

**Titre:** Cadre généralisé de planification tactique de projets de remise à niveau de navires  
Title: Generalized framework for ship project scheduling

**Auteur:** Romain Galmard  
Author:

**Date:** 2021

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Galmard, R. (2021). Cadre généralisé de planification tactique de projets de remise à niveau de navires [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/6288/>

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/6288/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Robert Pellerin, & Issmaïl El Hallouci  
Advisors:

**Programme:** Maîtrise recherche en génie industriel  
Program:

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l’Université de Montréal

**Cadre généralisé de planification tactique de projets de remise à niveau de  
navires**

**ROMAIN GALMARD**

Département de mathématiques et de génie industriel

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

Génie industriel

Avril 2021

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l’Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

## **Cadre généralisé de planification tactique de projets de remise à niveau de navires**

présenté par **Romain GALMARD**

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

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

**François SOUMIS**, président

**Robert PELLERIN**, membre et directeur de recherche

**Issmaïl EL HALLAOUI**, membre et codirecteur de recherche

**Claver DIALLO**, membre

## DÉDICACE

*A mes parents,*

*pour la bienveillance et l'accompagnement sans faille qu'ils ont su m'accorder depuis toujours.*

*A mes frères,*

*qu'ils trouvent dans ce travail l'expression de mon attachement infini.*

## **REMERCIEMENTS**

L’aboutissement de ce mémoire est le fruit de collaboration et de soutien de la part de nombreuses personnes. Je souhaite premièrement remercier mon directeur de recherche, Robert Pellerin, pour son encadrement professionnel, sa disponibilité et la confiance qu’il a su m’accorder.

Il me paraît également important de souligner l’intérêt porté par les professeurs François Soumis et Issmail Elhallaoui à mes travaux de recherche en me prodiguant de précieux conseils.

Je tiens à remercier le coordinateur de projet ainsi que l’ensemble de l’équipe du partenaire industriel pour leur accueil chaleureux et la grande autonomie qu’ils ont su m’allouer tout au long ce projet.

Merci à Etienne, Louis, Hugo et Vincent pour tous les moments partagés au cours de notre expérience au Canada, même si celle-ci a été écourtée par la pandémie de Covid-19.

Je veux remercier mes parents de m’avoir encouragé et soutenu dans mon choix de continuer mes études supérieures en Amérique du Nord puis de m’avoir permis de revenir m’installer dans la maison familiale tout au long de cette période difficile où ma poursuite d’étude à l’étranger était compromise.

Je tiens à adresser un remerciement à mes frères Brice et Loric et mes amis proches Tom, Lucas, Martin et Loic pour tous ses moments passés en montagne me permettant de me déconnecter un instant de mes études au profit d’un grand bol d’air frais et d’adrénaline.

Enfin, je veux remercier Marion et Fanny pour les super raclettes et autres souvenirs toujours partagés dans la bonne humeur.

## RÉSUMÉ

Pour assurer une activité économique rentable, les chantiers navals sont des entreprises qui sont en mesure de traiter des projets de maintenance de navires de complexités différentes. L'un des enjeux de ce secteur est de pouvoir effectuer une étape de planification agrégée tôt dans le projet afin d'avoir une gestion efficace des ressources et d'éviter l'apparition de retards. Ces plans initiaux générés rapidement sont également utiles lors de l'élaboration de propositions en réponse à des appels d'offres.

Cependant, le manque d'informations disponibles lors des phases de négociation induit des incertitudes sur la portée et les charges de travail des projets. Le contenu détaillé des activités n'est bien souvent connu qu'à l'inspection des navires. De plus, la diversité des clients, militaires et commerciaux, implique des contextes d'exécution et des objectifs recherchés différents.

Malgré quelques recherches existantes sur les outils de planification tactique, aucun d'entre eux ne permet d'incorporer toutes les spécificités des situations pouvant être rencontrées dans ce secteur. L'objectif de ce mémoire est de développer un cadre généralisé de planification tactique adapté à la grande variabilité des projets de cette industrie. Un processus de planification tactique, un modèle de données et un outil de calcul générant des échéanciers adaptatifs en fonction d'objectifs spécifiques sont les trois éléments développés dans cette proposition.

