

Dans cette classe d'heuristique, on note la métaheuristique du recuit simulé de Masmoudi (2011) qui vise à résoudre le problème RCCP avec incertitude. Masmoudi (2011) introduit ainsi un indicateur de robustesse pour mesurer l'éventualité qu'un plan excède la limite de capacité. Une heuristique constructive simple est d'abord utilisée afin de construire une solution initiale faisable. L'auteur se base sur la formulation de Hans (2001). La solution proposée est ensuite perturbée en modifiant soit le plan de projet ou le calendrier du projet. On regarde si la fonction-objectif est améliorée. Si ce n'est pas le cas, on répète l'opération jusqu'à ce qu'on atteigne un critère d'arrêt. Cette méthode est assez gourmande en temps de calcul mais permet de trouver de bons résultats.

2.4.4 Méthodes exactes

Hans (2001) propose une méthode exacte pour résoudre le problème RCCP. Dans ce modèle, un ensemble de projets faisables est généré. La méthode exacte utilisée est du type *Branch & Price* et permet de ne générer que les plans de projets qui conduisent à une amélioration de la solution. C'est cela qui rend la méthode performante.

Kis (2005) propose une autre méthode de résolution exacte. Elle diffère de la méthode de Hans (2001) du fait d'une modélisation des contraintes de précédence qui est différente. C'est la méthode *Branch & Cut*, basée sur la génération de coupes à partir d'une étude polyédrique des relations de précédence, qui est utilisée dans cette méthode. La performance de cette méthode est comparable à celle de Hans (2001) mais évite de générer autant de variables. Haït & Baydoun (2012) développent également une méthode exacte, mais cette méthode permet le chevauchement des lots de travail. Cela conduit à une méthode plus lente, mais qui répond mieux aux objectifs de minimisation de coût et de délai grâce à une meilleure utilisation des ressources.

Enfin, Cherkaoui (2017) développe une méthode exacte, mais permettant cette fois de définir des durées de périodes variables afin de mieux prendre en compte les différents niveaux d'agrégation tout au long d'un projet.

Tel que l'illustre le tableau 2.3, Cherkaoui (2017) propose une synthèse des principaux modèles de planification tactique de projets.

Tableau 2.3 Littérature sur le problème de planification tactique (adapté de Cherkaoui, 2017)

Auteurs	Contexte	Type de modèle	Fonction-objectif	Méthode de résolution
Speranza & Vercellis (1993)	Multi-projets	Déterministe	Max. valeur actuelle nette	Exacte
De Boer (1998)	Multi-projets	Déterministe	Min. coût ressources non régulières	Heuristique
Hans (2001)	Multi-projets	Déterministe	Min. coût ressources non régulières	Exacte + Heuristique
Neumann et al. (2003)	Multi-projets	Déterministe	Niveler les ressources Max. valeur actuelle nette	Exacte + Heuristique
Wullink et al. (2004)	ETO	Proactif (stochastique)	Min. espérance du coût ressources non régulières	Exacte + Heuristique
Gademann & Schutten (2005)	Multi-projets	Déterministe	Min. coût ressources non régulières	Heuristique
Kis (2005)	Projets	Déterministe	Min. coût ressources externes	Exacte
Kis (2006)	Projets	Déterministe	Min. coût violation contraintes ressources	Exacte
Masmoudi (2011)	Multi-projets	Proactif (fuzzy/théorie des possibilités)	Min. espérance du coût ressources non régulières Max indicateurs de robustesse flous	Métaheuristique
Alfieri et al. (2011)	ETO	Déterministe	Min. durée de projet	Exacte
Alfieri et al. (2012)	ETO	Proactif (stochastique)	Min. espérance du *makespan*	Exacte
Haït & Baydoun (2012)	Projets	Déterministe	Min. coût ressources non régulières	Exacte
Naber & Kolisch (2014)	Projets	Déterministe	Min. durée de projet	Exacte
Baydoun et al. (2016)	Multi-projets	Déterministe	Min. combinaison de coût ressources non-régulières et durée de projet	Exacte
Carvalho et al. (2016)	ETO	Proactif (optimisation robuste)	Min. coût de production	Exacte

2.5 Modèles de données soutenant les processus de planification tactique

La définition d'un modèle de données est essentielle afin de produire un modèle intégré de planification. La modélisation et la résolution du problème RCCP, comme tout le processus de planification initiale, requièrent en fait de nombreuses données. Cette section vise spécifiquement ces éléments. Malheureusement, il n'existe pas dans la littérature de modèle de données développé spécifiquement pour supporter des données de planification initiale de projets ETO. Cependant, il existe des modèles de données qui ont été développés afin de supporter des données de planification de projets en général, notamment pour le secteur de la construction. C'est le cas des modèles présentés ci-après.

Parmi ceux-ci, Chen et al. (2013) proposent un modèle permettant de développer un échéancier optimal dans le cadre de grands projets de construction en prenant en compte les objectifs et les contraintes du projet. Ce modèle inclut le un modèle de données nommé DDS qui permet à la fois de stocker les données issues de l'ingénierie du projet, mais également les données de planification de projet. En effet, on peut retrouver dans ce modèle à la fois les données liées à la nomenclature et à la gamme, aux caractéristiques de la planification de projet (lots de travail, niveau estimé d'utilisation des ressources) mais également à l'ordonnancement (informations sur les activités). Ce modèle prend la forme d'un modèle relationnel de données. D'ailleurs, l'auteur explique que ce modèle de données peut être utilisé pour toutes les phases de planification (de la planification tactique à l'ordonnancement).

Un autre exemple de modèle de données supportant des données de planification tactique est développé par Hajjar & AbouRizk (2002). Dans ce modèle, l'objectif est de faciliter la simulation de planification de projets dans la construction. Un modèle de données permettant de soutenir ces données de simulation y est décrit. Il s'agit là aussi d'un modèle relationnel de données mais contrairement à Chen et al. (2013), seules les données de planification de projet sont prises en compte. Les groupes de données identifiés par les auteurs sont les données liées aux lots de travail, aux ressources, aux centres de coût, aux caractéristiques de la planification (dates de début et de fin des lots de travail), à l'utilisation des ressources et aux coûts.

Azimi et al. (2011) propose également un outil de planification de projet associé à un modèle de données permettant à la fois la planification tactique, mais également l'acquisition de données au fur et à mesure de la progression du projet afin de pouvoir mettre en place des actions correctives. Le modèle de données est présenté sous forme de diagramme entité-relation et contient les données issues de l'ingénierie, de la planification du projet mais également de la phase d'exécution. Ainsi, on retrouve à la fois les données de la nomenclature, celles liées aux lots de travail et aux ressources mais également les données liées aux caractéristiques des différentes activités. Des données liées à la prévision de performances, à la création de rapports visuels sur l'état actuel et prévu des projets et à la proposition d'actions correctives sont également présentes dans ce modèle. Ce sont ces données qui permettent la mesure de la progression du projet et la mise en place d'actions correctives.

Enfin, Dobrev et al. (2008) proposent une ontologie pour supporter les concepts de processus de planification tactique dans le domaine de la production métallurgique. Le modèle se compose de classes, composées de trois catégories de ressources (personnel, équipement et matériel), de segments de processus comme regroupement logique des ressources et de quatre modèles principaux (définition du produit, capacité de production, calendrier de production et performance de production). Contrairement aux modèles cités précédemment, la forme de ce modèle de données (une ontologie) permet une description plus générale du domaine d'étude.

Ainsi, même s'il n'existe pas dans la littérature de modèle de données spécialement adapté au contexte de la planification initiale en contexte ETO, on note l'existence de modèle de planification dans le milieu de la construction intégrant un modèle de données adapté.

2.6 Revue critique de la littérature

Dans cette revue de littérature, nous avons vu que le contexte ETO était caractérisé par plusieurs projets se déroulant en parallèle et sollicitant souvent les mêmes ressources au même moment. Un des objectifs est de minimiser le travail en cours afin d'éviter que la charge de travail reposant sur une ressource ne soit trop importante (Strandhagen et al., 2018). Cet objectif est particulièrement vrai pour une PME et il est vital de coordonner la réalisation des différents projets menés par l'entreprise. Or, les modèles présentés dans cette revue ne mentionnent jamais cette coordination qui est essentielle dans un contexte ETO.

La revue de littérature des différentes approches de planification hiérarchique a permis de mieux définir la phase tactique en mode ETO qui consiste à planifier des lots de travail en tenant compte des limitations de ressource afin d'obtenir une durée et un coût estimé de projet. Ce niveau de planification est associé en termes de modèle à un problème RCCP. Deux types d'outils de calculs ont été identifiés pour résoudre ce problème: des modèles déterministes et des modèles proactifs. Les modèles déterministes supposent des données d'entrées connues avec exactitude. Or, la prise en compte des incertitudes est essentielle dans un contexte de planification tactique de projets ETO. En effet, dans cette phase initiale de planification, les incertitudes dues au manque d'informations sont assez importantes. Ces incertitudes peuvent aller d'événements opérationnels inattendus (par exemple, des pannes de machine ou l'indisponibilité d'un opérateur) à des incertitudes qui sont généralement résultent du manque d'information au stade du projet concerné (Wullink, 2005). C'est ce deuxième type d'incertitudes qui est prépondérant dans la planification tactique des projets ETO. Elmaghraby (2002) affirme d'ailleurs que les méthodes de gestion de la capacité des ressources qui peuvent traiter ces incertitudes ont un impact décisif sur la performance globale d'une organisation axée sur les projets. Les incertitudes qui peuvent être prises en compte dans les modèles RCCP sont, par exemple, le contenu du travail d'une activité, l'occurrence de l'activité, la disponibilité des ressources ou les dates de libération et d'échéance. En général, les modèles déterministes pour le problème RCCP ont été développés en partant de l'hypothèse que les incertitudes sont traitées en utilisant un niveau d'agrégation approprié et en réservant une capacité de ressources supplémentaires. Peu d'approches de planification prennent explicitement en compte l'incertitude au stade du RCCP. Parmi les méthodes de résolution citées dans cette revue de littérature, seules celles de Wullink et al. (2004), Masmoudi (2011) et Alfieri et al. (2012) permettent de prendre en compte les incertitudes liées à la charge de travail de manière explicite. Cherkaoui (2017) propose, pour sa part, un modèle qui permet de prendre en compte les incertitudes liées à l'agrégation. En pratique, il existe deux manières de prendre en compte les incertitudes dans cette phase de planification tactique. Premièrement, il est possible d'ajouter des ressources supplémentaires afin d'éviter un dépassement des dates de fin des lots de travail. Cependant, cette façon de faire n'est pas adaptée au contexte de production ETO et encore moins à la réalité des PME. La deuxième manière de prendre en compte ces incertitudes est d'ajouter une zone tampon (*buffer*) dans l'échéancier pour anticiper les éventuels retards au niveau de certains lots de travail. C'est cette méthode qui est employée dans plusieurs des modèles proactifs présents dans cette revue de

littérature. Cependant, ces modèles ne précisent pas comment ce tampon doit être positionné dans l'échéancier. C'est un paramètre qu'il est important de définir dans un contexte ETO, car il est important que l'ajout d'un tampon permette la prise en compte des incertitudes sans allonger de manière trop conséquente la durée totale estimée du projet. En effet, la planification tactique vise à définir les caractéristiques du projet en vue d'un appel d'offres. Une durée estimée de projet qui serait trop importante diminuerait les chances de succès dans l'appel d'offres. À l'opposé, un échéancier trop agressif serait peu robuste.

Une autre problématique du contexte ETO et la prise en compte des longs délais de livraison associé à certains matériels ou pièces. Ces délais retardent inévitablement le démarrage de certains lots de travail (Strandhagen et al., 2018). Les modèles de planification RCCP ne permettent pas de contraindre le démarrage de ces lots de travail après les dates de livraison anticipées.

De plus, toutes les pistes de solution existantes dans la littérature pour traiter, notamment, la question des incertitudes dans la phase de planification tactique (modèles de résolution proactifs, différentes phases de planification adaptées au niveau de détail du projet) et les modèles de données ont été développées de manière indépendante. Il n'existe pas de modèle ETO intégré tel que requis par un éditeur ERP.

2.7 Conclusion

L'analyse critique de la littérature a permis de mettre en évidence des limites des modèles existants dans le contexte de planification tactique de projets ETO. Ainsi, les modèles existants ne tiennent pas compte de l'aspect multi-projet du contexte ETO ni de l'importance de la contrainte associée aux pièces à long délai de livraison ni de l'importance du positionnement du tampon dans les modèles de résolution proactifs. De plus, les solutions proposées ont été développées de manière indépendante et cela crée des enjeux de cohérence des données. Ces limitations nous ouvrent de multiples opportunités de recherche. Le prochain chapitre précise d'ailleurs les objectifs spécifiques de recherche retenus et la méthodologie pour y parvenir.

CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction

Ce chapitre vise à préciser les objectifs spécifiques de recherche ainsi que la méthodologie de recherche employée. L'objectif de recherche principal découle des critiques émises dans la revue de la littérature.

3.2 Objectifs de recherche

La revue critique de la littérature nous a permis de constater qu'il n'existait pas de modèle intégré comprenant les activités à réaliser, les données de calcul et la méthode de calcul nécessaires à la planification de nouveaux projets dans un contexte ETO. **Le développement d'un tel modèle constitue notre objectif général de recherche**.

Ces trois éléments constitutifs du modèle intégré doivent non seulement être cohérents entre eux, mais doivent aussi s'adapter au système de gestion de notre partenaire industriel. Ce projet, qui comprend à la fois des composantes conceptuelles et appliquées, nécessite la réalisation des trois objectifs spécifiques suivants :

> **Objectif spécifique n° 1 :** *Développer un processus de planification capable de supporter une planification tactique d'une PME dans un contexte ETO et allant de la création d'un nouveau projet à la détermination des caractéristiques de l'offre faite au client.*
>
> **Objectif spécifique n°2 :** *Définir un modèle de données capable de supporter ce processus et qui peut s'intégrer au modèle de données du système ERP du partenaire.*
>
> **Objectif spécifique n°3 :** *Développer un outil de calcul proactif prenant en compte explicitement les incertitudes liées au contexte ETO.*

3.3 Méthodologie de recherche

On cherche à développer une solution à la fois applicable à un projet ETO mené par une PME et s'intégrant à la plate-forme ERP du partenaire industriel. Nos objectifs de recherche nécessitent ainsi l'étude et la prise en compte des pratiques de gestion inhérentes à la solution ERP de notre

partenaire industrielle, qui débordent évidemment de la seule fonction de planification initiale. Nous avons ainsi opté pour une méthodologie de recherche ancrée sur la pratique, connue sous le nom de *Design Research Methodology* (DRM. La méthodologie DRM, illustrée à la figure 3.1, est particulièrement adaptée à la réalisation de projets de recherche en entreprise qui nécessitent l'amélioration ou la transformation de processus ou de pratiques existantes (Lemieux, 2013) :

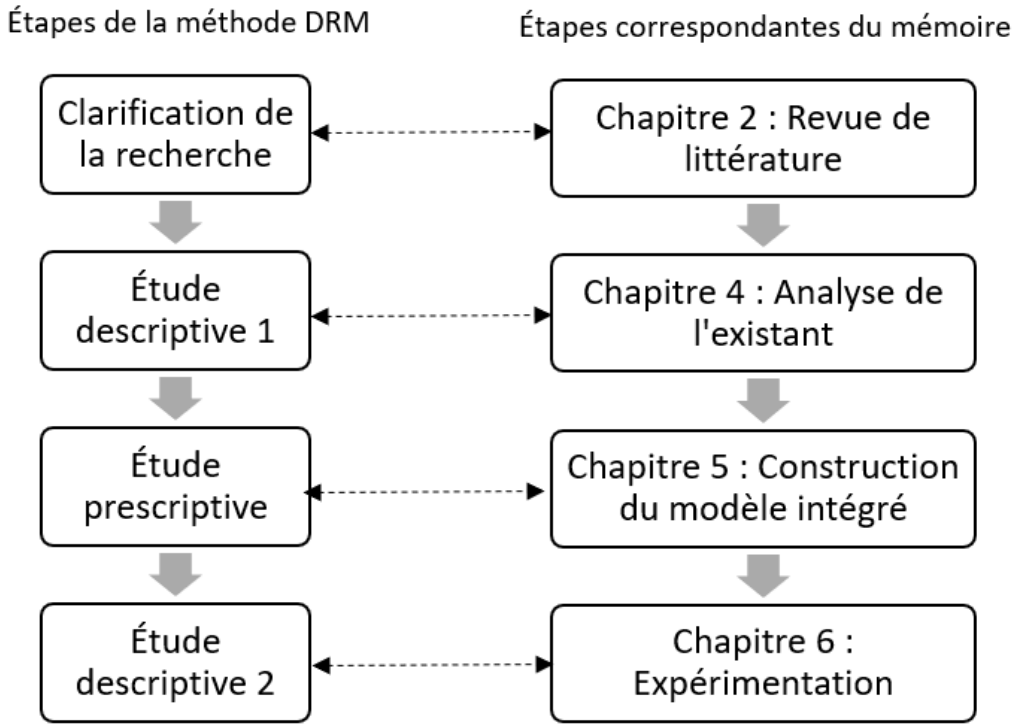

Figure 3.1 Méthode DRM et application au projet de recherche

Cette méthodologie est décrite par Blessing & Chakrabarti (2009) et ne nécessite pas d'implantation complète contrairement à une recherche-action ou une recherche-intervention. Dans le cadre de ce projet de recherche, la revue de littérature (chapitre 2) permet de clarifier la recherche, c'est-à-dire faire un état des méthodes existantes tout en faisant ressortir les besoins des entreprises œuvrant en mode ETO. La première étude descriptive cherche à bonifier cette première phase en analysant les processus existants chez le partenaire industriel (chapitre 4). La phase suivante, présentée au chapitre 5, correspond à la phase de développement des propositions. Cette étude dite prescriptive vise à améliorer les façons de faire du partenaire industriel. Enfin, la

deuxième étude descriptive (chapitre 6) consiste en une phase expérimentale qui vise essentiellement à évaluer empiriquement les gains, mais aussi l'impact des propositions apportées. Cette dernière étape nous permettra notamment de valider la faisabilité d'intégrer l'approche proposée au sein de la solution du partenaire industriel. Chacune des phases de recherche, à l'exception de la revue de littérature qui a déjà été présentée au chapitre 2, est présentée dans les sections suivantes.

3.3.1 L'analyse de l'existant

L'analyse de l'existant devra permettre de faire un état des lieux concret du processus de planification tactique présent chez le partenaire industriel, de comprendre comment le problème de planification est traité et d'identifier les données qui interviennent dans le processus actuel. Cette analyse reposera sur une cartographie des processus existants de planification dans l'ERP du partenaire industriel. La cartographie de processus est une technique largement utilisée en réingénierie des processus (Kettinger et al., 1997) qui permet de représenter de façon simple et standard le déroulement explicite d'un processus d'affaires. Pour réaliser cette cartographie de processus, une série de réunions sera effectuée chez le partenaire industriel avec différents membres de la compagnie (service TI, développeur, VP opération) afin à la fois de comprendre la stratégie globale de planification, mais également d'apprendre à se servir de leur ERP. Une fois cette formation effectuée, le processus existant de planification tactique de projet pourra être cartographié.