Après confirmation de la problématique à l'aide de la revue de littérature, la méthodologie de recherche pour développer le processus et le modèle de données repose sur l'analyse et la combinaison des processus d'affaires existants d'un chantier naval militaire, d'un chantier naval commercial et d'une description identifiée dans la littérature. Afin d'incorporer l'ensemble des bonnes techniques de gestion de projets, un guide provenant d'une organisation internationale spécifiant les bonnes méthodes à adopter a également été utilisée.

L'outil de calcul développé est un modèle exact de programmation linéaire permettant de choisir les objectifs à atteindre en affectant certains niveaux à des coefficients. Une expérimentation est menée afin d'étudier le comportement de l'outil. Les temps de calculs enregistrés sont inférieurs à 25 minutes pour un projet comportant 50 lots de travaux et 20 groupes de ressources distincts malgré des variations plus ou moins importantes en fonction des objectifs recherchés. Enfin, une considération des incertitudes est proposée à l'aide d'une stratégie de conservation des ressources disponibles lors des résolutions afin d'améliorer la robustesse des solutions générées.

## ABSTRACT

To ensure a profitable economic activity, shipyards must handle ship maintenance projects of varying complexities. One of the challenges of this sector is performing an early aggregate planning step during the project to ensure efficient resource management and avoid delays. These rapidly generated initial plans are also useful when developing proposals in response to tenders.

However, the lack of information available during negotiation phases leads to uncertainties on projects' scope and workloads. The explicit content of activities is often only known once the vessels have been inspected. Also, the diversity of both military and commercial clients implies different execution contexts and desired objectives.

Despite some existing research on tactical planning tools, none of them allows incorporating all the specificities of situations that can be encountered in this sector. This thesis aims to develop a generalized tactical planning framework adapted to high variability projects of this industry. A tactical planning process, data model, and calculation tool that generates adaptive timelines based on specific objectives are the three elements developed in this proposal.

After confirmation of the issue using the literature review, the research methodology to develop the process and data model is based on the analysis and combination of a military shipyard's existing business processes, a commercial shipyard, and a description identified in the literature. To be sure to incorporate all the advised project management techniques, an international review specifying the right methods to adopt was also used.

The calculation tool developed is a linear programming exact model allowing to define the objectives to be sought by assigning certain levels to coefficients. An experiment is conducted to study the tool's viability and behavior according to levels of importance allocated to each objective. The calculation times recorded are less than 25 minutes for a project with 50 work packages and 20 distinct resource groups, despite varying degrees of variation depending on the objectives sought. Finally, a consideration of uncertainties is proposed using a strategy associated with conserving part of the resources available during resolutions to improve the robustness of the solutions generated.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE .....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ .....	V
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX .....	X
LISTE DES FIGURES .....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XV
LISTE DES ANNEXES .....	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
2.1    Introduction .....	3
2.2    Définition d'un projet de remise à niveau de navires .....	3
2.3    Processus et bonnes méthodes à suivre au cours de l'exécution d'un projet de remise à niveau de navires .....	7
2.3.1    Description et segmentation d'un projet de maintenance de navires .....	7
Grandes phases d'un projet de remise à niveau de navires.....	10
2.3.2    Analyse des processus à suivre au cours d'un projet de remise à niveau de navires.	10
2.4    Méthodes de planification tactique de grands projets .....	12
2.4.1    Niveaux hiérarchiques de planification de projet .....	12
2.4.2    Le niveau tactique et ses enjeux.....	14
2.5    Méthodes de planification de projets de maintenance de navires.....	18
2.6    Analyse critique de la littérature.....	19