Cette cartographie du processus existant s'accompagne d'une représentation du modèle de données qui permet d'identifier les données nécessaires et leurs interrelations. Cette représentation clarifiera les termes utilisés dans le processus et permettra de mieux comprendre la stratégie de planification utilisée. On représentera ce modèle de données sous forme de diagramme entités-relations, car cette représentation est utilisée universellement pour la conception de base de données, mais également, car elle repose sur une représentation graphique qui facilite sa compréhension. De plus, un diagramme entité-relation est moins spécifique qu'un modèle relationnel de données et cela permet de régler la question de confidentialité des données de notre partenaire.

Pour le modèle de données, le partenaire industriel donnera accès à son serveur afin d'aller explorer l'organisation de leurs données.

3.3.2 Construction du modèle général

Cette troisième étape vise à construire un modèle intégré permettant une planification adaptée aux PME travaillant dans un contexte ETO.

La construction du modèle intégré de planification tactique de projet ETO comprend trois parties :

- Modification du processus existant : le processus cartographié lors de l'analyse de l'existant sera bonifié;
- Construction d'un modèle de données supportant le modèle intégré : le modèle de données décrit dans l'analyse de l'existant sera modifié afin d'y intégrer les nouvelles données utilisées dans le processus modifié;
- Proposition d'un outil de calcul : à partir des contraintes liées au contexte ETO, de la portée décrite par le processus et des variables et paramètres décrits par le modèle de données, nous proposerons un outil de calcul proactif permettant la planification au niveau tactique.

Il faut noter que la méthode DRM peut contenir des boucles d'itération au besoin.

3.3.3 Expérimentation

Le modèle de planification et en particulier l'outil de calcul seront testés sur des jeux de données représentatifs du contexte ETO. Pour des raisons de confidentialité et les difficultés de contacter directement les clients du partenaire en période de pandémie sanitaire, l'accès à des données réelles est impossible.

La phase expérimentale doit tout d'abord permettre de valider si le processus de planification ainsi que le modèle de données sont en adéquation avec la façon de faire du partenaire industriel. Ainsi, pour le processus de planification et le modèle de données, nous chercherons à valider le fait qu'ils ne compromettent pas l'intégrité des systèmes du partenaire industriel. Pour cela, nous vérifierons que les modifications apportées au processus et au modèle de données ne suppriment pas des données, des liens entre les données ou des activités dont la disparition pourrait compromettre l'intégrité du système du partenaire.

Conformément aux recherches similaires du domaine, nous utiliserons des instances de planification agrégées proposées par Cherkaoui (2017) et adaptées des instances de De Boer (1998). La notion de capacité des ressources et les paramètres introduits dans notre outil de calcul

seront ajoutés aux instances. Nous réaliserons une série de tests sur des instances de différentes tailles afin de connaître les temps de calcul associés. Cela nous permettra de savoir si l'outil de calcul développé peut être appliqué dans un cas réel de projet ETO. Une analyse de sensibilité aux paramètres de l'outil de calcul sera effectuée. Nous comparerons également notre modèle proactif au modèle développé par Cherkaoui (2017) afin d'évaluer dans quelle mesure le modèle proposé est supérieur à la pratique courante qui consiste à simplement ajouter une période de tampon au projet pour prendre en compte les incertitudes d'un projet.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini nos objectifs spécifiques de recherche et nous avons proposé une méthodologie de recherche. Cette méthodologie s'appuie sur la méthode DRM afin d'analyser la situation existante dans laquelle notre modèle intégré devra être cohérent. Cette méthodologie permettra d'atteindre nos objectifs de recherche. Nous effectuerons également une expérimentation de notre modèle intégré afin d'évaluer sa pertinence sur des données de projets ETO. Nous présenterons au prochain chapitre l'analyse du modèle existant.

CHAPITRE 4 ANALYSE DE L'EXISTANT

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de la deuxième étape de la méthodologie DRM qui consiste en l'analyse de l'existant. Celle-ci comprend une cartographie du processus de planification tactique présent chez le partenaire industriel, une description de la méthode utilisée pour réaliser la planification et une représentation du modèle de données associé. Cette cartographie vise à faire un état des lieux de l'existant afin de proposer par la suite des améliorations qui s'inspirent des bonnes pratiques découlant de la revue critique de la littérature.

4.2 Cartographie du processus de planification tactique

4.2.1 Outils d'élaboration du processus

Une revue de littérature des formalismes de cartographie permet de distinguer de nombreux travaux sur la cartographie des processus. Parmi les différents formalismes, deux se distinguent dans la cartographie des processus : le formalisme BPMN et la modélisation de processus d'affaires par Chaînes de Processus Événementielles (EPC). Tscheschner (2006) souligne que bien que le formalisme BPMN possède un niveau de détails plus élevé. En revanche, le processus EPC permet de mieux représenter les intrants et les extrants au niveau de chaque activité. Il est, par cet aspect, plus adapté à la cartographie d'un processus de planification réalisée au sein d'un ERP. En effet, il est important dans le cadre de cette recherche d'exprimer explicitement les données d'entrée et de sortie du processus de planification tactique. Les symboles du formalisme EPC ici retenu sont représentés à la figure 4.1.

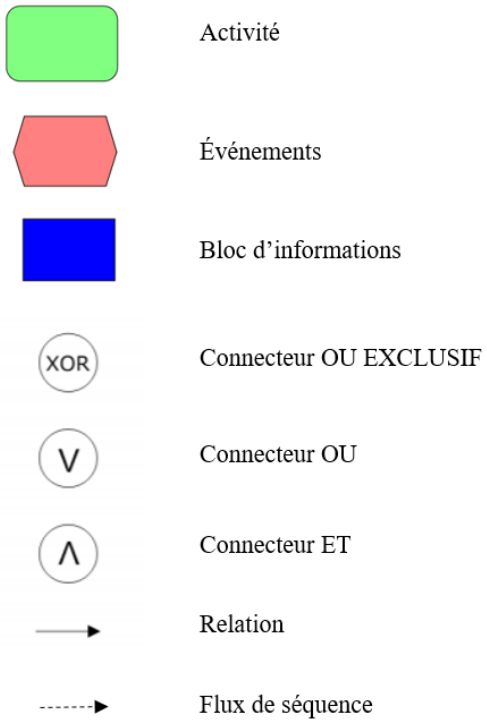

Figure 4.1 Symboles de cartographie des processus sous le formalisme EPC

4.2.2 Acquisition des informations nécessaires à la cartographie

Afin de cartographier le processus de planification tactique du partenaire industriel, deux moyens d'accès à l'information ont été utilisés. Tout d'abord, une série de réunions avec des ressources techniques chez le partenaire ont permis à la fois de bien comprendre la logique globale de planification utilisée, mais également de se familiariser avec l'utilisation de leur ERP. Cela mène au deuxième moyen d'accès à l'information : l'accès à l'ERP du partenaire industriel. Cet accès a permis de réaliser un exemple de planification tactique et ainsi de connaître les différentes activités réalisées à travers le processus ainsi que les intrants et les extrants à chaque étape.

4.2.3 Processus de planification tactique

Les informations récupérées auprès du partenaire industriel ont permis de cartographier le processus de planification tactique. Ce processus commence par le lancement de la planification d'un nouveau projet et s'achève par l'obtention des différentes caractéristiques de l'offre que va faire l'entreprise à son client. Toutes les activités sont réalisées par l'utilisateur de l'outil de planification de l'ERP, soit le plus souvent un planificateur. Par souci de lisibilité et pour ne pas

trop charger le processus, cet élément n'est pas affiché dans le processus EPC. Ce processus est présenté dans les figures 4.2 à 4.8 et le processus complet est disponible en annexe A.

Dans sa stratégie de planification, notre partenaire a choisi de s'inspirer de la méthode DBR (*Drum Buffer Rope*) définie par Goldratt & Cox (1984). Dans cette méthode, une ressource critique ou *Drum* est désignée pour donner le rythme au projet. D'après Chauvigné et al. (2011), la ressource contrainte est un élément ou facteur qui empêche un système d'atteindre un niveau supérieur de performance par rapport à son but. Cela peut être une ressource dont la compétence est rare, un poste de travail qui constitue le cœur du métier de l'entreprise, ou le débit d'une machine. Ainsi, notre partenaire choisit de planifier en premier le lot de travail associé au Drum puis les lots de travail en amont et en val sont planifiés. Nous allons maintenant détailler les différentes étapes du processus de planification existant.

Au début du processus de planification, les caractéristiques principales du projet sont renseignées : client, calendrier (incluant les durées des périodes par exemple) et produit associé au projet (figure 4.2). Les items, c'est-à-dire les sous-parties du produit, sont ensuite définis soit à partir de la nomenclature du produit soit en étant créés directement dans l'ERP grâce à un outil de création (figure 4.3).

Comme l'illustre la figure 4.4, les lots de travail du projet sont ensuite créés et les types d'employés nécessaires à leur réalisation y sont associés. L'activité 1.12 permet de désigner le nombre d'employés de chaque type nécessaire à la réalisation de chaque lot de travail et cela permet de renseigner les ressources associées aux lots de travail. Plus tard (figure 4.5), les ressources non-consommables nécessaires à la réalisation de chaque lot de travail (dénommées machine dans le processus) sont définies. Cela complète la définition des ressources associées aux lots de travail. Les liens de précédence entre les lots de travail sont par la suite définis.

Par la suite (figure 4.6), deux possibilités s'offrent ensuite au planificateur : effectuer la planification en ayant identifié ou non une ressource critique (ou *Drum*). Ainsi, si un *Drum* a été identifié, la planification va pouvoir s'effectuer en commençant par planifier le lot de travail associé à cette ressource contrainte. Dans les activités 1.17 et 1.18, une ressource est désignée en tant que *Drum* et sa capacité est renseignée. Les activités 1.23 et 1.24 représentent elles le cas où un *Drum* n'est pas désigné. Les durées de chaque lot de travail sont estimées et les lots sont planifiés au plus tôt à partir d'une date de début de projet désignée.

Dans la figure 4.7, les activités permettant de continuer la planification tactique dans le cas où un *Drum* a été désigné sont décrites. Tout d'abord, la date de fin et la durée du lot de travail associé à la ressource critique sont définies et ce lot de travail est planifié au plus tard. L'activité 1.21 permet d'estimer les durées de tous les autres lots de travail. Par la suite, les lots de travail situés avant le *Drum* sont planifiés au plus tard et ceux situés après sont planifiés au plus tôt. On obtient alors un échéancier de projet avec la ressource critique qui impose le rythme du projet.

Finalement (figure 4.8), l'échéancier des lots de travail est construit. L'activité 1.25 permet de connaître, à partir de la durée des lots de travail et de l'utilisation des ressources, le coût de chaque lot. L'activité 1.26 sert à définir la date de début, date de fin et coût global du projet à partir des dates de début, dates de fin et coûts de chaque lot de travail planifié au préalable. Enfin, dans l'activité 1.27, les caractéristiques de l'offre sont définies.

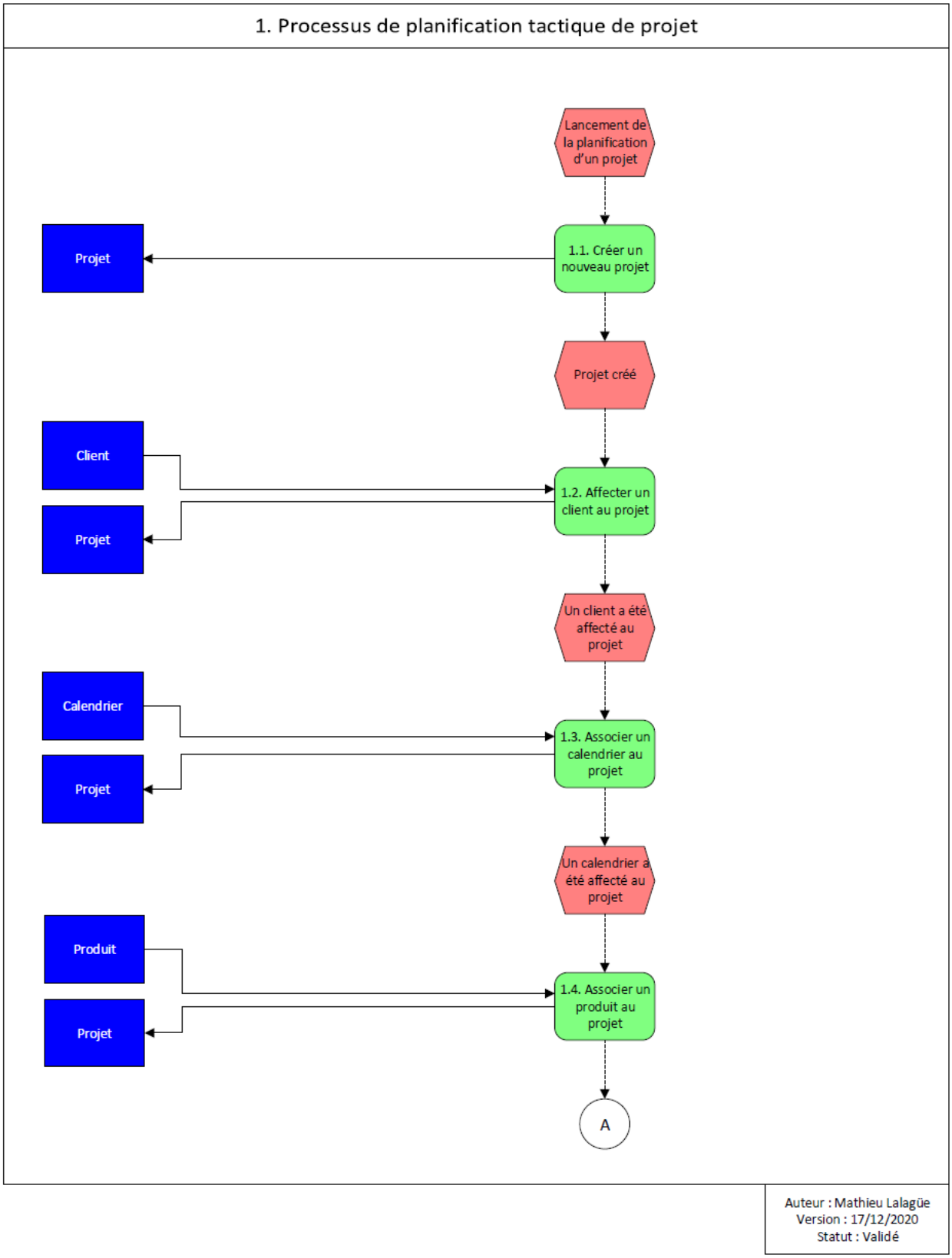

Figure 4.2 Définition des caractéristiques principales du projet

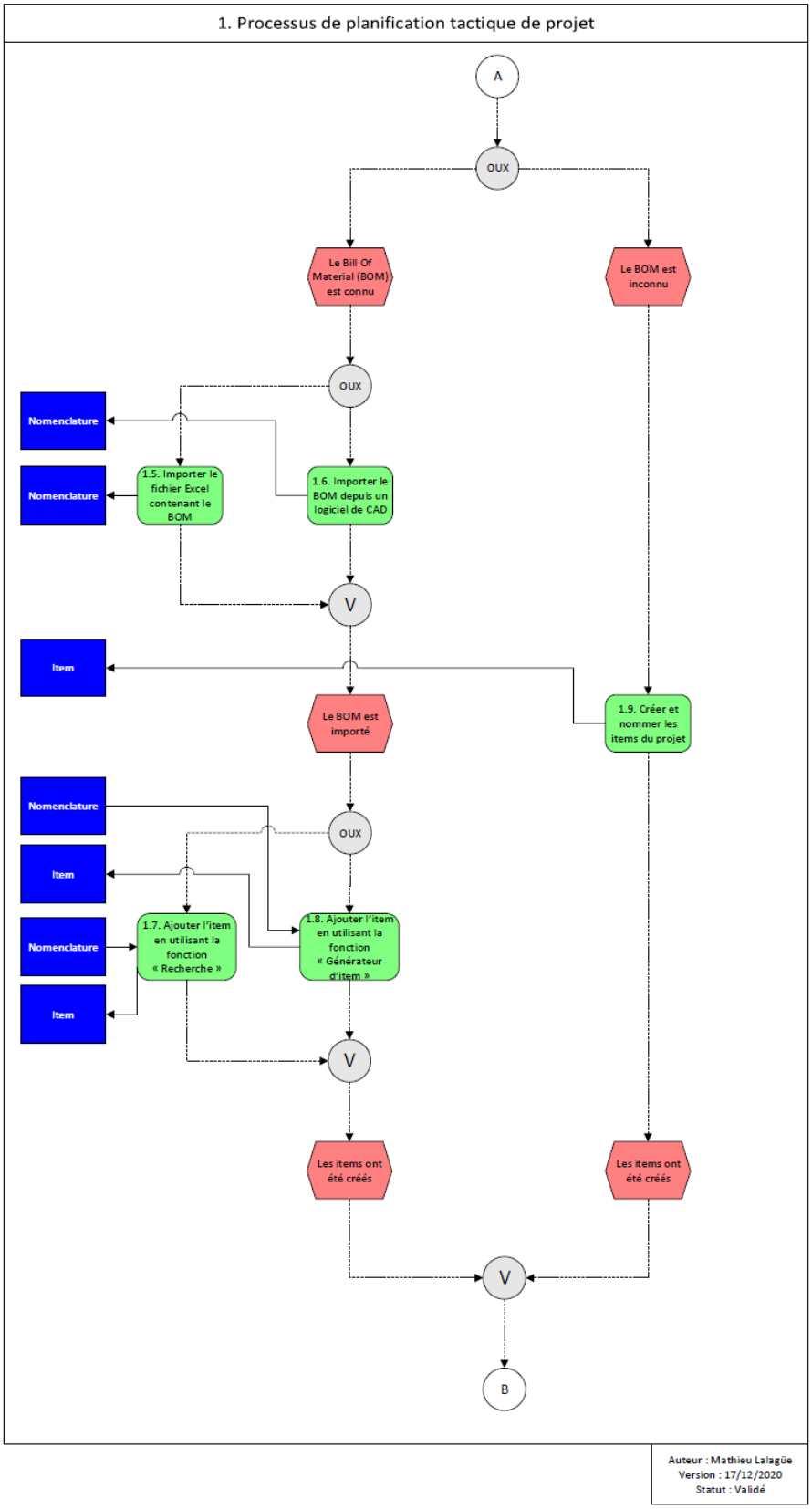

Figure 4.3 Définition des items liés au projet

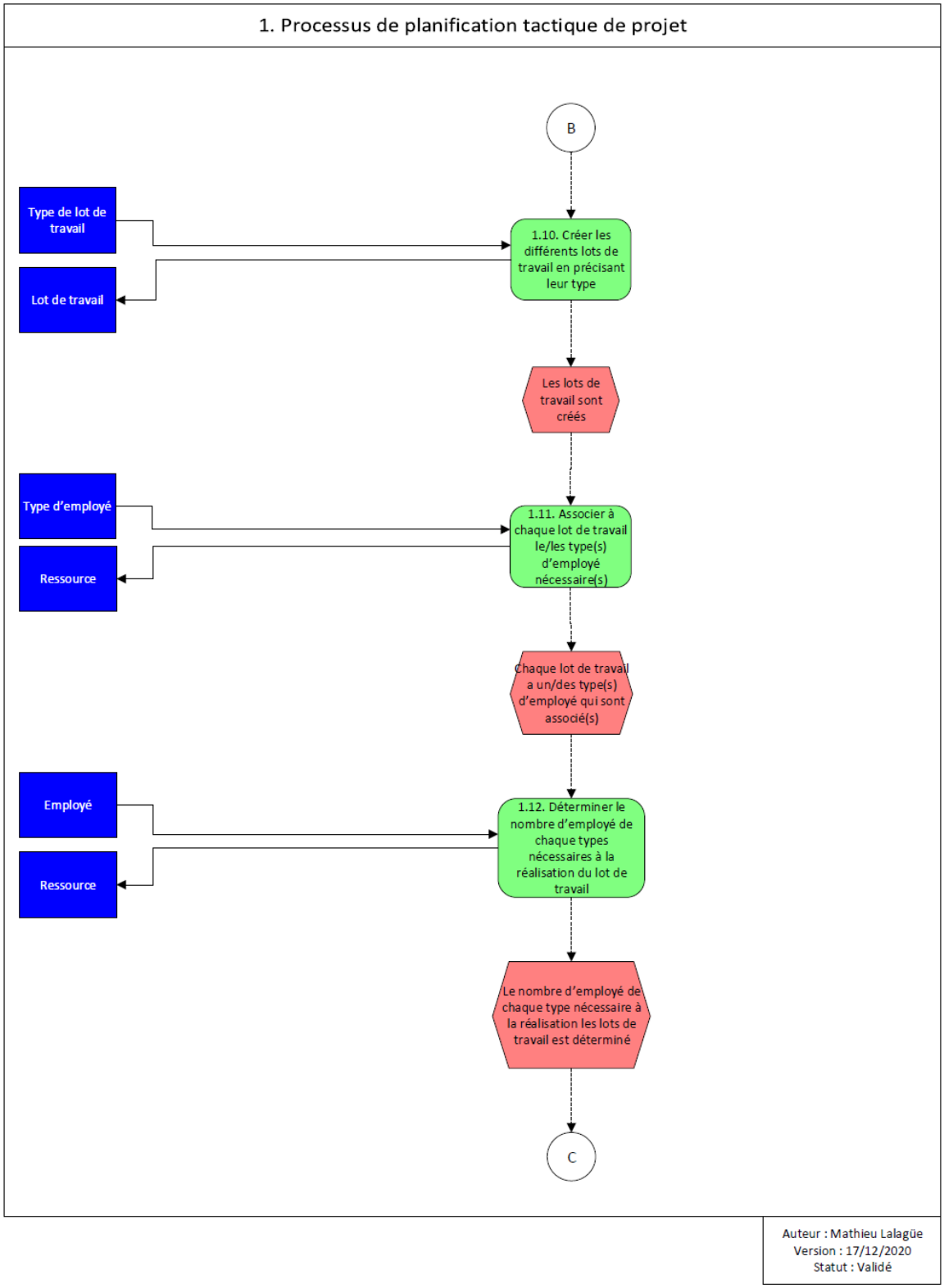

Figure 4.4 Création des lots de travail et définition des caractéristiques des employés liés à ces lots de travail

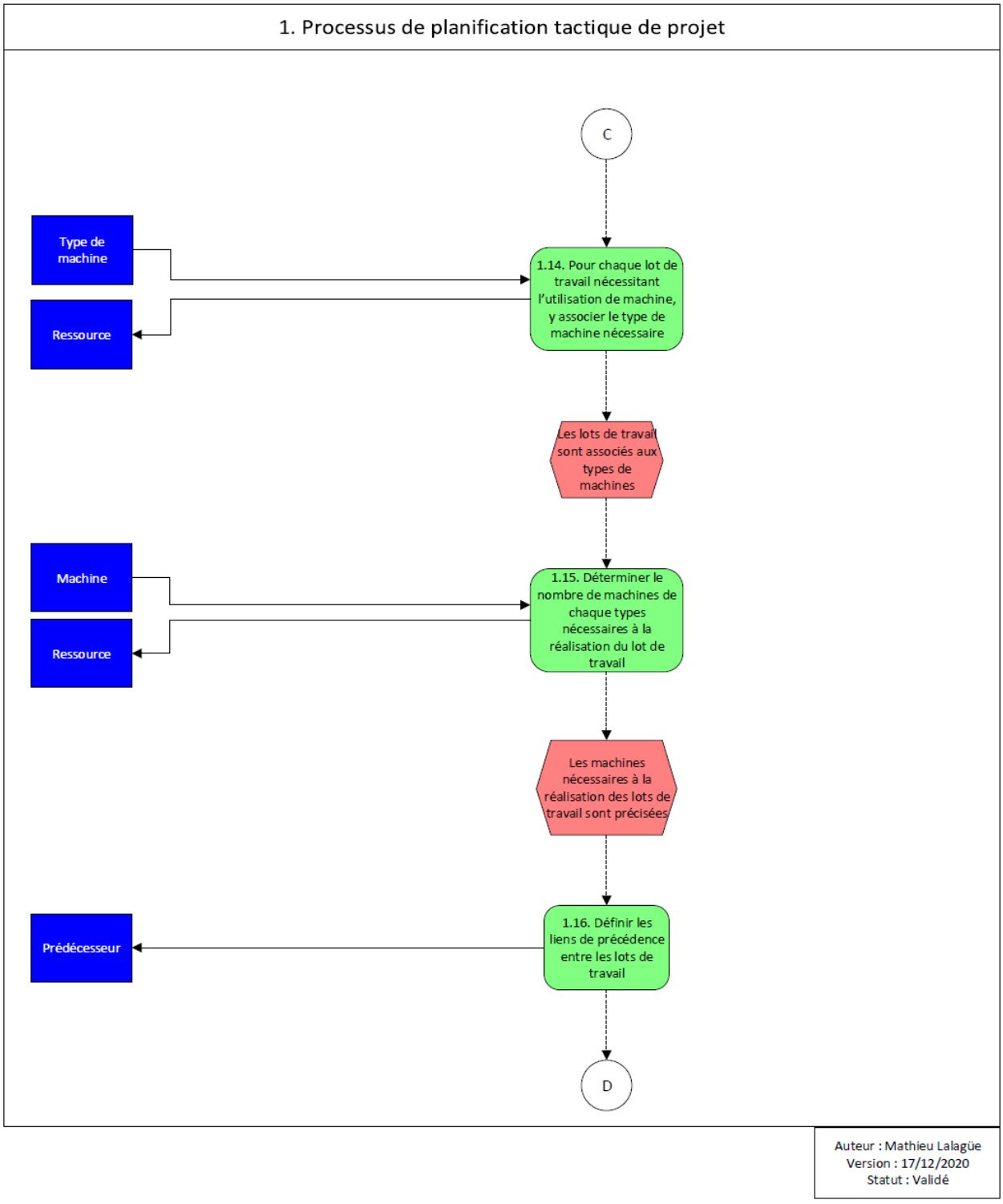

Figure 4.5 Définition des ressources et les liens de précédence

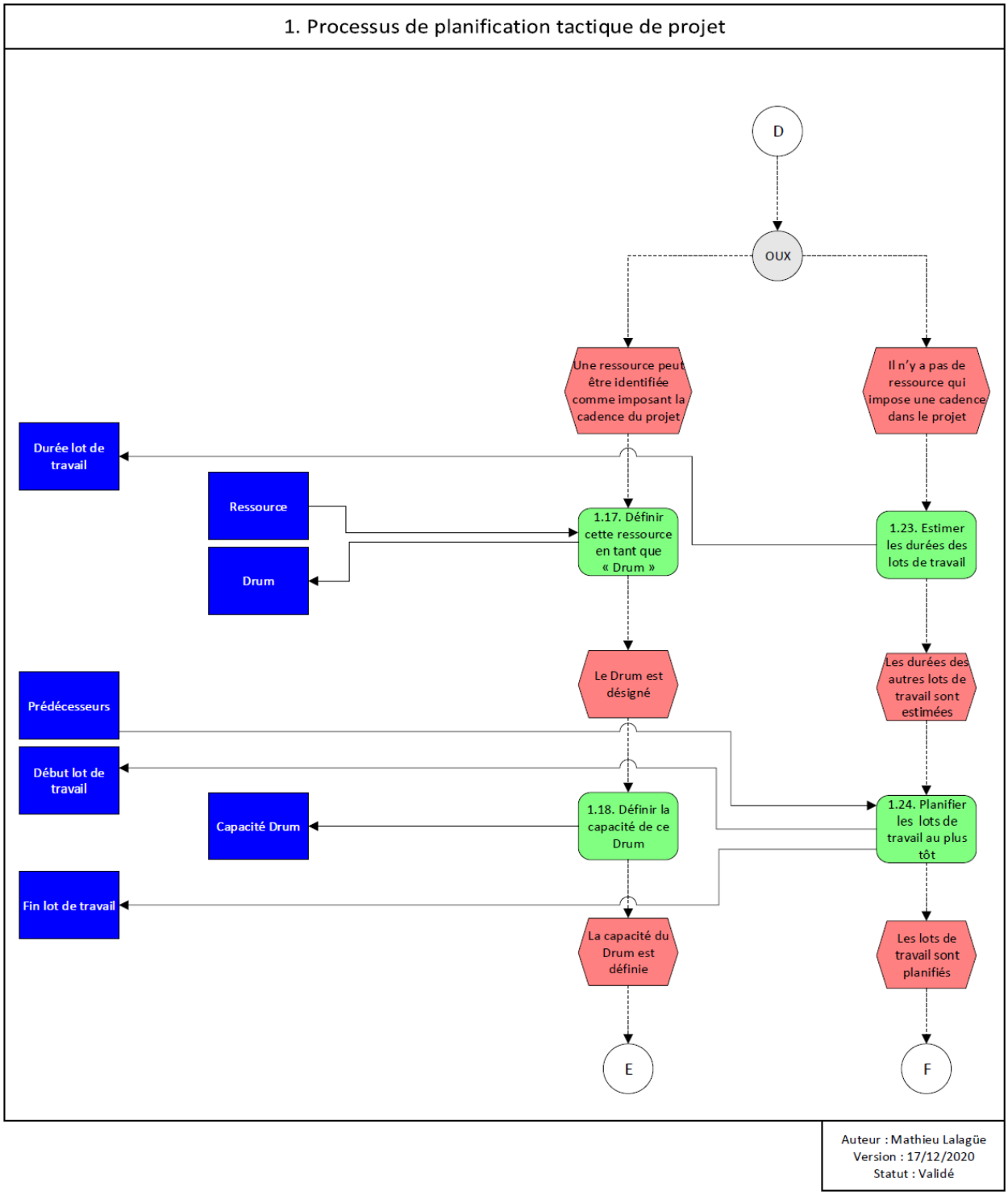

Figure 4.6 Planification sans ressource critique et définition des caractéristiques du *Drum*

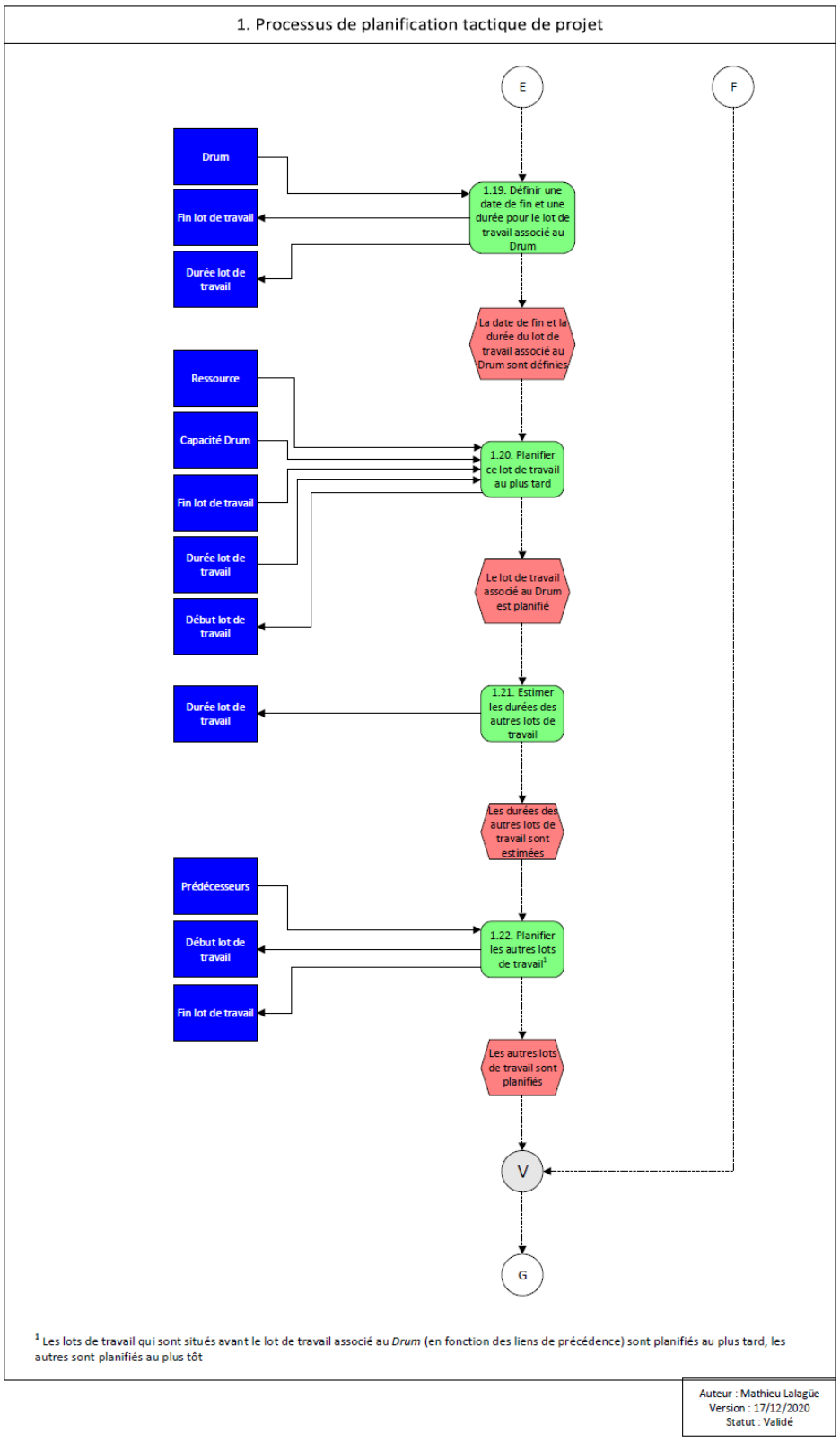

Figure 4.7 Planification du lot de travail associé à la ressource critique ainsi que des autres lots de travail (dans la situation où un *Drum* est identifié)

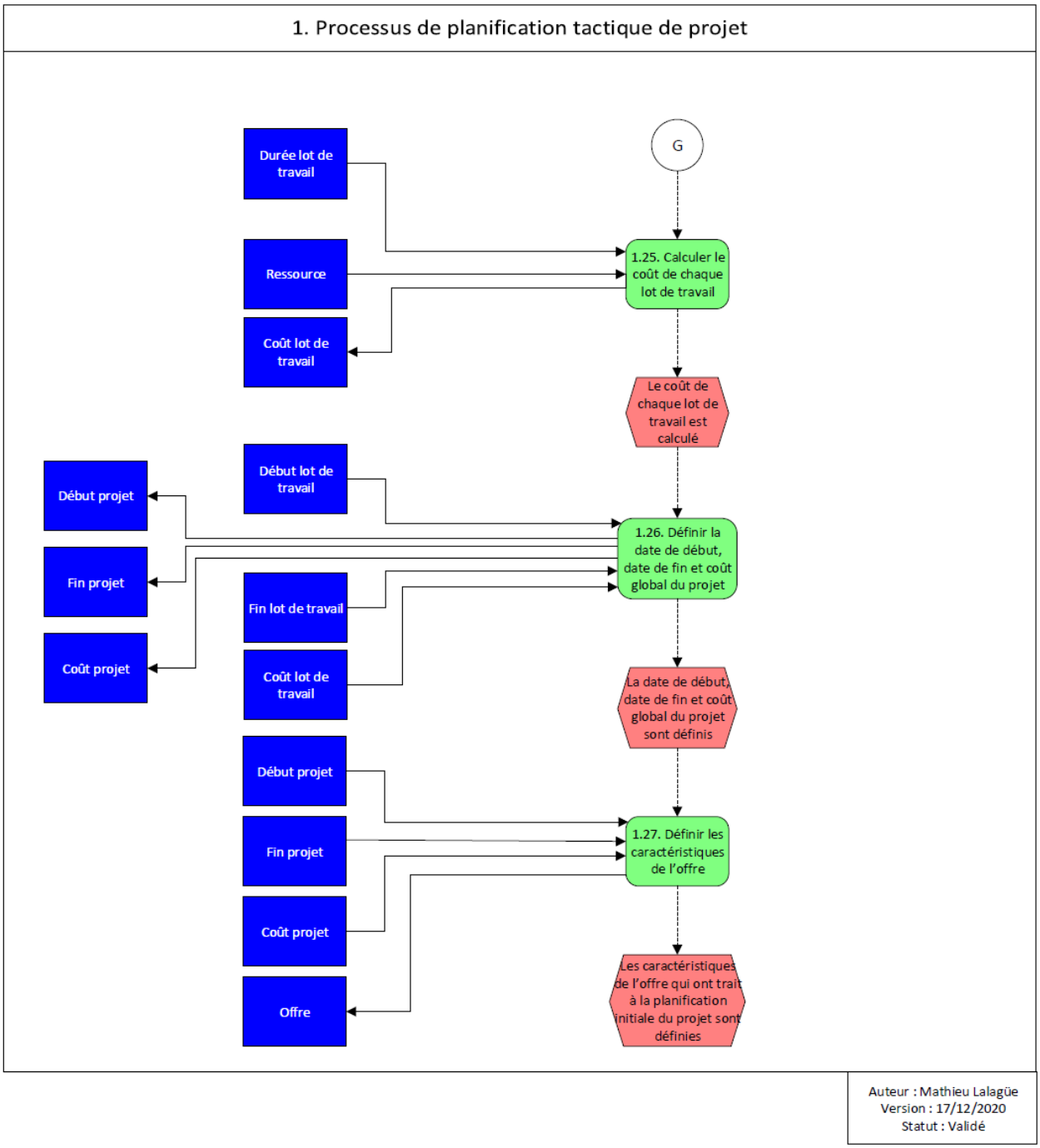

Figure 4.8 Définition des caractéristiques de l'offre

4.2.4 Avantages et limites du processus de planification tactique existant

Il faut tout d'abord souligner que le fait d'adopter des principes de la méthode DBR est une idée intéressante pour tenir compte des incertitudes de la phase de planification tactique en contexte ETO. Le fait d'identifier un *Drum* permet de s'assurer qu'on protège au mieux le lot de travail associé à la ressource critique.