2.7 Conclusion .....	20
<b>CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE .....</b>	<b>21</b>
3.1 Objectifs de recherche .....	21
3.2 Démarche de recherche .....	22
3.2.1 Méthodologie utilisée pour l'établissement d'un nouveau processus d'affaires .....	22
3.2.2 Méthodologie utilisée pour le développement d'un modèle de calcul RCCP .....	23
3.3 Conclusion .....	24
<b>CHAPITRE 4 PROPOSITION D'UN NOUVEAU CADRE .....</b>	<b>25</b>
4.1 Introduction .....	25
4.2 Analyse des processus d'affaires existants.....	25
4.2.1 Processus d'affaires d'un chantier naval identifiés dans la littérature .....	25
4.2.2 Processus d'affaires dans un chantier naval militaire .....	28
4.2.3 Processus d'affaires dans un chantier naval commercial .....	33
4.3 Processus d'affaires selon l'AACE.....	38
4.4 Nouvelle proposition de processus d'affaires unifiée .....	45
4.4.1 Modélisation BPMN .....	45
4.4.2 Description.....	45
4.4.3 Description des données d'entrées et de sorties pour chaque activité ou sous-processus de planification .....	48
4.4.4 Modèle de données.....	50
4.4.5 Validation par un comité d'expert.....	51
4.5 Conclusion .....	51
<b>CHAPITRE 5 PROPOSITION DE MODÈLE DE PLANIFICATION AGRÉGÉ .....</b>	<b>52</b>
5.1 Introduction .....	52
5.2 Proposition.....	52

5.2.1	Modèle RCCP utilisé.....	52
5.2.2	Modèle RCPSP utilisé.....	57
5.2.3	Nouvelle proposition .....	60
5.3	Conclusion .....	62
<b>CHAPITRE 6 EXPÉRIMENTATION.....</b>		63
6.1	Introduction .....	63
6.2	Génération d'instances de projets .....	63
6.3	Expérimentation.....	66
6.3.1	Analyse du temps de calcul .....	66
6.3.2	Analyse de sensibilité.....	69
6.3.3	Prise en compte de la robustesse.....	75
6.4	Conclusion .....	80
<b>CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....</b>		81
<b>RÉFÉRENCES.....</b>		83
<b>ANNEXES .....</b>		86

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Activités de maintenance traditionnelle par type de navires .....	4
Tableau 6.1 Temps de calcul (en secondes) pour l'objectif de date de fin de projet .....	67
Tableau 6.2 Temps de calcul (en secondes) avec le modèle Cherkaoui (2017) .....	67
Tableau 6.3 Temps de calcul (en secondes) pour l'objectif de priorité .....	68
Tableau 6.4 Temps de calcul (en secondes) pour l'objectif simultané de makespan et de priorité	68
Tableau 6.5 Temps de calcul (en secondes) pour l'objectif simultané de makespan et de coût ....	69
Tableau 6.6 Temps de calcul (en secondes) pour l'objectif simultané de priorité et de coût .....	69
Tableau E.1 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase de définition d'un projet .....	90
Tableau E.1 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase de définition d'un projet (suite et fin) .....	91
Tableau E.2 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase d'ordonnancement d'un projet.....	92
Tableau E.2 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase d'ordonnancement d'un projet (suite) .....	93
Tableau E.2 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase d'ordonnancement d'un projet (suite et fin) .....	94
Tableau E.3 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase d'estimation de coût d'un projet .....	95
Tableau E.3 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase d'estimation de coût d'un projet (suite et fin).....	96
Tableau E.4 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase de planification des ressources d'un projet.....	97
Tableau E.4 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase de planification des ressources d'un projet (suite et fin).....	98

Tableau E.5 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de l’analyse de la valeur d’un projet .....	99
Tableau 5 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de l’analyse de la valeur d’un projet (suite et fin).....	100
Tableau E.6 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de gestion des risques d’un projet .....	101
Tableau E.6 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de gestion des risques d’un projet (suite et fin) .....	102
Tableau E.7 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase d’approvisionnement d’un projet .....	103