Cependant, après discussions avec le partenaire industriel, il ressort que peu de clients utilisent réellement cet outil de planification tactique. La plupart d'entre eux préfèrent réaliser cette planification manuellement.

Pour expliquer cela, on peut revenir aux raisons pour lesquelles notre partenaire a choisi d'intégrer la désignation d'une ressource goulot (*Drum*) dans son outil de planification tactique. Cela vient de la volonté d'appliquer les principes de la théorie des contraintes (TOC) à la phase de planification tactique. En effet, la théorie des contraintes a pour but de déterminer les contraintes afin de les exploiter dans le but d'améliorer les performances du système. Ce choix a été fait car les planificateurs sont très souvent confrontés aux problèmes de capacité des ressources dans un environnement ETO et il semble qu'une ressource soit toujours assez facilement désignable comme goulot par les clients de notre éditeur ERP. Grâce à l'identification des ressources goulots, la théorie des contraintes peut, grâce à un algorithme d'affectation des ordres aux différentes ressources (DBR), donner d'excellents résultats (Golmohammadi, 2015; Thürer et al., 2017). Cependant, Thürer et al. (2017) montrent que les résultats du DBR sont meilleurs que ceux basés sur le contrôle de la charge totale (CCT) seulement si on se situe dans un contexte de forte sévérité des ressources goulots. Cependant, notre partenaire n'a pas les critères et les paramètres qui lui permettent d'orienter le choix entre ces deux approches.

4.3 Modèle de données

Le modèle de données peut maintenant être construit à partir des intrants et des extrants du processus de planification tactique décrit dans la section 4.2. Ce modèle est décrit sous la forme d'un diagramme entité-relation et est présenté dans la figure 4.9. Dans ce modèle, on voit que le projet est composé de lots de travail. Ces lots de travail sont associés à des ressources qui peuvent être des employés ou des machines. Un Drum est identifié parmi ces ressources et il est défini par

sa capacité. Le projet et les lots de travail sont définis par leur durée, date de fin, date de début et coût. Enfin, l'offre est associée au projet.

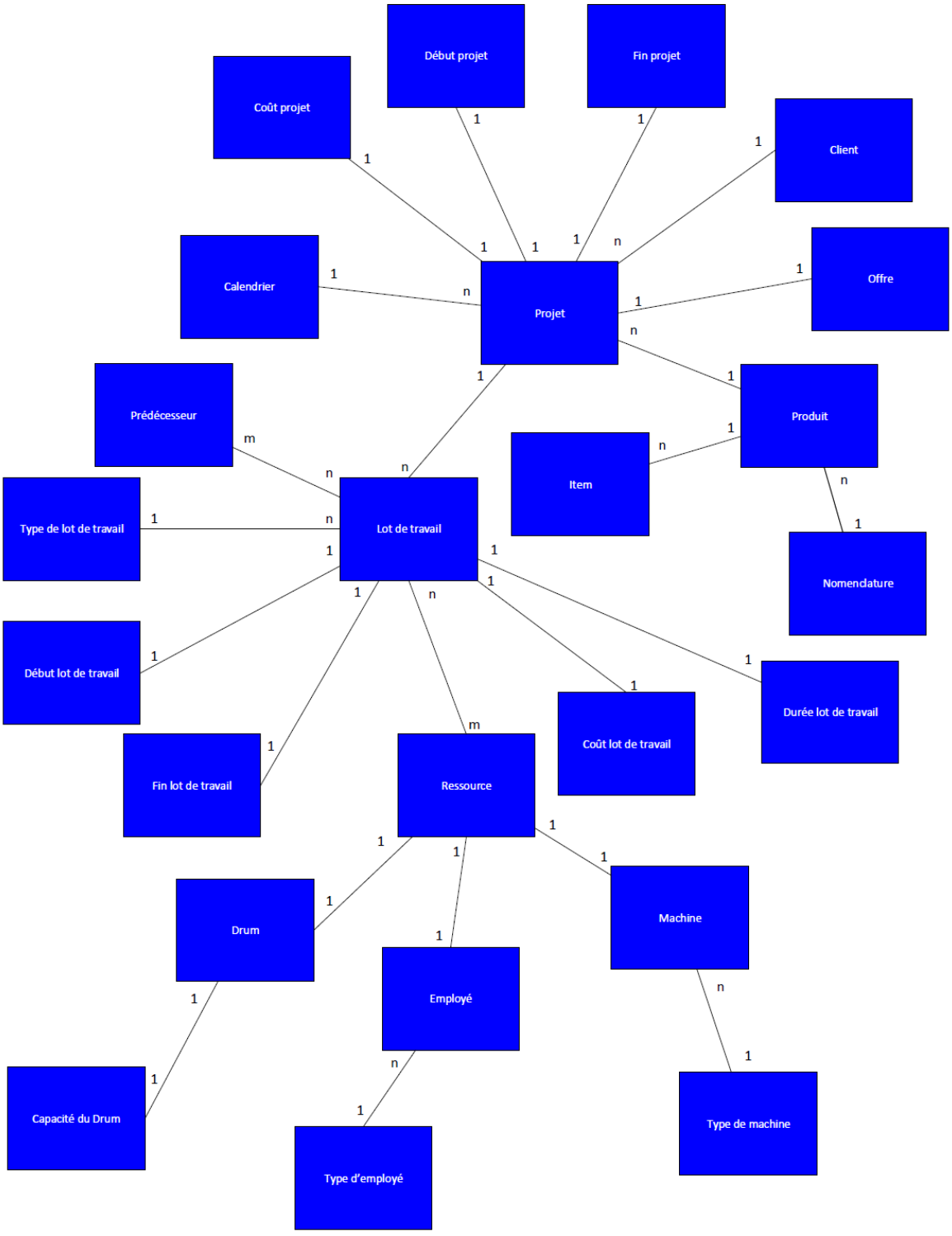

Figure 4.9 Modèle de données existant

4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'analyse de la situation existante soit la deuxième étape de la méthode DRM. Nous avons cartographié le processus de planification tactique existant. Cela nous a également permis d'expliquer comment la planification des lots de travail était réalisée et de souligner le fait que tous les paramètres permettant d'appliquer au mieux la méthode DBR ne sont pas présents. De plus, le modèle de données supportant les données utilisées dans le processus a été défini. On a constaté que les paramètres de la méthode DBR n'étaient pas correctement identifiés et utilisés. Cela nous emmène vers l'objectif du prochain chapitre : proposer un outil de calcul et adapter le processus et le modèle de données existant afin de définir un modèle intégré de planification tactique adaptée au contexte de projets ETO menés par des PME.

CHAPITRE 5 CONSTRUCTION DU MODÈLE INTÉGRÉ

5.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de la troisième phase de cette recherche. Cette phase consiste à proposer un modèle intégré de planification tactique adaptée à des projets de type ETO menés par des PME. Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter les bonifications que nous apportons au processus existant décrit dans le chapitre 4. Le modèle de données existant est également modifié afin de supporter les nouvelles données intervenant dans le processus. Enfin, un outil de calcul permettant d'obtenir un plan tactique réalisable est proposé.

5.2 Adaptation du processus de planification tactique existant

Tout d'abord, le processus actuel ne tient pas compte des contraintes liées aux pièces à longs délais de livraison. Or, cette contrainte est un élément crucial dans un contexte de planification tactique de projets ETO. Pour prendre en compte cette contrainte, nous incluons dans notre processus la possibilité de désigner une pièce critique, c'est-à-dire une pièce qui dispose d'un long délai de livraison. On assigne alors une date de livraison au plus tôt à cette pièce et on la relie à un lot de travail. Cela est fait dans l'activité 1.11 de la figure 5.3. L'activité 1.12 permet de définir une date de début minimale pour le lot de travail associé à cette pièce critique à partir de la date de livraison au plus tôt renseignée dans l'activité 1.11.

Nous avons vu que le processus existant comporte des limites et ne prend pas en compte certains paramètres importants comme la capacité de toutes les ressources et les durées de *Rope* et de *Buffer*. Dans notre modèle intégré, nous allons compléter le *Drum* avec un *Buffer* et un *Rope*. Le *Buffer*, placé avant la date de début du lot de travail associé au *Drum* permet de « protéger » ce lot de travail des incertitudes associées aux lots de travail situés en amont. Le *Rope* est fixé par le planificateur et représente la durée maximale entre le début du projet et le début du lot de travail associé au *Drum*. De plus, dans le processus existant, seule la capacité de la ressource critique est précisée. Il est important de considérer la capacité de l'ensemble des ressources. Dans la figure 5.4, l'activité 1.21 permet de renseigner ces trois nouveaux paramètres. Dans l'activité 1.22, le problème RCCP est résolu en tenant compte de ces paramètres. La résolution de ce problème, décrite à la section 5.4, permet d'obtenir, la durée, date de début et date de fin des lots de travail et

du projet. La connaissance du niveau d'utilisation des ressources permet de calculer le coût estimé du projet.

Il est important de préciser que seules les zones décrites dans les figures 5.1 et 5.2 sont modifiées dans le processus de planification existant. Ainsi, les figures 5.3 et 5.4 présentent cette adaptation du processus de planification. Ces modifications permettent d'atteindre l'objectif spécifique n°1. Le processus modifié complet est présenté en annexe B. Les nouveaux paramètres introduits sont présentés en bleu clair.

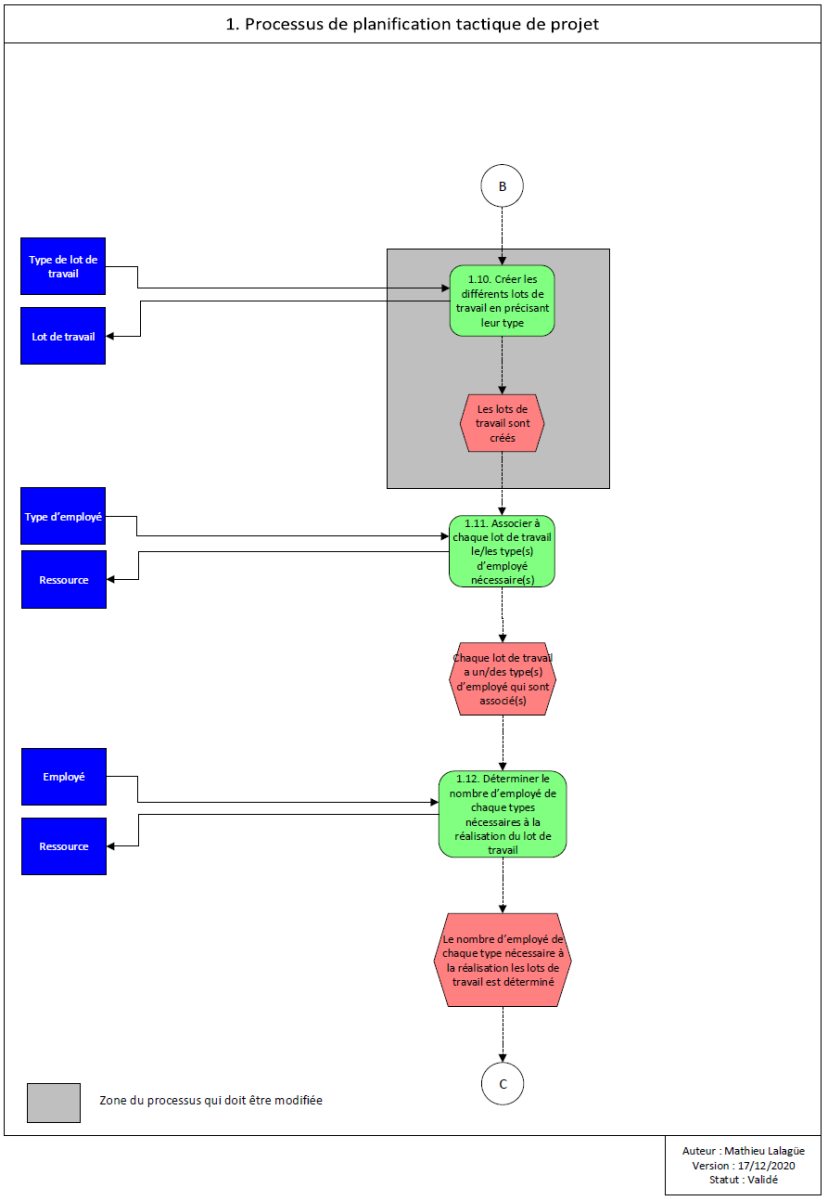

Figure 5.1 Zone du processus de planification tactique existant qui est à modifier (partie 1)

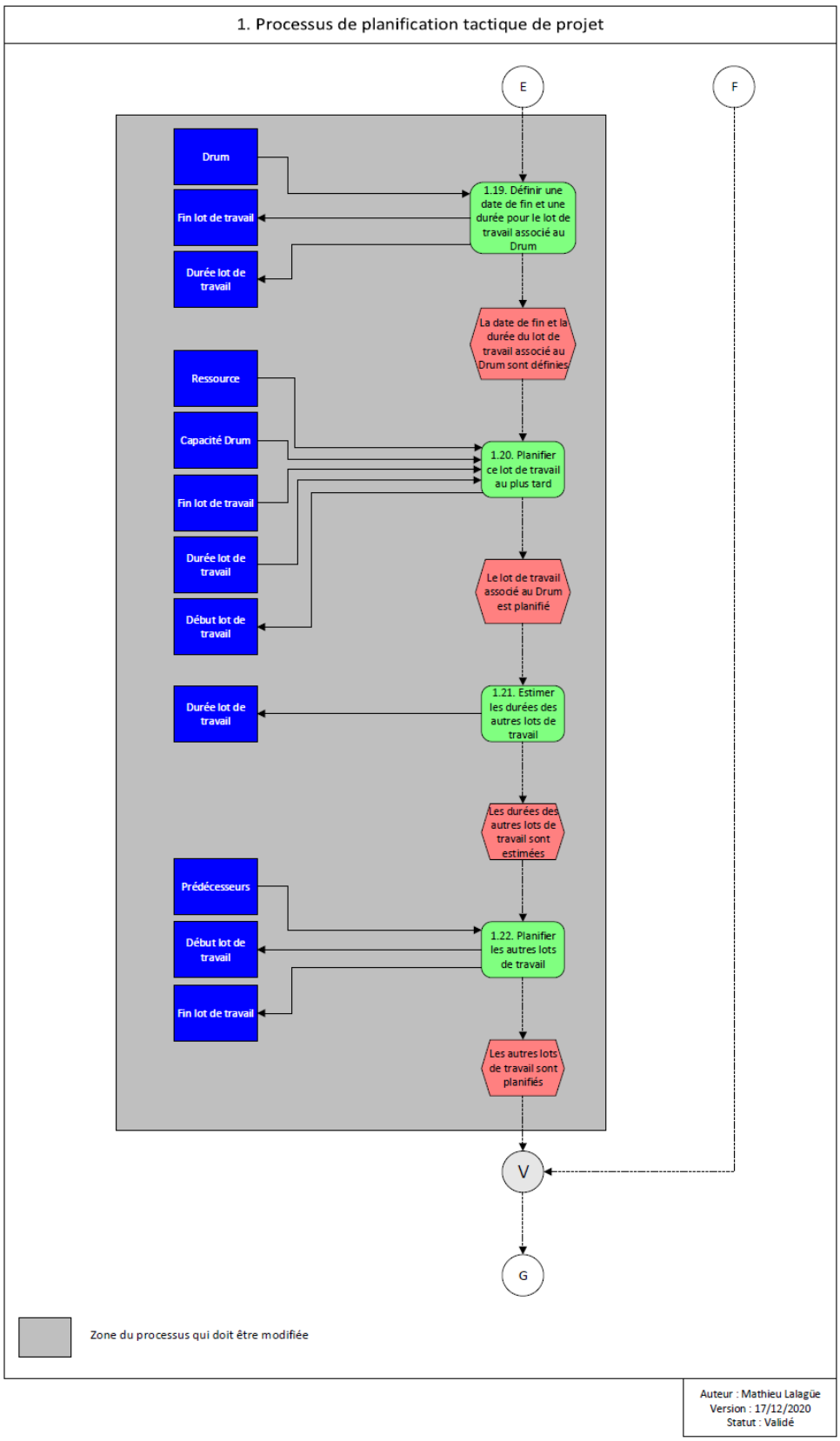

Figure 5.2 Zone du processus de planification tactique existant qui est à modifier (partie 2)

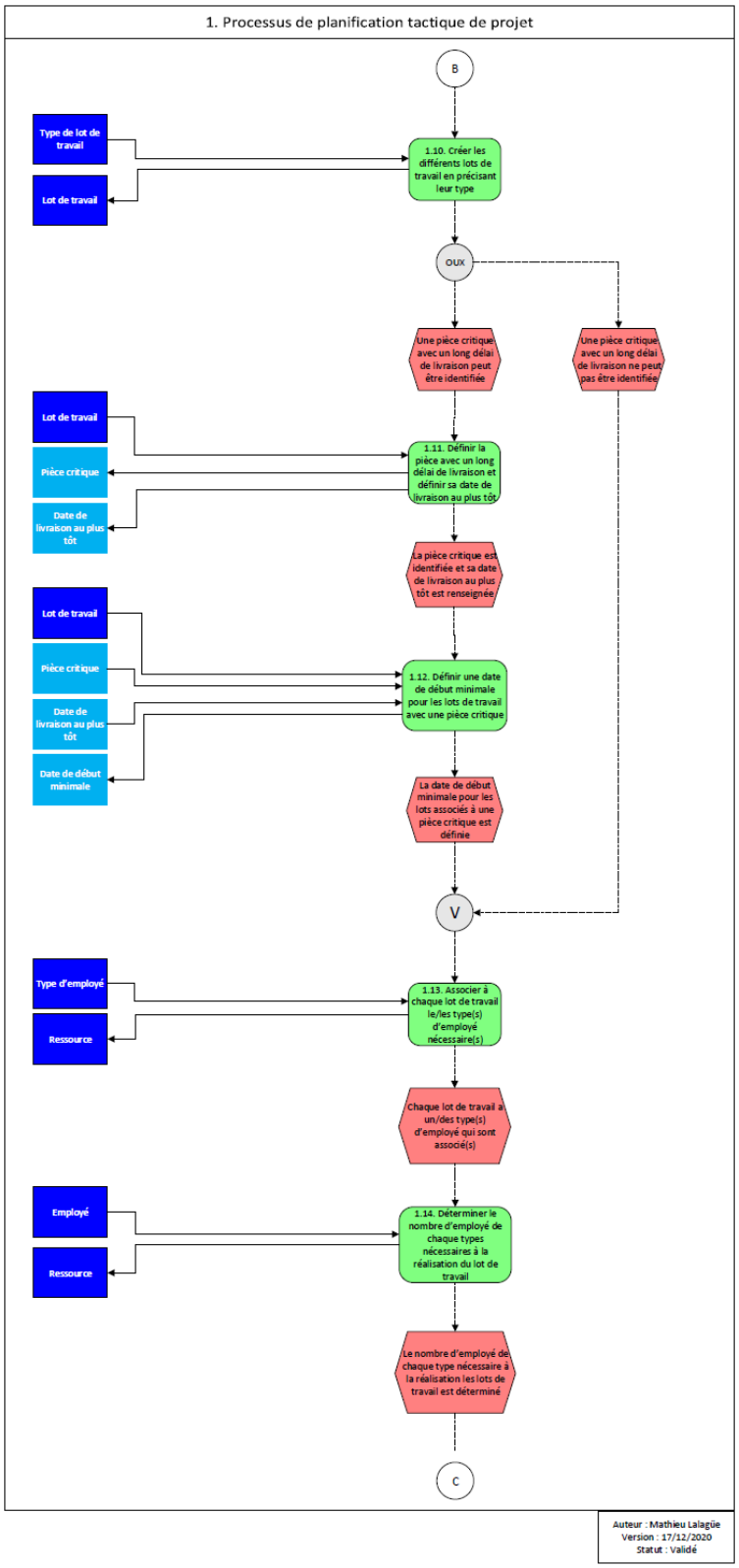

Figure 5.3 Zone du processus de planification tactique adaptée pour tenir compte de la contrainte associée aux pièces critiques

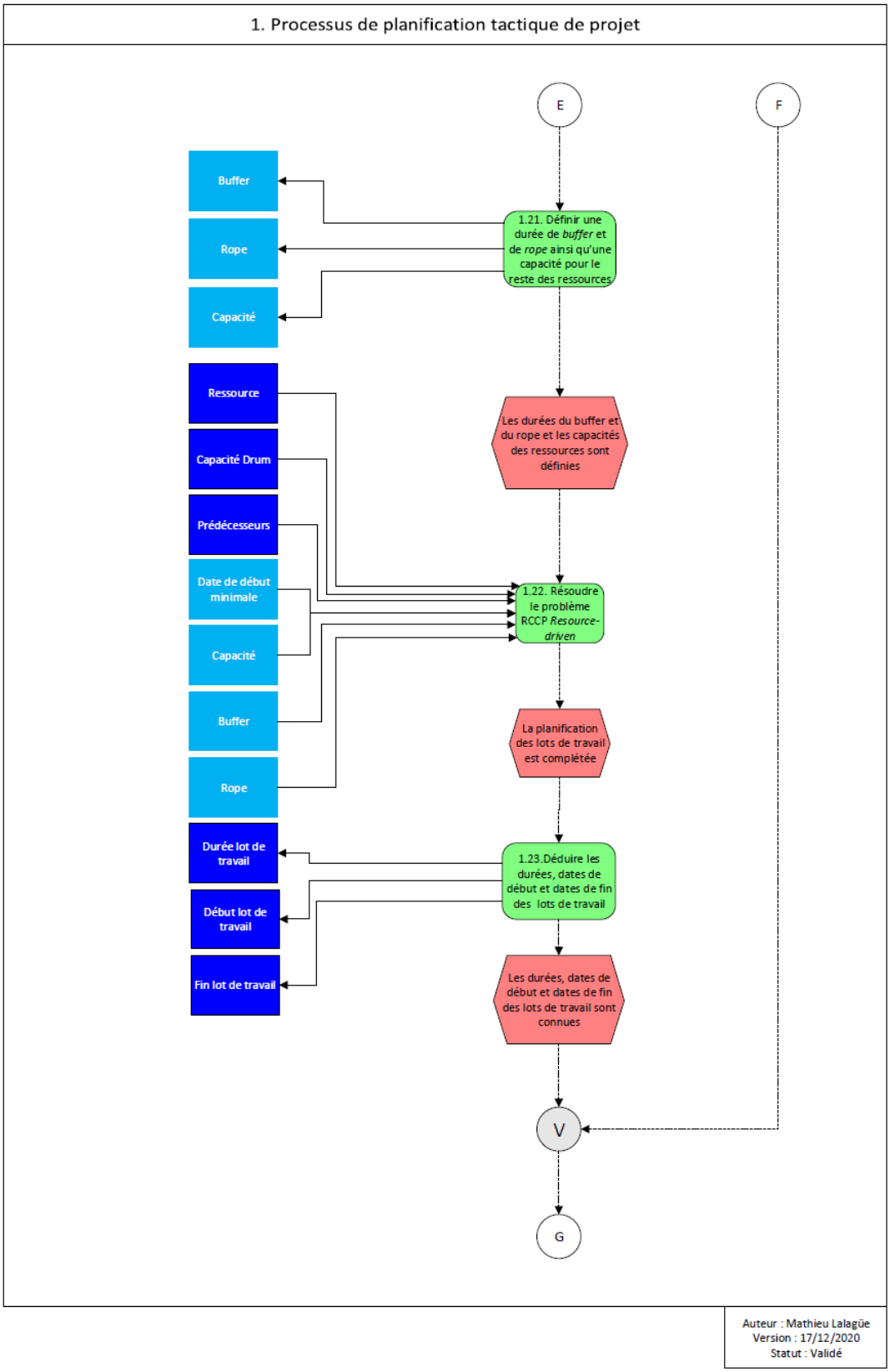

Figure 5.4 Zone du processus de planification tactique adaptée à l'outil de calcul

Ainsi, dans le processus proposé, les durées de *Buffer* et de *Rope* ainsi que la capacité des ressources sont d'abord renseignées afin de pouvoir ensuite résoudre le problème RCCP *resource-driven* associé à cette phase de planification tactique. L'activité 1.20 permet de définir une date de début minimale pour les lots nécessitant des pièces avec longs délais de livraison.

Dans ce processus, nous introduisons de nouveaux paramètres. Il s'agit maintenant de les inclure dans le modèle de données existant. C'est l'objet de la prochaine section.

5.3 Adaptation du modèle de données existant

Pour définir un modèle de données supportant les données du processus défini dans la section 5.2, nous nous appuyons sur le modèle de données existant et nous l'adaptons afin qu'il intègre les nouveaux paramètres introduits. Nous pourrons alors atteindre l'objectif spécifique nº2.

Les six paramètres à inclure dans le nouveau modèle de données sont Capacité, Pièce critique, Date de livraison au plus tôt, Date de début minimale de lot de travail, *Buffer* et *Rope* dont les définitions ont été données dans la section 5.2.

Lors de l'analyse de l'existant, nous avons utilisé un diagramme entité-relation pour représenter le modèle de données : nous reprenons ici cette façon de représenter le modèle de données. Le modèle de données adapté au modèle intégré de planification est présenté dans la figure 5.5.

Concrètement, le *Buffer* et le *Rope* sont directement reliés au projet. La capacité des ressources est associée aux ressources. La pièce critique (pièce avec un long délai de livraison) et sa date de livraison au plus tôt sont liées au lot de travail. La date de début minimale de lot de travail est également reliée au lot de travail. On fait le choix de ne pas lier les pièces critiques directement à la nomenclature car cette entité est reliée à beaucoup d'autres fonctions que l'on ne veut pas compromettre. Cette considération est davantage développée dans la section consacrée à la validation du processus et du modèle de données (section 6.2).

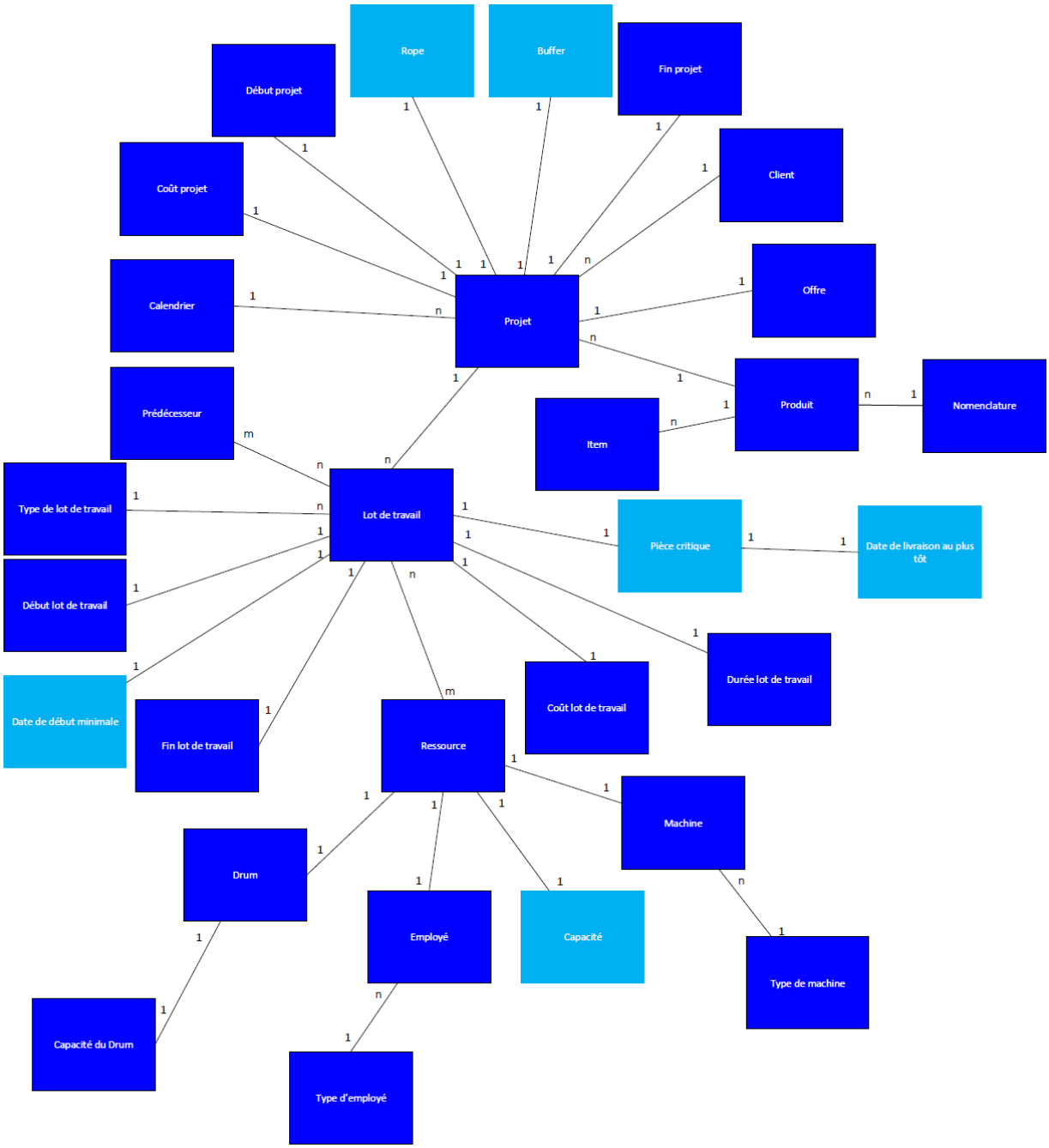

Figure 5.5 Modèle de données adapté au modèle intégré de planification tactique

Nous avons défini le processus et le modèle de données de notre modèle intégré. Avec ces deux éléments modifiés, nous avons désormais accès aux capacités de toutes les ressources, aux durées de *Buffer* et de *Rope* mais également à une date de début minimale pour les éventuels lots de travail associés à une pièce à long délai de livraison.

5.4 Outil de calcul

5.4.1 Résolution d'un problème RCCP

La résolution du problème RCCP permet d'établir des engagements de budget et de dates jalons avec les parties prenantes du projet, notamment le client. On y planifie l'exécution des lots de travaux qui consistent en un regroupement de plusieurs activités sur un horizon de temps discrétisé en périodes. Les lots sont définis par des charges de travail au lieu de durées prédéfinies et leur consommation de ressources peut varier d'une période à l'autre. Le RCCP est le problème de planification souvent associé au niveau tactique. Il est adapté au contexte de cette recherche dans la mesure où nous voulons planifier des lots de travail qui ont des liens de précédence entre eux et qui sont en concurrence pour l'utilisation des ressources disponibles.

Il existe deux types de problèmes RCCP : le *Resource-driven* RCCP et le *Time-driven* RCCP. Le premier considère les contraintes de ressources rigides et son but est de minimiser la durée du projet ou minimiser les retards par rapport aux dates d'échéance considérées flexibles, tandis que le deuxième problème autorise l'augmentation des capacités régulières par des capacités non régulières plus coûteuses. L'objectif de ce deuxième problème est de minimiser le coût de la capacité non régulière tout en respectant les dates d'échéances considérées fermes dans ce cas.

Nous avons choisi de résoudre un problème RCCP *Resource-driven*. En effet, bien que l'objectif de minimisation des coûts soit également important dans le contexte de projets PME, la minimisation de la durée des projets est l'objectif recherché par le modèle de planification tactique existant au sein de l'ERP du partenaire.

Le modèle proposé est adapté de celui de Cherkaoui (2017) en ajoutant les aspects de la méthode DBR. Ce modèle a été sélectionné comme modèle de base, car il permet de combiner l'utilisation des variables discrètes pour une considération périodique des contraintes de ressources avec l'utilisation des variables continues pour la représentation des dates de début et de fin des lots.

5.4.2 Description formelle du problème

L'horizon de planification est divisé en période de temps de durées égales. Nous considérons cette durée comme étant une semaine de travail. Soit *P* l'ensemble des périodes (indice *p*) où chaque période a une durée d'une semaine. L'ensemble de ces périodes *p* forme l'horizon de planification *H*. Soit *I* l'ensemble des lots de travaux (indice *i*) où chaque lot requière un sous-ensemble de l'ensemble *R* de groupes de ressources indépendants (indice *r*). Les lots de travaux sont reliés par des relations de précédence génériques (c.à.d. en structure de réseau) de type fin-début sans décalage ou chevauchement. L'ensemble $Pred_i$ regroupe tous les prédécesseurs directs du lot *i*. On considère que tous les lots *i* pourront être débutés et finis à l'intérieur de l'horizon *H*. Chaque lot exige une charge de travail Q_i pour être réalisé. La charge de travail *Qi* d'un lot est définie comme étant la somme des charges requises Qr_i de chaque groupe de ressources *r*. Qr_i correspond à la quantité globale exigée par le lot *i* du groupe de ressources *r* et est donc être nul si le lot de travail *i* ne requiert pas le groupe de ressource *r*. Les paramètres Q_i^{max} et Q_i^{min} représentent respectivement la charge de travail maximale et minimale qui peut être assignée à *i* durant une période. Un lot peut avoir une date de lancement RD_i avant laquelle il ne peut pas débuter. Cela peut être utile en cas de lots de travail nécessitant des pièces avec des longs délais de livraison par exemple.

5.4.3 Modélisation mathématique du problème

Les notations des paramètres sont fournies dans le tableau 5.1. Les notations des variables sont fournies dans le tableau 5.2.

Tableau 5.1 Description des paramètres

Paramètres	Description
P	Ensemble des périodes de temps ($p \in P$)
I	Ensemble des lots de travail ($i \in I$)
R	Ensemble des groupes de ressources ($r \in R$)
D_p	Durée de la période p (ici fixé à une semaine)
H	Horizon de planification : $H = \sum_{p \in P} D_p$
RD_i	Date de lancement du lot de travail i exprimé en période
Q_i^{max}	Charge maximale qui peut être assignée au lot de travail i pendant une période
Q_i^{min}	Charge minimale qui peut être assignée au lot de travail i pendant une période
Q_{ri}	Utilisation de la ressource r par le lot de travail i
$Pred_i$	Ensemble des prédécesseurs du lot de travail i
K_{rp}	Capacité disponible de la ressource r pendant la période p
DRUM	Ressource critique du projet ($DRUM \in R$)
DWP	Lot de travail associé au *DRUM*
BUFFER	Durée du tampon présent avant le *DWP*
ROPE	Durée entre le début du projet et le début du *DWP*
J	Ensemble des lots de travail situés avant le DWP ($j \in J$)

Tableau 5.2 Description des variables

Variables	Description
ts_i, tf_i	Date de début et de fin du lot de travail i
zs_{ip}	Variable binaire qui vaut 1 si le lot de travail i débute durant ou avant la période p
zf_{ip}	Variable binaire qui vaut 1 si le lot de travail i finit durant ou avant la période p
d_{ip}	Part de la période p occupée par le lot i ($0 \leq dip \leq Dp$)
x_{ip}	Intensité du lot i durant la période p ($0 \leq xip \leq 1$) soit la part du travail associé au lot i réalisé pendant la période p
Q_{rp}	Utilisation de la ressource r pendant la période p
ts_{DWP}, tf_{DWP}	Date de début et de fin du lot de travail *DWP*
Debut	Date de début du projet
Cmax	Date de fin du projet

On cherche ici à résoudre un problème RCCP *Ressource-driven*. Ainsi, l'objectif du modèle est de minimiser la date de fin du projet. La fonction-objectif (1) sera donc :

$$\min Cmax \tag{1}$$

On définit les contraintes suivantes :

$$ts_i \geq \sum_{k=1}^{p} D_k * \left(1 - zs_{ip}\right) \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{2}$$

$$ts_i \leq \sum_{k=1}^{p} D_k + \left(H - \sum_{k=1}^{p} D_k\right) * \left(1 - zs_{ip}\right) \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{3}$$

$$zs_{ip} \geq zs_{ip-1} \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{4}$$

$$tf_i \geq \sum_{k=1}^{p} D_k * \left(1 - zf_{ip}\right) \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{5}$$

$$tf_i \leq \sum_{k=1}^{p} D_k + \left(H - \sum_{k=1}^{p} D_k\right) * \left(1 - zf_{ip}\right) \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{6}$$

$$zf_{ip} \geq zf_{ip-1} \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{7}$$

Les contraintes (2) à (4) assurent que les variables binaires zs_{ip} valent 1 si le lot *i* commence avant ou durant la période *p* et 0 sinon. Le même mécanisme s'applique aux dates de fin des lots tf_i et les variables binaires zf_{ip} dans les contraintes (5) à (7).

$$d_{ip} \leq D_p * (zs_{ip} - zf_{ip-1}) \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{8}$$

$$d_{ip} \geq D_p * (zs_{ip-1} - zf_{ip}) \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{9}$$

$$d_{ip} \geq tf_i - \sum_{k=1}^{p} D_k + D_p * zs_{ip-1} - H * \left(1 - zf_{ip}\right) \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{10}$$

$$d_{ip} \geq \sum_{k=1}^{p} D_k * \left(1 - zs_{ip-1}\right) - ts_i - D_p * zf_{ip} \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{11}$$

$$\sum_{p \epsilon P} d_{ip} = tf_i - ts_i \qquad \forall i \epsilon I \tag{12}$$

La contrainte (8) force d_{ip} à 0 si le lot *i* est inactif (c'est-à-dire qu'il n'est pas encore commencé ou déjà terminé) durant la période *p* et assurent que d_{ip} ne dépasse pas la durée D_p de la période *p*. La contrainte (9) force avec la contrainte (8) la durée d_{ip} à être égale à D_p quand le lot *i* commence avant la période *p* et n'est pas encore achevé à la fin de la période *p*. Les contraintes (10) et (11) donnent une borne inférieure à d_{ip} quand le lot *i* finit/commence dans la période *p*. Finalement, les

contraintes (12) assurent la cohérence globale des durées dans les périodes avec les dates de début et de fin.

$$ts_i \geq RD_i \qquad \forall i \epsilon I \tag{13}$$

$$ts_i \geq tf_j \qquad \forall i \epsilon I, j \epsilon Pred_i \tag{14}$$

$$Cmax \geq tf_i \qquad \forall i \epsilon I \tag{15}$$

La contrainte (13) assure que chaque lot de travail ne débute pas avant sa date de lancement. Cette contrainte permet notamment de s'assurer que les lots de travail associés à des pièces à longs délais d'approvisionnement ne débutent pas avant la date d'arrivée prévue de ces pièces. La contrainte (14) assure le respect des liens de précédence. La contrainte (15) assure que tous les lots sont finis avant la fin du projet.

$$x_{ip} * \sum_{r \epsilon R} Q_{ri} \leq Q_i^{max} * d_{ip} \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{16}$$

$$x_{ip} * \sum_{r \epsilon R} Q_{ri} \geq Q_i^{min} * d_{ip} \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{17}$$

$$\sum_{p \epsilon P} x_{ip} = 1 \qquad \forall i \epsilon I \tag{18}$$

$$Q_{rp} = \sum_{i \in I} x_{ip} Q_{ri} \qquad \forall r \epsilon R, p \epsilon P \tag{19}$$

$$Q_{rp} \leq K_{rp} \qquad \forall r \epsilon R, p \epsilon P \tag{20}$$

La contrainte (16) assure que la charge allouée à un lot de travail durant une période ne dépasse pas la quantité maximale de la charge permise pour ce dernier. La contrainte (16) garantit aussi que si $d_{ip} = 0$ (donc i n'est pas exécuté durant p) alors $x_{ip} = 0$. La contrainte (17) assure le respect de la borne minimale de la charge durant l'exécution d'un lot. Les contraintes (18) assurent le respect des charges totales requises par les lots. Les contraintes (19) assurent que l'utilisation d'une ressource dans une période correspond à la somme des consommations des lots en cours d'exécution sur cette période de cette ressource. Les contraintes (20) assurent que l'utilisation des ressources dans une période ne dépasse pas la capacité disponible.

$$tf_j \leq ts_{DWP} - BUFFER \qquad \forall j \epsilon J \tag{21}$$

La contrainte (21) assure que tous les lots de travail situés avant le DWP sont complétés avant le début du *DWP* moins la durée du *BUFFER*.

$$ts_{DWP} - Debut \leq ROPE \tag{22}$$

$$ts_i \geq Debut \qquad \forall i \epsilon I \tag{23}$$

Il faut tout d'abord préciser qu'on part du principe que la durée du *ROPE* est supérieure ou égale à la durée du chemin critique formé par les lots de travail avant le DWP. La contrainte (22) permet de définir la durée du *ROPE* comme étant la durée maximale entre le début du projet et le début du DWP. La contrainte (23) assure que tous les lots de travail démarrent après la date de début du projet.