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.2 Exemple de réseau de WPs pour un projet de construction ou d'aéronautique.....	5
Figure 2.3 Exemple d'un réseau de WPs pour un projet de remise à niveau de navires.....	5
Figure 2.4 WBS des composants.....	7
Figure 2.5 WBS des procédures.....	8
Figure 2.6 Exemple de procédure .....	8
Figure 2.7 WBS des zones de travail et des ressources d'un chantier naval .....	9
Figure 2.8 Répartition des lots de travail aux différentes sections d'un chantier naval .....	9
Figure 2.9 Grandes phases d'un projet de remise à niveau selon De Boer et al. (1997) .....	10
Figure 2.10 Hiérarchisation des niveaux de planification .....	12
Figure 2.11 Planification tactique vs ordonnancement .....	13
Figure 4.1 Données d'entrées et sorties des activités de planification identifiée dans la littérature .....	27
Figure 4.2 Diagramme d'entités relations pour la gestion des activités de planification d'un chantier naval identifiées dans la littérature .....	28
Figure 4.3 Données d'entrées et sorties de chaque activité ou sous-processus de planification pour le contexte militaire .....	31
Figure 4.4 Diagramme d'entités relations pour la gestion des activités de planification d'un chantier naval militaire.....	32
Figure 4.5 Données d'entrées et de sorties de chaque activité ou sous-processus de planification pour le contexte commercial .....	36
Figure 4.6 Diagramme d'entités relations pour la gestion des activités de planification d'un chantier naval commercial.....	37
Figure 4.7 Carte des processus pour la gestion stratégique des actifs.....	38
Figure 4.8 Processus pour la définition d'un projet.....	39
Figure 4.9 Carte des processus pour l'ordonnancement d'un projet .....	40

Figure 4.10 Carte des processus pour l'estimation des coûts d'un projet.....	41
Figure 4.11 Carte des processus pour la planification des ressources d'un projet .....	42
Figure 4.12 Carte des processus pour l'analyse de la valeur d'un projet .....	42
Figure 4.13 Carte des processus pour l'analyse des risques d'un projet .....	43
Figure 4.14 Carte des processus pour la planification de l'approvisionnement d'un projet.....	44
Figure 4.15 Données d'entrées et de sorties de chaque activité ou sous-processus de planification pour la nouvelle modélisation .....	49
Figure 4.16 Diagramme d'entités relations pour la gestion des activités de planification du processus unifié proposé .....	50
Figure 6.1 Algorithme de construction d'une solution réalisable au cours de la génération d'une instance de projet .....	65
Figure 6.2 Variation du <i>Makespan</i> en fonction des coefficients $\lambda makespan$ et $\lambda Priorité$ .....	71
Figure 6.3 Variation du <i>Avg centroid</i> en fonction des coefficients $\lambda makespan$ et $\lambda Priorité$ ....	71
Figure 6.4 Variation du <i>Avg centroid P_1</i> en fonction des coefficients $\lambda makespan$ et $\lambda Priorité$ .....	72
Figure 6.5 Variation du Buffer P_1 en fonction des coefficients $\lambda makespan$ et $\lambda Priorité$ .....	72
Figure 6.6 Variation du <i>Makespan</i> en fonction des coefficients $\lambda makespan$ et $\lambda Cout$ .....	72
Figure 6.7 Variation du <i>Avg centroid</i> en fonction des coefficients $\lambda makespan$ et $\lambda Cout$ .....	72
Figure 6.8 Variation du <i>Cout</i> en fonction des coefficients $\lambda makespan$ et $\lambda Cout$ .....	73
Figure 6.9 Variation du <i>Makespan</i> en fonction des coefficients $\lambda Priorite$ et $\lambda Cout$ .....	74
Figure 6.10 Variation du <i>Buffer P_1</i> en fonction des coefficients $\lambda Priorite$ et $\lambda Cout$ .....	74
Figure 6.11 Variation du <i>Avg centroid</i> en fonction des coefficients $\lambda Priorite$ et $\lambda Cout$ .....	74
Figure 6.12 Variation du <i>Cout</i> en fonction des coefficients $\lambda Priorite$ et $\lambda Cout$ .....	74
Figure 6.13 Variation du <i>Avg centroid P_1</i> en fonction des coefficients $\lambda Priorite$ et $\lambda Cout$ ....	74
Figure 6.14 Profil 1 de conservation de capacité de ressources disponible.....	76