Le domaine de définition des variables est tel que :

$$zs_{ip}, zf_{ip} \epsilon \{0,1\} \qquad \forall i \epsilon I, p \epsilon P \tag{24}$$

$$toutes\ les\ variables\ \geq 0 \tag{25}$$

La définition d'un *Buffer* associé au lot de travail relié au *Drum* permet d'adresser la problématique de prise en compte des incertitudes omniprésentes dans un contexte ETO. En effet, ce tampon « protège » la date de début du lot de travail associé à la ressource critique et permet ainsi de prévenir d'un éventuel retard dans l'exécution des lots de travail situés en amont. De plus, la définition d'une durée de *Rope*, c'est-à-dire d'une durée maximale entre le début du projet et le début du lot de travail associé au *Drum*.

5.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de proposer un modèle intégré de planification tactique adapté à un contexte de projets ETO menés par des PME. Ce modèle comprend un outil de calcul qui s'intègre à un processus d'affaires défini et qui s'opérationnalise à partir du modèle de données existant de notre partenaire industriel. Dans le prochain chapitre, nous discutons de l'expérimentation et de la validation de ce modèle.

CHAPITRE 6 EXPÉRIMENTATION

6.1 Introduction

Ce chapitre constitue la dernière phase de cette recherche, soit la deuxième étude descriptive. Dans cette phase, nous cherchons d'abord à valider le processus et le modèle de données proposés. Pour cela, nous allons chercher à évaluer l'adéquation du processus et du modèle de données proposés, soit leur capacité à s'intégrer au logiciel existant. Une fois cette validation réalisée, nous pourrons expérimenter l'outil de calcul proposé dans la section 5.2 grâce à des instances de projets tests.

6.2 Validation du processus de planification et du modèle de données

Afin de valider le processus de planification tactique et le modèle de données que nous proposons, nous allons évaluer leur cohérence avec le processus et le modèle de données existant. En effet, nous voulons vérifier que les modifications proposées ne compromettent pas l'intégrité du système de notre partenaire.

Pour s'assurer que les modifications proposées au processus et au modèle de données permettent de maintenir l'intégrité du système de notre partenaire, nous allons vérifier qu'aucun intrant, extrant ou activité essentiels n'ont été supprimés. En effet, la suppression d'un intrant, d'un extrant ou d'une activité dans le processus de planification tactique pourrait avoir un impact sur d'autres processus au sein de l'ERP et ainsi compromettre l'intégrité de tout le système.

Pour analyser ces modifications, nous allons nous inspirer des indicateurs décrits par Echternach-Jaubert (2020). Elle réalise une revue des indicateurs de standardisation présents dans la littérature et les adapte pour qu'ils soient applicables à un processus. Quatre catégories d'indicateurs sont retenues : intrants et extrants, livrables, activités et ressources. Dans le cas de notre processus, les catégories de livrable et de ressources ne sont pas pertinents car notre processus d'affaires proposé ne désigne aucune partie prenante à l'exception du planificateur. Ces indicateurs ont été développés dans un but précis, soit de mesurer le niveau de standardisation d'un processus. Ils sont intéressants pour analyser notre processus mais il faut les adapter. En effet, nous cherchons plutôt à valider le fait que notre processus s'inscrit bien dans le système existant du partenaire et qu'il ne compromet pas l'intégrité des autres processus (processus de planification, d'ordonnancement, de suivi de projet et de contrôle des couts par exemple). Les indicateurs de standardisation de Echternach-

Jaubert (2020) peuvent être utilisés en partie pour démontrer le niveau de proximité entre le processus existant et le processus proposé. Le tableau 6.1 présente l'ensemble des indicateurs retenus. Le tableau 6.2 présente les résultats de ces indicateurs.

Tableau 6.1 Indicateurs de similarités adaptés au contexte de notre processus

Catégories	Quoi	Comment	Résultat
Intrants et extrants	Pourcentage de variété des intrants	Données communes utilisées en intrants	Nombre d'intrants en communs/Total des intrants
		Données différentes utilisées en intrants	(Nombre d'intrants apparus – Nombre d'intrants disparus) /Total des intrants
	Pourcentage de variété des extrants	Données différentes utilisées en extrants	(Nombre d'extrants apparus – Nombre d'extrants disparus) /Total des extrants
		Données communes utilisées en extrants	Nombre d'extrants en communs/Total des extrants
Activités	Pourcentage d'activités communes	Activités en commun	Nombre d'activités communes/Total des activités
	Pourcentage d'activités différentes	Activités apparues et activités disparues	(Nombre d'activités apparues – nombre d'activités disparues) /Total des activités

Tableau 6.2 Résultat du pourcentage de similarité

Catégories	Quoi	Éléments communs	Éléments apparus	Éléments disparus	Éléments restants	Total d'éléments	**Résultats %**
Intrants et extrants	Pourcentage d'intrants en commun	21			21	21	**100**
	Pourcentage d'intrants différents		6	0	6	27	**22,2**
	Pourcentage d'extrants en commun	17			17	17	**100**
	Pourcentage d'extrants différents		6	0	6	23	**26,1**
Activités	Pourcentage d'activités communes	23			23	23	**100**
	Pourcentage d'activités différentes		5	4	1	29	**3,4**

Pour ce qui est des intrants et des extrants, on remarque que le processus proposé reprend 100% des intrants et des extrants du processus existant. Dans la mesure où ces intrants et extrants représentent également les entités de notre modèle de données, on peut dire que l'on ne supprime aucune des entités du modèle de données existant. Cela assure que le modèle de données proposé ne compromet pas l'intégrité du modèle existant.

L'adaptation du processus pour qu'il s'intègre au modèle intégré dans cette recherche fait apparaître respectivement 22,2% et 26,1% d'intrants et d'extrants nouveaux. L'introduction de nouvelles entités n'est pas un problème dans le cas où on souhaite respecter l'intégrité du système existant. En effet, ces nouvelles entités ne font qu'apporter de nouvelles informations. De plus, les nouvelles entités introduites peuvent également servir dans d'autres processus de l'ERP du partenaire. Par exemple, les trois paramètres introduits pour tenir compte des contraintes liées aux pièces à long délai de livraison peuvent également servir dans les processus d'ordonnancement et

de suivi de projet. Il en est de même pour les données portant sur la capacité de chacune des ressources : cette entité peut aussi être utilisée dans le processus de suivi de projet afin de vérifier les éventuels dépassements de capacité. Ainsi, les six entités ajoutées dans le modèle de données (qui sont également les intrants et extrants ajoutés dans le processus) ne compromettent en rien l'intégrité du système existant et peuvent même bonifier d'autres processus de l'ERP.

Au niveau des activités, quatre activités du processus existant ont été supprimées dans le nouveau processus. Ces activités sont la définition de la durée et date de fin du lot de travail associé au *Drum*, la planification de ce lot de travail au plus tard, l'estimation de la durée des autres lots et la planification de ces lots. Ces activités sont remplacées par trois nouvelles activités (voir figure 5.4) qui bonifient les activités disparues afin de prendre en compte l'outil de calcul proposé dans notre modèle. Ainsi, la disparition de ces quatre activités ne compromet pas l'intégrité des systèmes de l'ERP. De plus, deux nouvelles activités font leur apparition dans le processus (voir figure 5.3) afin de recueillir les informations nécessaires pour tenir compte des contraintes liées aux pièces à long délai de livraison. L'ajout de ces nouvelles activités ne compromet pas l'intégrité du système car elles ne permettent que le recueil d'informations supplémentaires.

Au niveau du modèle de données, six nouveaux types de données (*Buffer*, *Rope*, Capacité, pièce critique, date de livraison au plus tôt et date de début minimale) sont ajoutés mais aucune donnée du modèle existant n'est supprimée. Cela implique la création de nouvelles tables dans le modèle relationnel de données du partenaire mais aucune suppression de tables ou de liens déjà existant. De plus, on a fait le choix de ne pas inclure les pièces critiques directement dans la nomenclature car l'entité « nomenclature » est reliée à beaucoup d'autres fonctions dans l'ERP du partenaire qu'on ne veut pas compromettre. Ainsi, la modification apportée au modèle de données ne fait qu'ajouter des tables et des liens au modèle existant. Cela assure le fait que l'intégrité du système du partenaire est maintenue.

6.3 Expérimentation

L'outil de calcul proposé est testé sur des instances de projet adaptées de celles proposées par De Boer (1998). Nous avons codé notre outil de calcul sur le logiciel GLPK qui permet de résoudre des problèmes de programmation linéaire. Le code en question est présent dans l'annexe C. Nous testerons d'abord le temps de calcul associé à notre outil afin de connaître son comportement sur

différentes tailles de projets. Nous réalisons également une analyse de sensibilité pour identifier les paramètres importants. Nous cherchons également à étudier le comportement de l'algorithme proposé avec celui du modèle de Cherkaoui (2017) (soit le même modèle mais sans les éléments du DBR et sans la contrainte associée aux pièces à long délai de livraison).

6.3.1 Génération des instances de projet test

Les instances de projet test de De Boer (1998) sont des références pour le problème RCCP.

Ces instances sont subdivisées en classes, chacune est caractérisée par une combinaison différente des paramètres suivants : le nombre de lots de travaux *N*, le nombre de groupes de ressources *K*. Les paramètres *N* et *K* peuvent prendre trois valeurs chacun : *N* = 10, 20 ou 50 et *K* = 3, 10 ou 20. Nous obtenons donc 9 classes. Une instance est générée pour chaque classe. Les instances sont proposées pour un horizon découpé en périodes égales de durée 1.

Notre problème est la variante *resource-driven* du problème RCCP. Cherkaoui (2017) propose une modification des instances de De Boer (1998) afin de les adapter à ce contexte. Il faut d'abord introduire les charges requises Q_{ri} par les lots *i* des groupes de ressources *r* et les capacités des ressources sur les différentes périodes K_{rp}.

La charge maximale Q_{ri}^{max} d'un groupe de ressources *r* qui peut être assignée au lot *i* durant une période *p* est générée selon la loi uniforme discrète sur l'intervalle [1, 20]. De cela, on en déduit la charge maximale du lot *i* sur une période *p* : $Q_i^{max} = \sum_{r \epsilon R} Q_{ri}^{max}$ (26). La charge de travail requise du groupe de ressources *r* par le lot *i* est calculée ainsi : $Q_{ri} = Dmin_i * Q_{ri}^{max}$ (27). $Dmin_i$ étant la durée minimale du lot de travail *i*.

Il faut également s'assurer que les capacités des ressources permettent l'existence d'une solution réalisable. Pour cela, une solution réalisable est construite en lissant l'utilisation des ressources sur tout l'horizon du projet avec le minimum de marge totale pour chaque lot de travail. On en déduit les capacités assurant l'existence d'une solution réalisable à partir de ces utilisations périodiques de ressources. Soit d_{ip} la durée du lot *i* sur la période *p* et d_i la durée totale du lot *i*, l'utilisation périodique des ressources U_{rp} de chaque groupe de ressources r est tel que :

$$U_{rp} = \sum_{i \epsilon I} ((Q_{ri} * d_{ip})/d_i) \qquad (28)$$

La capacité de chaque groupe de ressources *r* sur chaque période *p* est donc $K_{rp} = max_p U_{rp}$ (29).

Enfin, il faut adapter ces instances à notre modèle et donc définir un *Drum*, un *Buffer* et un *Rope* dans chacune des instances. On désigne comme *Drum* la ressource qui a la plus petite capacité K_r. S'il y'a une égalité de capacité entre plusieurs ressources, la ressource avec l'indice le plus petit est choisie. Plusieurs lots de travail peuvent utiliser cette ressource. C'est le lot de travail le plus en amont dans le réseau de prédécesseurs qui est désigné comme DWP. Pour l'analyse du temps de calcul à venir, la valeur du *Buffer* est arbitrairement fixée comme étant d'une durée égale au DWP. La durée du *Rope* est fixée comme étant égale à 150% de la durée du chemin critique formé par les lots de travail avant le DWP. Ces paramètres sont ensuite modifiés dans l'analyse de sensibilité de la section 6.3.3. Pour l'instant, aucun lot de travail avec des pièces à long délai de livraison n'est identifié. Cette contrainte fera l'objet d'une analyse de sensibilité indépendante dans la section 6.3.3.3.

6.3.2 Analyse du temps de calcul

Le premier objectif de cette expérimentation est de vérifier l'évolution du temps de calcul en fonction du nombre de lots de travail et en fonction du nombre de groupes de ressources. Nous avons testé notre modèle sur les instances décrites dans la section 6.3.1, soit 9 instances différentes.

Les tests ont été effectués sur un PC avec un processeur 3.2 GHz Intel Core i7 8700B sous Windows 10 en utilisant le solveur GLPK avec une limite de temps imposée à 20 000 secondes.

Le tableau 6.3 présente les temps CPU sur les différentes instances.

Tableau 6.3 Temps de calcul (en secondes)

	N=10	N=20	N=50
K=3	1.28	4.65	6 856
K=10	1.62	7.89	9 428
K=20	2.08	12.70	13 769

Nous pouvons remarquer que pour les instances avec 50 lots de travail différents, le temps de calcul est très long. Il est donc difficile d'obtenir un résultat dans un temps raisonnable avec un N=50. Nous savons désormais que notre modèle ne peut être utilisé, avec un temps de calcul raisonnable, que pour la planification d'un nombre restreint de lots de travail. En effet, les temps de calcul sur les instances avec 10 ou 20 lots de travail sont tout à fait raisonnables. Il s'agit d'une limite mais Carvalho et al. (2015) précisent que, pour la phase de planification tactique en contexte ETO, le nombre habituel de lots de travail se situe généralement entre 5 et 30. Notre modèle peut donc être utilisé dans la plupart des situations de planification tactique en contexte ETO.

6.3.3 Analyse de sensibilité

Nous allons chercher à connaître l'influence des paramètres du DBR sur la performance de la solution finale (durée du projet) et sur sa robustesse (prise en compte des incertitudes). Tout d'abord, nous savons déjà que pour que la méthode DBR soit intéressante, il faut que le *Drum* soit le plus sévère possible (Thürer et al., 2017). Il reste maintenant à voir comment les deux autres paramètres du DBR (le *Buffer* et le *Rope*) doivent être choisis. Nous allons faire varier les durées de *Rope* et de *Buffer* afin de voir leur influence sur la durée de la solution. Nous allons également voir comme la contrainte associée aux lots de travail avec des pièces à longs délais de livraison influe sur la durée de la solution.

6.3.3.1 Influence de la durée du *Buffer*

Nous cherchons à savoir comment la durée du *Buffer* influe sur la durée totale du projet planifié. Plus précisément, nous voulons analyser si l'augmentation de la durée du *Buffer* augmente d'autant

la durée totale du projet. Pour y arriver, on reprend les mêmes définitions de paramètres que pour l'analyse du temps de calcul sauf pour le *Buffer*. On fait varier cette durée de *Buffer* de 100% à 200% de la durée du lot de travail associé au *Drum* (DWP). Les expérimentations sont réalisées sur les 6 classes d'instances de projets tests ayant un temps de calcul raisonnable (soit N=10 ou 20 et K=3, 10 ou 20).

Pour comprendre comment la variation de la durée du *Buffer* influe sur la durée totale de l'échéancier, nous commençons par réaliser, pour chaque classe d'instance, une expérimentation avec un *Buffer* égal à 0 : on appelle cet échéancier l'*échéancier de référence.* La durée du *Buffer* est ensuite modifiée et on observe l'évolution de la durée totale du projet. Le tableau 6.4 montre les résultats de cette étude. Pour faciliter la compréhension des résultats, nous mettons en place deux indicateurs :

$$i_1 = \frac{durée\ du\ buffer}{durée\ de\ l'échéancier} \times 100 \quad (30)$$

$$i_2 = \frac{durée\ de\ l'échéancier - durée\ de\ l'échéancier\ de\ référence}{durée\ de\ l'échéancier} \times 100 \quad (31)$$

Tableau 6.4 Résultats de l'analyse de sensibilité du *Buffer*

N	K	Durée du *Buffer* (en % de la durée du DWP)	i_1	i_2
10	3	100	9,6	9,2
		150	15,3	14,9
		200	20,5	19,3
	10	100	10,8	10,8
		150	13,8	11,5
		200	19,7	18,4
	20	100	8	7,8
		150	14,9	14,7
		200	19,4	17
20	3	100	4,6	4,6
		150	8,4	7,8
		200	9,7	9
	10	100	4	3,4
		150	8,3	7,6
		200	10,5	10,4
	20	100	4,2	3,8
		150	7,6	7,1
		200	10	9,2

Pour les 6 instances de projet testées, on a $i_1 \geq i_2$ avec en moyenne un écart de 0,7%. Cela signifie que pour tous les *Buffers* testés, la durée rajoutée à l'échéancier est inférieure ou égale à la durée du *Buffer*.

On remarque également que ce constat est le même pour les 6 instances de projet test. Il n'y a pas de véritable influence des paramètres N et K sur la différence entre i_1 et i_2. On constate le même

phénomène lorsque l'on observe les moyennes des différences entre i_1 et i_2 en fonction de la durée du *Buffer* (voir tableau 6.5).

Tableau 6.5 Différence entre i_1 et i_2 en fonction de la durée du *Buffer*

Durée du *Buffer* (en % de la durée du DWP)	$i_1 - i_2$
100	0,3%
150	0,8%
200	1,1%

6.3.3.2 Influence de la durée du *Rope*

Après avoir analysé l'influence de la durée du *Buffer*, nous analysons comment la durée du *Rope* influence la durée de l'échéancier. Pour cela, on reprend les mêmes paramètres que lors de l'analyse du temps de calcul sauf pour le *Buffer* qu'on fixe à 0 et pour le *Rope* dont on fait varier la durée de 100% à 200% de la durée du chemin critique. Les expérimentations sont réalisées sur les 6 classes d'instances de projets tests ayant un temps de calcul raisonnable (soit N=10 ou 20 et K=3, 10 ou 20) et les résultats sont présentés dans le tableau 6.6. Pour faciliter la compréhension des résultats, nous mettons en place deux indicateurs :

$$i_3 = \frac{Durée\ du\ Rope}{Durée\ du\ chemin\ critique\ entre\ le\ début\ du\ projet\ et\ le\ début\ du\ DWP} \times 100 \quad (32)$$

$$i_4 = \frac{Début\ du\ DWP - Début\ du\ projet}{Durée\ du\ chemin\ critique\ entre\ le\ début\ du\ projet\ et\ le\ début\ du\ DWP} \times 100 \quad (33)$$

Tableau 6.6 Résultats de l'analyse de sensibilité du *Rope*

N	K	i_3	i_4
10	3	100	100
		150	150
		200	154
	10	100	100
		150	148
		200	148
	20	100	100
		150	150
		200	174
20	3	100	100
		150	124
		200	124
	10	100	100
		150	139
		200	139
	20	100	100
		150	150
		200	184

On remarque que sur toutes les classes d'instances, le *Rope* ne contraint plus la durée entre le début du projet et le début du DWP lorsque la durée du *Rope* est égale à deux fois la durée du chemin critique. Sur trois classes d'instances, c'est même le cas dès une durée de *Rope* de 1,5 fois la durée du chemin critique. Il n'y a cependant pas réellement de tendance qui se dégage sur les influences ce N et de K par rapport à ce constat.

On sait qu'un choix judicieux de *Drum* permet d'avoir des ressources non-*Drum* avec un grand écart entre l'utilisation de ces ressources et leur capacité. Ainsi, le fait que le *Rope* ne contraigne pas toujours la durée entre le début du projet et le début du DWP montre que le choix du *Drum* a été sévère. Si ce choix de *Drum* est moins sévère, le *Rope* peut permettre d'imposer la durée maximale entre le début du projet et celui du DWP.

6.3.3.3 Influence de la date de début minimale

Dans notre modèle, si un lot de travail est associé à une pièce avec un long délai de livraison alors on peut imposer une date de début minimale pour le lot afin qu'il ne démarre pas avant que cette pièce soit arrivée. Nous allons voir comment cette contrainte influence la durée de la solution. Les expérimentations sont réalisées sur les 6 classes d'instances de projets tests ayant un temps de calcul raisonnable (soit N=10 ou 20 et K=3, 10 ou 20) et les résultats sont présentés dans le tableau 6.7. Les paramètres du DBR sont fixés tels que décrits pour l'analyse du temps de calcul et les échéanciers développés dans cette analyse nous servent d'échéanciers de référence.

Pour analyser l'influence de la contrainte de date de début minimale, on compare, pour chaque instance, l'échéancier de référence avec un échéancier dans lequel on désigne un lot de travail nécessitant une pièce avec long délai de livraison. On fait varier cette date de début minimale afin de voir l'influence de cette contrainte sur la durée du projet.

On désigne aléatoirement un lot de travail nécessitant une pièce avec un long délai de livraison. La date de début minimale est d'abord fixée comme étant égale à la somme des durées minimales des lots de travail situés en amont dans la chaîne de précédence. Si ce lot de travail associé à une pièce critique est le lot *m* alors, cas n°1, on a : $RD_m = Debut + \sum_{i \epsilon Predec_m} Dmin_i$ (34)

Dans le cas n°2, $RD_m = Debut + 1{,}5 * \sum_{i \epsilon Predec_m} Dmin_i$ (35)

Dans le cas n°3, $RD_m = Debut + 2 * \sum_{i \epsilon Predec_m} Dmin_i$ (36)

Ainsi, on veut voir comment une date de début minimale plus ou moins contraignante influence la durée totale du projet. Pour faciliter la compréhension des résultats, nous mettons en place un indicateur :

$$i_5 = \frac{durée\ de\ l'échéancier - durée\ de\ l'échéancierde\ de\ référence}{durée\ de\ l'échéancier} \times 100 \quad (37)$$

Tableau 6.7 Résultats de l'analyse de sensibilité sur la date minimale de début

N	K	Cas	i_5
10	3	Cas nº1	0
		Cas nº2	3,2
		Cas nº3	24,6
	10	Cas nº1	0
		Cas nº2	2,1
		Cas nº3	12,1
	20	Cas nº1	0
		Cas nº2	6
		Cas nº3	8,9
20	3	Cas nº1	0
		Cas nº2	0
		Cas nº3	8,4
	10	Cas nº1	0
		Cas nº2	0
		Cas nº3	15,5
	20	Cas nº1	0
		Cas nº2	0
		Cas nº3	8,5

Tout d'abord, il est intéressant de constater que dans le cas nº1, la contrainte imposée n'en est pas une véritablement. En effet, notre modèle ne permet pas le chevauchement de lots de travail ayant des relations de précédence. La somme des durées minimales des lots de travail situés en amont dans la chaîne de précédence du lot avec une pièce à long délai de livraison ne peut pas représenter une réelle contrainte. Les expérimentations du cas nº1 confirment cela.

Pour le cas nº2, on observe que pour N=20, la contrainte imposée ne change pas la durée de la solution par rapport à l'échéancier de référence. Pour N=10 en revanche, la durée de la solution est légèrement plus importante que dans l'échéancier de référence. On ne remarque pas en revanche de réelle influence de K.

Dans le cas nº3, la durée de la solution est plus grande que dans l'échéancier de référence sans voir une réelle influence de N ou de K.

Il est donc possible de dire qu'identifier un lot avec une pièce avec un long délai de livraison peut amener à une augmentation de la durée totale du projet. Cette augmentation est d'autant plus probable que le nombre de lots de travail est faible. Cependant, la prise en compte de cette contrainte répond à un réel défi dans la planification tactique de projets ETO.

Il reste à comparer la solution développée avec notre modèle avec celle développée avec le modèle de Cherkaoui (2017).

6.3.4 Comparaison avec le modèle de Cherkaoui (2017)

Nous cherchons ici à voir comment se comporte notre modèle par rapport à une pratique courante qui consiste à simplement ajouter une période tampon à la fin d'un projet pour obtenir un plan plus robuste. Pour répondre à cette interrogation, nous avons comparé les résultats obtenus avec notre modèle et les résultats obtenus avec le modèle optimal développé par Cherkaoui (2017). Au vu des résultats obtenus dans la section 6.3.2, nous avons uniquement effectué l'expérimentation sur 6 instances : N=10 ou 20 et K=3, 10 ou 20. Nous cherchons à savoir si le temps supplémentaire dû au *Buffer* est égal ou inférieur à la différence de durée entre les solutions obtenues avec notre modèle et celles obtenues avec le modèle de Cherkaoui (2017). Nous comparons donc la part que représente le *Buffer* dans la solution développée avec notre modèle avec la part que représente la différence de durée entre notre solution et la solution obtenue avec le modèle de Cherkaoui (2017). Les résultats obtenus dans cette étude sont rapportés dans le tableau 6.8.

Tableau 6.8 Résultats de l'étude comparative entre le modèle DBR et le modèle optimal

Paramètres de l'instance	Part du *Buffer* dans la durée totale du projet (en %)	Différence de durée entre la solution obtenue avec notre modèle et la solution obtenue avec le modèle de Cherkaoui (2017)
N=10, K=3	9,3%	9,3%
N=10, K=10	8,8%	7,1%
N=10, K=20	10,2%	8,1%
N=20, K=3	4,7%	3,4%
N=20, K=10	4,6%	3,5%
N=20, K=20	4,1%	2,9%

On observe que, mis à part pour l'instance avec 10 lots de travail et 3 groupes de ressource, la part du *Buffer* dans la durée du projet est toujours supérieure à la différence de durée entre l'échéancier développé avec notre modèle et celui développé avec le modèle de Cherkaoui (2017). L'erreur est toutefois très marginale, surtout pour un plan tactique. Il semble donc que l'utilisation du modèle de base de Cherkaoui (2017), plus simple et plus rapide, soit suffisante si l'objectif du planificateur n'est que de déterminer une date de fin d'un nouveau projet. En revanche, les dates de début et de fin de chaque lot de travail sont inutilisables avec ce modèle car il ne prend pas en compte le positionnement précis du *Buffer* souhaité par le planificateur en amont du goulot principal.

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons validé le fait que deux des éléments de notre modèle intégré de planification (le processus et le modèle de données) étaient cohérents avec l'existant. Nous avons

ensuite expérimenté l'outil de calcul sur un jeu de données afin de vérifier d'abord qu'il pouvait être utilisé pour de la planification tactique de projets ETO réels, mais également pour montrer qu'il était plus intéressant que ce modèle sans les aspects DBR auquel on rajoute un *Buffer* par la suite. Enfin, nous avons établi le fait que l'outil de calcul proposé était particulièrement intéressant si le *Drum* était le plus sévère possible, si le *Buffer* était d'une durée importante et si la durée du *Rope* était inférieure à au plus deux fois la durée du chemin critique pré-DWP. Ces analyses nous permettent de mieux cerner les véritables contributions de ce mémoire. Celles-ci y sont présentées au chapitre suivant en plus des limites et opportunités de recherche possibles.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La revue de littérature a permis de mettre en évidence le fait qu'il n'existait pas de modèle intégré de planification tactique adaptée à un contexte de projet ETO. Cette phase de planification se révèle toutefois cruciale pour les PME œuvrant dans un contexte ETO. En effet, ses entreprises doivent générer rapidement un échéancier agrégé suffisamment réaliste pour pouvoir estimer un coût et une durée globale de projet pour répondre aux interrogations de leurs clients. Nous avons vu que des processus, des outils de calcul et des modèles de données ont été proposés dans la littérature mais de façon indépendante, et donc, non intégrée. De plus, des caractéristiques importantes du contexte ETO ne sont pas prises en compte par ces modèles. Enfin, nous avons également souligné le fait que les projets ETO étaient très souvent menés par des PME. Cela soulève de nouvelles contraintes à prendre à compte et notamment le fait que les PME ne peuvent pas faire appel à des capacités non-régulières aussi facilement que de grands groupes. Face à ses constats, nous avons développé un modèle intégré de planification tactique adaptée à ce contexte.

Pour mener à bien ce projet, nous avons choisi de suivre la méthodologie DRM en nous basant sur l'outil de planification tactique présent dans l'ERP de notre partenaire industriel. Cela nous a permis d'ancrer notre proposition sur un modèle existant de planification de la production. Nous avons également validé le fait que le processus et le modèle de données proposés étaient cohérents avec ce qui existe déjà chez notre partenaire industriel. En construisant un modèle intégré composé d'un processus d'affaires, d'un modèle de données et d'un outil de calcul adaptés aux caractéristiques des projets ETO et prenant en compte les incertitudes, nous avons rempli en bonne partie nos trois objectifs spécifiques de recherche. Cependant, l'absence d'expérimentation sur des données de véritables projets ETO constitue une limite à la satisfaction pleine et entière de ces objectifs.

D'un point de vue théorique, ce mémoire contribue à éclaircir les contraintes et enjeux de la planification tactique de projets ETO menés par des PME. Ce domaine est en effet très peu traité dans la littérature et ses contraintes ne sont souvent pas prises en compte lorsque des modèles sont développés. De plus, dans ce mémoire, la méthode DBR est appliquée dans un contexte de planification tactique ce qui n'est pas présent dans la littérature. L'application de cette méthode permet de prendre en compte les contraintes caractéristiques du contexte ETO et apporte un nouvel éclairage sur la façon d'aborder la planification tactique. Une autre contribution de ce mémoire est

la proposition de modèle de planification tactique comprenant à la fois un processus, un modèle de données et un outil de calcul cohérents entre eux.

D'un point de vue plus pratique, nous avons proposé une approche de planification directement applicable dans l'ERP de notre partenaire industriel. En effet, nous avons validé le fait que le processus et le modèle de données supportant l'outil de calcul proposé respectaient bien l'architecture déjà en place dans l'ERP et ne compromettaient pas son fonctionnement général. En ayant pris en compte des contraintes qui n'étaient pas auparavant traitées en en ayant proposé un outil de calcul permettant d'obtenir une solution optimale, ce mémoire contribue à fournir une approche correspondant mieux aux besoins des clients de notre partenaire industriel. De façon plus large, ce mémoire propose un modèle intégré de planification tactique correspondant mieux aux besoins et caractéristiques des PME travaillant dans un contexte ETO. En effet, les contraintes de prise en compte des incertitudes, des pièces à longs délais de livraison et de non-dépassement des capacités des ressources sont traitées.

Notre étude comporte aussi des limites. Sa plus grande faiblesse est que dans la construction de notre modèle de planification tactique, nous avons cherché à réutiliser au mieux à ce qui existe déjà chez notre partenaire industriel. Si cela représente un avantage de reprendre les approches utilisées notre modèle aujourd'hui en entreprise, c'est un désavantage dans l'application des bonnes pratiques de planification de projet ETO. En effet, notre partenaire industriel propose un ERP qui planifie des projets avec des façons de faire qui ne sont pas forcément conformes aux pratiques recommandées en gestion de projet. Par exemple, il est recommandé de découper le projet en phases dont la fin est symbolisée par un jalon. Cela permet d'effectuer un suivi d'avancement de projet. Or, cette notion n'est pas présente dans la planification tactique de l'ERP de notre partenaire industriel. De plus, la méthodologie de validation est également une faiblesse dans l'étude. En effet, en n'ayant pas pu avoir accès à des données réelles de PME travaillant sur des projets ETO, nous avons dû expérimenter notre approche sur des données tests. Nous avons pu vérifier le fonctionnement de l'outil de calcul proposé, mais des données réelles auraient sûrement permis d'évaluer quantitativement les gains potentiels amenés par notre approche.

Des perspectives de recherche découlent de ce mémoire. Tout d'abord, il pourrait être intéressant de développer un véritable modèle stochastique qui prendrait en compte les incertitudes. En effet, dans notre modèle, la prise en compte des incertitudes se fait par l'ajout simple d'un *Buffer* comme

élément de robustesse. De plus, nous avons traité ici de la planification tactique de projets ETO menés par des PME. Cependant, les caractéristiques de ce contexte influencent également les choix à faire dans les méthodes d'ordonnancement des activités. Ainsi, il serait intéressant de travailler également sur des façons d'ordonnancer de manière plus détaillée chaque activité une fois l'offre acceptée par le client. La prise en compte des décisions précédentes découlant de la planification initiale et la présence d'incertitudes liées aux demandes de changement, très courantes en contexte ETO, demeurent des enjeux non traités. Enfin, il serait également intéressant d'étudier comment les technologies de l'industrie 4.0 peuvent enrichir notre modèle. Par exemple, l'accès à l'information d'anciens projets associés à de l'intelligence artificielle pourrait permettre de dimensionner au mieux le *Buffer* grâce à l'historique des projets menés par l'entreprise.

En conclusion, cette approche est un premier élément d'un ensemble d'outils à développer pour améliorer la qualité de la planification de projets ETO menés par des PME.

RÉFÉRENCES

AACE International recommended practice No. 27R-03 Schedule classification system (2010).

AACE International, I. (2020). AACE International recommended practice No. 18R-97, Cost estimate classification system - as applied in engineering, procurement, and construction for the process industries.

Alfieri, A., Tolio, T., & Urgo, M. (2011). A two-stage stochastic programming project scheduling approach to production planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62*(1-4), 279-290. doi:10.1007/s00170-011-3794-4

Alfieri, A., Tolio, T., & Urgo, M. (2012). A two-stage stochastic programming project scheduling approach to production planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62*(1-4), 279-290. doi:10.1007/s00170-011-3794-4

Amaro, G., Hendry, L., & Kingsman, B. (1999). Competitive advantage, customisation and a new taxonomy for non make-to-stock companies. *International Journal of Operations & Production Management, 19*(4), 349-371. doi:10.1108/01443579910254213

Azimi, R., Lee, S., AbouRizk, S. M., & Alvanchi, A. (2011). A framework for an automated and integrated project monitoring and control system for steel fabrication projects. *Automation in Construction, 20*(1), 88-97. doi:10.1016/j.autcon.2010.07.001

Baydoun, G., Haït, A., Pellerin, R., Clément, B., & Bouvignies, G. (2016). A rough-cut capacity planning model with overlapping. *OR Spectrum, 38*(2), 335-364. doi:10.1007/s00291-016-0436-0

Bertrand, J. W. M., & Muntslag, D. R. (1993). Production control in engineer-to-order firms. *International Journal of Production Economics, 30-31*, 3-22. doi:10.1016/0925-5273(93)90077-x

Blessing, L. T., & Chakrabarti, A. (2009). *DRM: A Design Reseach Methodology*.

Caron, F., & Fiore, A. (1995). 'Engineer to order' companies: how to integrate manufacturing and innovative processes. *International Journal of Project Management, 13*(5), 313-319. doi:10.1016/0263-7863(95)00023-j

Carvalho, A. N., Oliveira, F., & Scavarda, L. F. (2015). Tactical capacity planning in a real-world ETO industry case: An action research. *International Journal of Production Economics, 167*, 187-203. doi:10.1016/j.ijpe.2015.05.032

Carvalho, A. N., Oliveira, F., & Scavarda, L. F. (2016). Tactical capacity planning in a real-world ETO industry case: A robust optimization approach. *International Journal of Production Economics, 180*, 158-171. doi:10.1016/j.ijpe.2016.07.019

Chauvigné, A., Kalev, A., & Colin, J. (2011). *Flexibilité de la méthode Drum-Buffer-Rope dans des contextes variés d'entreprises, retour d'expériences*. Communication présentée à 9e Congrès International de Génie Industriel (CIGI), Saint-Sauveur, Québec, CANADA.

Chen, S.-M., Griffis, F. H., Chen, P.-H., & Chang, L.-M. (2013). A framework for an automated and integrated project scheduling and management system. *Automation in Construction, 35*, 89-110. doi:10.1016/j.autcon.2013.04.002

Cherkaoui, K. (2017). *Planification tactique des grands projets d'ingénierie et de construction.* (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal).