Figure 6.15 Profil 2 de conservation de capacité de ressources disponible.....	76
Figure 6.16 Influence des paramètres sur la variation du centroïde pondérée par les durées des activités .....	78
Figure 6.17 Calcul du coefficient de corrélation entre le paramètre $\beta_1$ calculée et $\beta_1$ optimum	79
Figure 6.18 Calcul du coefficient de corrélation entre le paramètre $\beta_2$ calculée et $\beta_2$ optimum .	79
Figure A.1 Processus d'affaires dans un chantier naval identifiés dans la littérature.....	86
Figure B.1 Processus d'affaires dans un chantier naval militaire.....	87
Figure C.1 Processus d'affaires dans un chantier naval commercial.....	88
Figure D.1 Nouvelle proposition de processus d'affaires unifiée .....	89
Figure F.1 Modèle de calcul .....	104
Figure F.2 Exemple données d'entrées modèle.....	105
Figure F.3 Exemple solution.....	105
Figure F.4 Échéancier de l'exemple.....	106
Figure F.5 Profil d'utilisation des ressources du groupe 1 de l'exemple.....	106
Figure F.6 Profil d'utilisation des ressources du groupe 2 de l'exemple.....	106
Figure F.7 Profil d'utilisation des ressources du groupe 3 de l'exemple.....	106

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

AACE Association for the Advancement of Cost Engineers

A-BEES Adaptative Balanced Explorative and Exploitative Search

ADM(Mat) Assistant Deputy Minister (Materiel)

BPMN Business Process Model and Notation

CBR Case Based Reasoning

CSP Constraint Satisfaction Problem

DRMIS Defense Resource Management Information System

FMEA Failure Mode and Effects Analysis

FMECA Failure Mode Effects and Criticality Analysis

FMF Fleet Maintenance Facility

FRCPSP Flexible Resource Constrained Project Scheduling Problem

FTA Fleet Technical Authority

ICPA Incremental Capacity Planning Algorithm

RBI Risk Based Maintenance

RCCP Rough Cut Capacity Planning

RCM Reliability Centered Maintenance

RCN Royal Canadian Navy

RCPSP Resource Constrained Project Scheduling Problem

RISPECT Risk Based Expert Sytem for Through-life Structural Inspection, Maintenance and New-Build Structural Design

TCM Total Cost Management

WBS Work Breakdown Structure

WP Work Package

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe A Processus d'affaires dans un chantier naval identifiés dans la littérature .....	86
Annexe B Processus d'affaires dans un chantier naval militaire .....	87
Annexe C Processus d'affaires dans un chantier naval commercial .....	88
Annexe D Nouvelle proposition de processus d'affaires unifiée.....	89
Annexe E Vérification de l'incorporation des processus de l'AACE .....	90
Annexe F Code du modèle de Calcul et Exemple probléme .....	104

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Au Canada, le marché de la réparation et de la remise à niveau de navires s'élevait à 922,2 M\$ en 2014 (Gouvernement du Canada, 2020). Avec de multiples chantiers navals à la fois sur la côte pacifique et atlantique, ces établissements sont cruciaux pour le bon fonctionnement de plusieurs entreprises maritimes (pêche, croisière, traversiers, industrie pétrolière), mais également pour l'entretien des infrastructures de la marine royale canadienne (RCN - Royal Canadian Navy).

Cependant, la planification d'un projet de réfection de navires est un exercice difficile, soumis à des contraintes et des variabilités importantes. D'une part, les contraintes temporelles imposées sur les délais obligent le planificateur à ordonner le projet sur une période de temps minimale pour que le client puisse réexploiter au plus vite son navire. D'autre part, les contraintes techniques liées au navire, aux ressources humaines et aux équipements limitent la rapidité et l'enchaînement de l'exécution des opérations.

De plus, malgré le nombre important de capteurs et la mise en place de plans de maintenance formalisés, la découverte de nouveaux défauts au cours d'inspection nécessite souvent l'ajout d'une nouvelle charge de travail en cours de projet. Ces perturbations peuvent compromettre la planification initiale. La performance d'un chantier naval est souvent évaluée par sa capacité à respecter des délais et des budgets tout en gérant ses imprévus.

Vis-à-vis du client et du chantier naval, les méthodes de planification sont différentes. La marine royale canadienne suit un processus de planification tendu et ne fournit aux chantiers navals que des périodes de maintenance courtes peu négociables avec un nombre important de spécifications à réaliser. Contrairement à un avion ou un sous-marin, les activités de maintenance d'un navire ne doivent pas obligatoirement toutes être réalisées. Plusieurs systèmes sont redondants. La défaillance d'un équipement présent en plusieurs exemplaires ne met pas en danger le navire. En accord avec le chantier naval, la marine royale canadienne définit des niveaux de priorités pour chaque spécification à réaliser. Le projet est ensuite planifié afin d'exécuter en premier les tâches les plus critiques, puis en second un maximum de travaux souhaitables jusqu'à la fin de la fenêtre de temps.

Dans le cas de maintenance d'un navire commercial, la définition d'un système de priorité n'existe pas. À l'aide des spécifications fournies par le client, des estimations et des négociations sur les

délais et la période de travail ont lieu, afin d'exécuter l'ensemble des tâches nécessaires contrairement au cas militaire. Les enjeux d'un projet de remise à niveau sont donc variables en fonction du contexte d'exécution ce qui rend problématique l'élaboration d'un cadre commun standard de gestion de projet.

Reconnaissant l'importance du secteur et les difficultés auxquelles font face les organisations de remise à niveau de navires, ce mémoire s'intéresse plus particulièrement à la phase de planification tactique, soit celle définie par la prise de contact avec le client jusqu'à la signature du contrat.

Les objectifs de ce mémoire sont multiples. Premièrement, nous souhaitons développer une nouvelle démarche de gestion de projet de remise à niveau permettant de traiter à la fois des projets de maintenances provenant de client commercial et de la RCN. Deuxièmement, afin d'aider le planificateur lors de l'élaboration d'une proposition de délai adéquat, un outil de planification tactique sera développé pour ordonner un possible déroulement des travaux en fonction des caractéristiques du projet, des contraintes et des exigences du client.

Pour la bonne réalisation de ce mémoire, une description d'un projet de remise à niveau de navire et des processus d'affaires utilisés dans les chantiers navals initie la revue de littérature présentée au chapitre suivant. Celle-ci comprend aussi une étude des travaux de recherche sur les méthodes de planification tactique utilisées en gestion de grands projets et se conclut par une présentation des techniques de planification actuellement employées dans le secteur de la maintenance de navires. La méthodologie de recherche est par la suite présentée au cours du chapitre 3. Grâce à la collaboration de plusieurs chantiers navals et des travaux trouvés dans la littérature, un nouveau cadre de gestion de projet est proposé dans le chapitre 4. Une validation de la proposition conclut ce chapitre. Un outil d'aide à la planification permettant l'ordonnancement d'un possible déroulement de travaux est ensuite présenté au chapitre 5. Les solutions générées par cet outil sont évaluées à l'aide d'une étude expérimentale exposée dans le chapitre 6. Finalement, les limitations du nouvel outil et des futures améliorations possibles viennent terminer le mémoire.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 Introduction

Ce chapitre vise à faire une revue de littérature des modèles de planification applicables aux projets de remise à niveau de navires. Afin de guider le lecteur, une description de ce type de projet et des processus d'affaires des chantiers navals est donnée afin de bien en cerner les enjeux et les particularités de ce milieu. Puis, les travaux de recherche liés aux méthodes de planification tactique de grands projets sont présentés suivis d'un exposé des techniques de planification actuellement utilisées pour la maintenance de navires. Une analyse critique de la littérature conclut ce chapitre.

### 2.2 Définition d'un projet de remise à niveau de navires

Selon la norme ISO 10006:2003, « un projet est un processus unique, qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées, comportant des dates de début et de fin, entreprises dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques telles que les contraintes de délais, de coûts et de ressources ».

Dans le secteur maritime, l'exploitation des navires est continue et ne permet que des fenêtres de temps de courte durée pour l'exécution des opérations de maintenance. Chaque tâche à réaliser fait suite à des problèmes techniques rencontrés en cours d'opérations en mer ou à des besoins de maintenance préventive ou de modernisation. Pour simplifier la planification d'un projet, les activités sont regroupées en petits lots appelés work packages (WP). Cependant, régulièrement face à la quantité importante de WPs et de l'étroitesse de la fenêtre de temps allouée, toutes les activités ne peuvent pas être réalisées. Heureusement, certains systèmes sont redondants et la défaillance de l'un d'entre eux ne met pas en danger le navire. Pour connaître les WPs les plus importants à réaliser, un niveau de priorité est assigné à chaque WP. Les lots possédant les priorités les plus hautes sont planifiés en premier afin d'être sûrs qu'ils soient finalisés avant la récupération du bateau par le client (Bertrand, 2020).