Clark, K. B., & Wheelwright, S. C. (1992). Organizing and Leading “Heavyweight” Development Teams. *California Management Review, 34*(3), 9-28. doi:10.2307/41167421

Cooper, R. G., & Kleinschmidt, E. J. (1995). Benchmarking the Firm's Critical Success Factors in New Product Development. *Journal of Product Innovation Management, 12*(5), 374-391. doi:10.1111/1540-5885.1250374

Crawford, C. M., & Di Benedetto, A. (2006). *New Products Management* (8e éd.).

De Boer, R. (1998). *Resource-constrained multi-project management, a hierarchical decision support system.* (Ph. D. thesis, University Of Twente, The Netherlands).

De Leon, G. P. (2011). *Scheduling a Project at Different Levels*. Communication présentée à PMICOS 8th Annual Scheduling Conference, San Francisco, CA.

Dobrev, M., Gocheva, D., & Batchkova, I. (2008). *An ontological approach for planning and scheduling in primary steel production*. Communication présentée à 2008 4th International IEEE Conference Intelligent Systems.

Echternach-Jaubert, M. (2020). *Processus de gestion des litiges dans l'industrie de la construction.* (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal).

Elfving, J. A. (2003). *Exploration of opportunities to reduce lead times for engineered-to-order products.* (University of California, Berkeley).

Elmaghraby, S. E. (2002). *Contribution to the round table discussion on new challenges in project scheduling.* Communication présentée à PMS Conference, Valencia, Espagne.

Gademann, N., & Schutten, M. (2005). Linear-programming-based heuristics for project capacity planning. *IIE Transactions, 37*(2), 153-165. doi:10.1080/07408170590885611

Goldratt, E. M., & Cox, J. (1984). *The goal : Excellence in manufacturing*.

Golmohammadi, D. (2015). A study of scheduling under the theory of constraints. *International Journal of Production Economics, 165*, 38-50. doi:10.1016/j.ijpe.2015.03.015

Gosling, J., & Naim, M. M. (2009). Engineer-to-order supply chain management: A literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics, 122*(2), 741-754. doi:10.1016/j.ijpe.2009.07.002

Haït, A., & Baydoun, G. (2012). *A new event-based MILP model for the resource-constrained project scheduling problem with variable intensity activity (RCPSVP*. Communication présentée à IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong.

Hajjar, D., & AbouRizk, S. M. (2002). Unified Modeling Methodology for Construction Simulation. *Journal of Construction Engineering and Management, 128*(2), 174-185. doi:10.1061/(asce)0733-9364(2002)128:2(174)

Hans, E. W. (2001). *Resource loading by branch-and-price techniques.* (University of Twente, The Netherlands).

Hicks, C., McGovern, T., & Earl, C. F. (2000). Supply chain management: A strategic issue in engineer to order manufacturing. *International Journal of Production Economics, 65*(2), 179-190. doi:10.1016/s0925-5273(99)00026-2

Kettinger, W. J., Teng, J. T. C., & Guha, S. (1997). Business Process Change: A Study of Methodologies, Techniques, and Tools. *MIS Quarterly, 21*(1). doi:10.2307/249742

Kis, T. (2005). A branch-and-cut algorithm for scheduling of projects with variable-intensity activities. *Mathematical Programming, 103*(3), 515-539. doi:10.1007/s10107-004-0551-6

Kis, T. (2006). *RCPS with Variable Intensity Activities and Feeding Precedence Constraints* (vol. 92).

Koen, P., Ajamian, G., Burkart, R., Clamen, A., Davidson, J., D'Amore, R., . . . Wagner, K. (2001). Providing Clarity and A Common Language to the "Fuzzy Front End". *Research-Technology Management, 44*(2), 46-55. doi:10.1080/08956308.2001.11671418

Konijnendijk, P. A. (1994). Coordinating marketing and manufacturing in ETO companies. *International Journal of Production Economics, 37*(1), 19-26. doi:10.1016/0925-5273(94)90004-3

Lemieux, A.-A. (2013). *Méthodologie de transformation leagile en développement de produits pour l'industrie du luxe.* (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal).

Masmoudi, M. (2011). *Tactical and operational project planning under uncertainties: application to helicopter maintenance.* (Ph. D. thesis, Université de Toulouse, France).

Metaxiotis, K. S., Psarras, J. E., & Ergazakis, K. A. (2003). Production scheduling in ERP systems. *Business Process Management Journal, 9*(2), 221-247. doi:10.1108/14637150310468416

Naber, A., & Kolisch, R. (2014). MIP models for resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles. *European Journal of Operational Research, 239*(2), 335-348. doi:10.1016/j.ejor.2014.05.036

Neumann, K., Schwindt, C., & Zimmermann, J. (2003). *Project scheduling with time windows and scarce resources: temporal and resource-constrained project scheduling with regular and nonregular objective functions* (2e éd.).

Pandit, A., & Zhu, Y. (2007). An ontology-based approach to support decision-making for the design of ETO (Engineer-To-Order) products. *Automation in Construction, 16*(6), 759-770. doi:10.1016/j.autcon.2007.02.003

Pinedo, M. (2005). *Planning and scheduling in manufacturing*. Springer (New York).

Poba-Nzaou, P., & Raymond, L. (2011). Managing Erp System Risk in SMEs: A Multiple Case Study. *Journal of Information Technology, 26*(3), 170-192. doi:10.1057/jit.2010.34

Porter, K., Little, D., Peck, M., & Rollins, R. (1999). Manufacturing classifications: relationships with production control systems. *Integrated Manufacturing Systems, 10*(4), 189-199. doi:10.1108/09576069910280431

Speranza, M. G., & Vercellis, C. (1993). Hierarchical models for multi-project planning and scheduling. *European Journal of Operational Research, 64*(2), 312-325. doi:10.1016/0377-2217(93)90185-p

Strandhagen, J. W., Vallandingham, L. R., Alfnes, E., & Strandhagen, J. O. (2018). Operationalizing lean principles for lead time reduction in engineer-to-order (ETO) operations: A case study. *IFAC-PapersOnLine, 51*(11), 128-133.

Thürer, M., Stevenson, M., Silva, C., & Qu, T. (2017). Drum-buffer-rope and workload control in High-variety flow and job shops with bottlenecks: An assessment by simulation. *International Journal of Production Economics, 188*, 116-127. doi:10.1016/j.ijpe.2017.03.025

Tscheschner, W. (2006). Transformation from EPC to BPMN. *Business Process Technology, 1*(3), 7-21.

Van der Weijde, G. A. (2008). *Front End Loading in the Oil and Gas Industry.* (Ph. D. Thesis, Delft University of Technology).

Wikner, J., & Rudberg, M. (2005). Integrating production and engineering perspectives on the customer order decoupling point. *International Journal of Operations & Production Management, 25*(7), 623-641. doi:10.1108/01443570510605072

Wullink, G. (2005). *Resource loading under uncertainty*. (Ph. D. thesis, University of Twente, The Netherlands).

Wullink, G., Gademann, A. J. R. M., Hans, E. W., & van Harten, A. (2004). Scenario-based approach for flexible resource loading under uncertainty. *International Journal of Production Research, 42*(24), 5079-5098. doi:10.1080/00207540001733887

ANNEXE A PROCESSUS D'AFFAIRES DE PLANIFICATION TACTIQUE EXISTANT

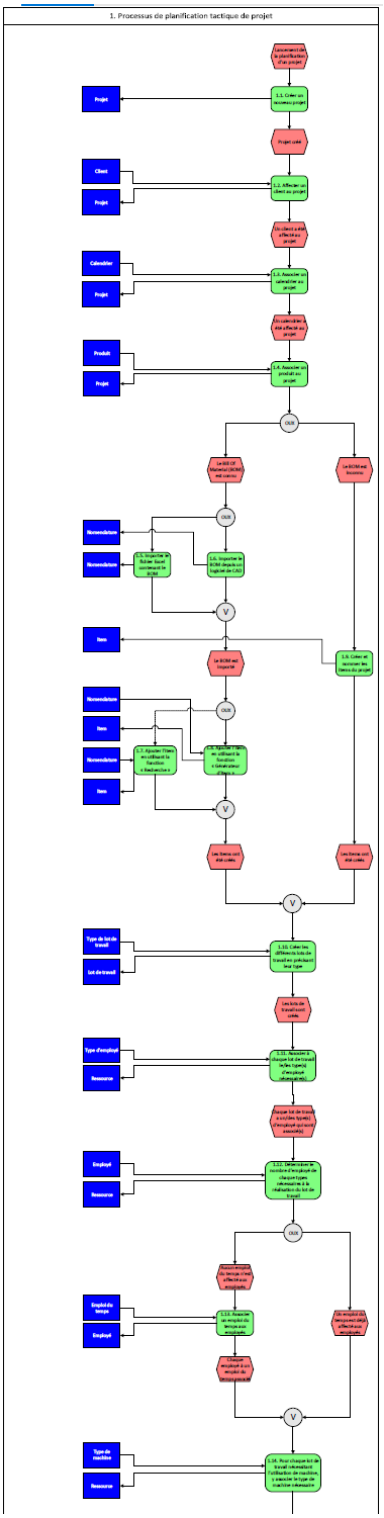

Figure A.1 Processus d'affaires de planification tactique existant

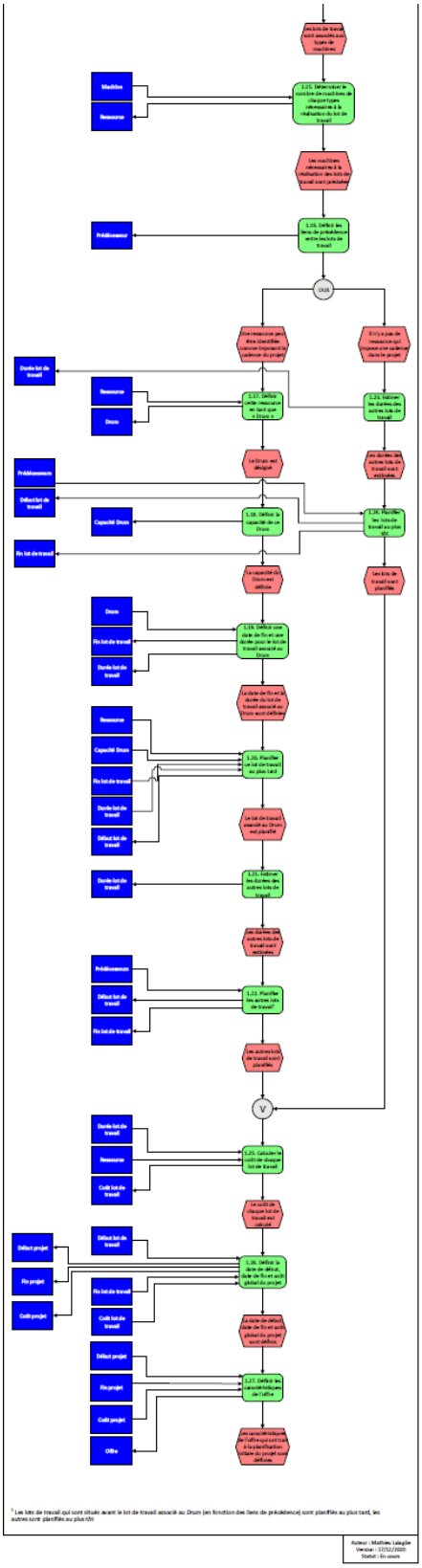

Figure A.2 Processus d'affaires de planification tactique existant (suite et fin)

ANNEXE B PROCESSUS D'AFFAIRES DE PLANIFICATION TACTIQUE MODIFIÉ

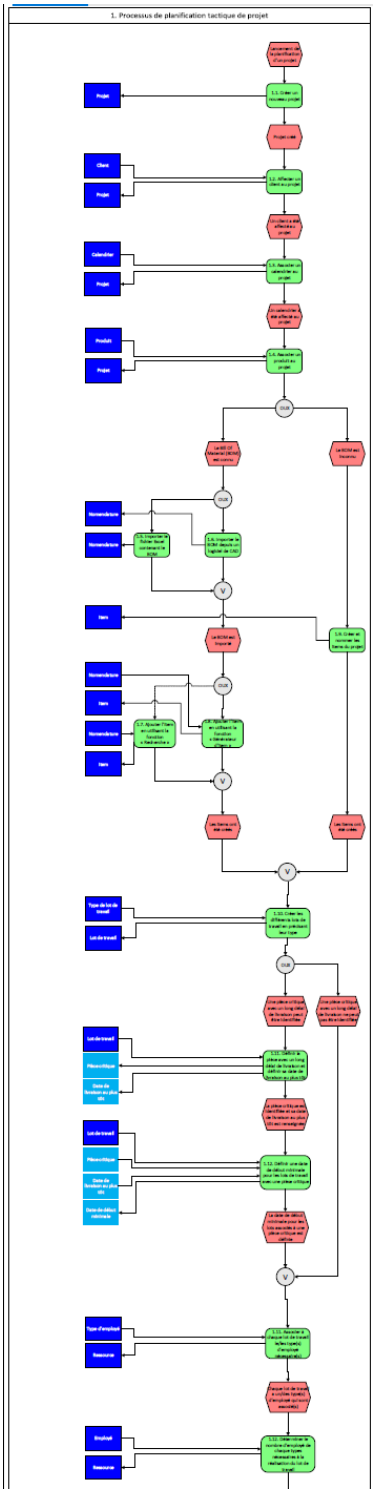

Figure B.1 Processus d'affaires de planification tactique modifié

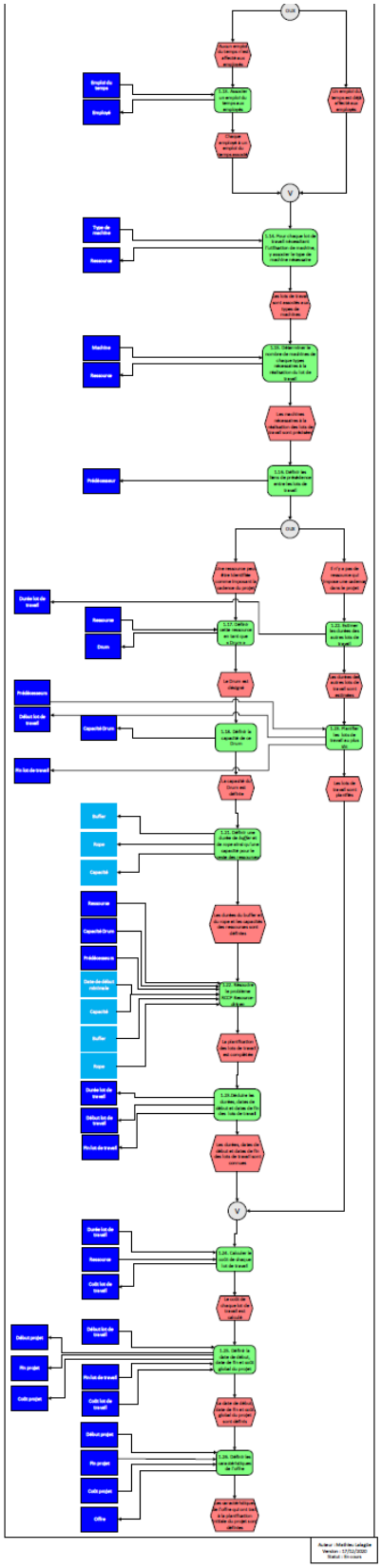

Figure B.2 Processus d'affaires de planification tactique modifié (suite et fin)

ANNEXE C CODAGE DE L'OUTIL DE CALCUL

```
set I; #set of WP
set J; #set of WP before DWP
set T; #set of time unit
set P; #set of period
set Predec within I cross I;
set P1; #set of period moins la dernière
set R; #set of resource


param Horizon; #Planning Horizon
param Periode{P}; #durée période p
param Chargeope{R,I}; #Charge de travail requise du type de ressource R pour executer le lot I
param Charge{I};#Charge de travail totale requise pour executer le lot I
param Chargemax{I};#Charge de travail max associé à un lot i durant une période
param Chargemin{I};# Charge de travail min associé à un lot i durant une période
param Debut_lot{I};# Date à partir de laquelle le lot i peut être exécuté
param Capa_RP{R,P};#Capacité de la ressource R au cours de la période P
param Buffer;
param Rope;
param DWP;


var tx{i in I};
var tf{i in I};
var wf{i in I, t in T}, binary;
var xx{i in I, p in P}, binary;
var xf{i in I, p in P}, binary;
var d{i in I, p in P}>=0,<=Periode[p];
var intens{i in I, p in P} >=0,<=1;
var q{r in R, p in P}>=0;
var Fin;
var Debut;



#Fonction objectif
minimize objective : Fin;


#Contraintes déterminant les dates de début et de fin des lots dans les périodes
const1{i in I, p in P}: tx[i]>= sum{k in 1..p} Periode[k]*(1-xx[i,p]);
const2{i in I, p in P}: tx[i]<= (sum{k in 1..p} Periode[k])+(Horizon-(sum{k in 1..p} Periode[k]))*(1-xx[i,p]);
const3{i in I,p in P1}:xx[i,p+1]>=xx[i,p];
const4{i in I, p in P}: tf[i]>= sum{k in 1..p} Periode[k]*(1- xf[i,p]);
const5{i in I, p in P}: tf[i]<= (sum{k in 1..p} Periode[k])+(Horizon-(sum{k in 1..p} Periode[k]))*(1-xf[i,p]);
const6{i in I,p in P1}:xf[i,p+1]>=xf[i,p];


#Contraintes segmentant la charge de travail des lots dans les périodes
const7{i in I, p in P1}: d[i,p+1]<= Periode[p+1]*(xx[i,p+1]-xf[i,p]);
const8{i in I, p in P1}: d[i,p+1]>=Periode[p+1]*(xx[i,p]-xf[i,p+1]);
const9{i in I, p in P1}: d[i,p+1]>= tf[i] - (sum{k in 1..p+1} Periode[k]+Periode[p+1]*xx[i,p]-Horizon*(1-xf[i,p+1]));
const10{i in I, p in P1}: d[i,p+1]>= (sum{k in 1..p+1} Periode[k]*(1-xx[i,p])-tx[i]-Periode[p+1]*xf[i,p+1]);
const11{i in I}:(sum{p in P} d[i,p])=tf[i]-tx[i];



#Contraintes de temps et de relations de précédence
const12{i in I}: tx[i]>=Debut_lot[i];
const13{(i,j) in Predec}: tx[i]>=tf[j];
const14{i in I}: Fin>=tf[i];



#contraintes de capacité
const15{i in I, p in P}:intens[i,p]*(sum{r in R} Chargeope[r,i])<= Chargemax[i]*d[i,p];
const16{i in I, p in P}: intens[i,p]*(sum{r in R} Chargeope[r,i])>=Chargemin[i]*d[i,p];
const17{i in I}: sum{p in P} intens[i,p]=1;
const18{r in R, p in P}: q[r,p]=sum{i in I} intens[i,p]*Chargeope[r,i];
const19{r in R, p in P}: q[r,p]<=Capa_RP[r,p];

#contraintes liées au Rope et au Buffer
const20{j in J}: tf[j]<=(tx[DWP]-Buffer);
const21{i in I}: (tx[DWP]-Debut)<=Rope;
const22{i in I}: tx[i]>=Debut;




solve;
display wf,xx, xf, tx,tf,d,Periode,Predec,intens,q,Debut,Fin;

end;
```

Figure C.1 Codage de l'outil de calcul