La description du contenu d'un projet de remise à niveau est un exercice difficile du fait de la grande variabilité des temps d'exécution des activités et du contenu de la maintenance. Malgré la présence de capteurs à bord du navire pour détecter des dysfonctionnements, il est courant qu'un

nombre important de défauts soient identifiés lors de l'inspection du bateau. Dans l'éventualité d'une nouvelle réparation, si celle-ci est mineure, peu ou pas de répercussions interviendront en planification. Si celle-ci s'avère plus importante, un nouveau WP sera créé et le plan initial de planification sera revu après l'accord du client.

Dans un projet de maintenance de navires, on retrouve généralement des activités traditionnelles que l'on retrouve presque dans chaque projet et des activités plus spécifiques de maintenance occasionnelle (Arun et Makaraksha, 2016). Les opérations traditionnelles touchent principalement le revêtement de la coque, le gouvernail, les hélices, les vannes, les ancrages, le moteur principal et les moteurs auxiliaires. Les activités occasionnelles, quant à elles, traitent des défauts tels que problèmes sur les réservoirs, sur les structures, sur les bobines de chauffage et d'autres incidents. Toutes les activités ne sont pas applicables à tous les types de navires étant donné les spécificités de chacune d'entre elles.

Tableau 2.1 Activités de maintenance traditionnelle par type de navires

Numéro d'équipement	Type de navires →	Pétrolier	Porte-conteneurs	Vraquier	Chimiquier	Transporteur de pétrole liquéfié	Transporter de gaz naturel liquéfié	Transporteur de marchandise général	Transporteur de voiture
Activité de maintenance régulière ↓									
1	Moteurs auxiliaires	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Ancre et chaîne	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	Pompe de ballastage	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	Pompes à cargaison	✓	☒	☒	✓	☒	☒	☒	☒
5	Armoire à chaînes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	Pompe cryogénique	☒	☒	☒	☒	✓	✓	☒	☒
7	Raccord de pont	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8	Moteur électrique	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9	Revêtement de coque	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
10	Moteurs principaux	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11	Équipement de navigation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
12	Hélice	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13	Gouvernail	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	Coffre de mer	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	Souppage de mer	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
16	Structure métallique	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Activité de maintenance occasionnelle ↓									
17	Conduite de ballastage	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
18	Revêtement du réservoir de ballastage	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
19	Tuyauterie	✓	☒	☒	✓	✓	✓	✓	☒
20	Revêtement des réservoirs	✓	☒	☒	✓	☒	☒	☒	☒
21	Guide de cellule	☒	✓	✓	☒	☒	☒	☒	☒
22	Soupapes de pont	✓	☒	✓	✓	✓	✓	✓	✓
23	Extincteur et tuyau d'incendie	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
24	Couvercle d'écouille	☒	✓	☒	☒	☒	☒	✓	☒
25	Serpentin de chauffage	✓	☒	☒	✓	☒	☒	☒	☒
26	Revêtement de maintien	☒	✓	✓	☒	☒	☒	✓	☒
27	Vérin hydraulique de grue de pont	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
28	Vérin hydraulique pour couvercle d'écouille		☒	✓	☒	☒	☒	✓	☒
29	Porte de bélier	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	✓
30	Vannes de réservoir	✓	☒	✓	✓	✓	✓	✓	✓
31	Conduit de ventilation	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	✓

✓ Applicable ☒ Non applicable

Dans un projet, des relations de précédence peuvent exister entre plusieurs activités ou WPs. Par exemple, une activité de ponçage d'une surface doit être réalisée avant d'effectuer une couche de peinture. À l'aide de ces relations, un réseau peut être tracé afin de comprendre le cheminement du projet. Dans le secteur de la construction ou de l'aéronautique, ceux-ci peuvent être très complexes de par la présence de relations de précédence importante à la fois au sein d'un même WP, mais également entre les WPs (Kolisch et Sprecher, 1996) comme démontré dans la figure 2.1.

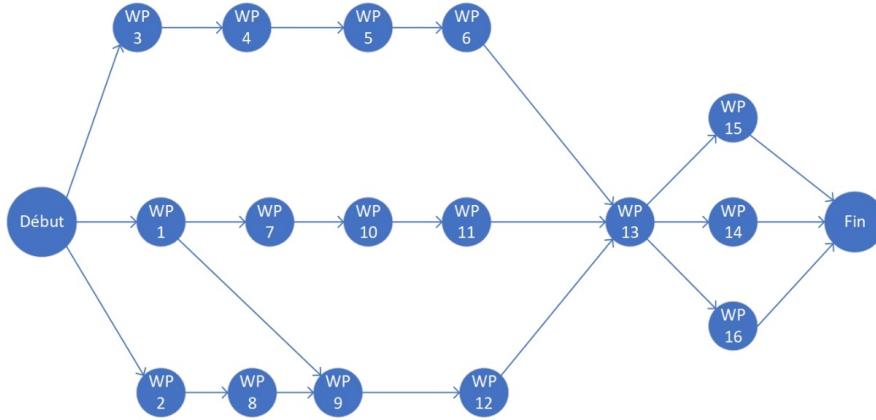


Figure 2.1 Exemple de réseau de WPs pour un projet de construction ou d'aéronautique

Dans le secteur de la marine, même si des relations de précédence existent entre les activités d'un même WP, peu d'entre elles existent entre chaque WP, comme l'illustre la figure 2.2. Chaque WP est relativement indépendant des autres. Un navire étant une installation de grande envergure avec de multiples accès, les différentes équipes de travail peuvent travailler simultanément sans rencontrer d'interactions (Bertrand, 2020).

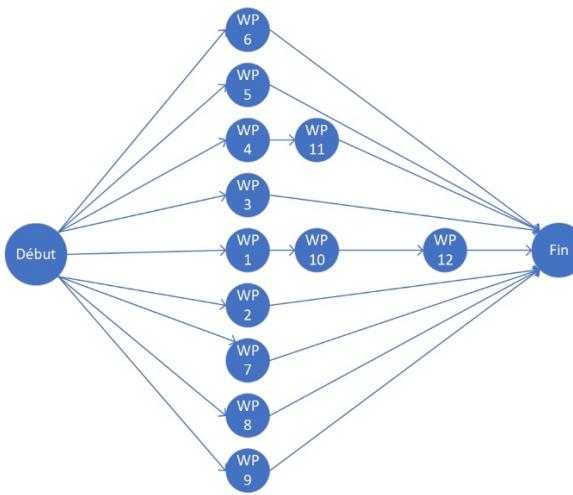


Figure 2.2 Exemple d'un réseau de WPs pour un projet de remise à niveau de navires

En plus des relations de précédence, de fortes contraintes d'exécution doivent être prises en compte. Malgré les grandes dimensions d'un navire, l'agencement des compartiments crée des pièces exiguës limitant le nombre d'ouvriers et par la même occasion le nombre de WPs pouvant être exécutés en parallèle. De même, en fonction du type de travaux, l'accès aux zones de travail doit être dégagé afin de pouvoir acheminer l'équipement nécessaire. Lorsque certaines activités génèrent une source importante de chaleur (Exemple : Soudure), l'accès dans la ou les pièces attenantes à la paroi chauffée n'est plus accessible pour des raisons de sécurité.

Afin de pouvoir communiquer avec d'autres bateaux au cours d'opérations maritimes, un navire est doté d'émetteurs puissants pouvant être nuisibles à la santé des travailleurs en cas d'exposition directe. De même, l'évacuation des gaz créée par des équipements dans les milieux confinés doit également être prise en compte lors de la planification.

Au sein d'un chantier naval, les activités peuvent être réalisées dans deux zones différentes. Soit directement à quai, soit en cale sèche. Lorsque le navire est à quai, peuvent être menées uniquement des opérations d'inspection et de nettoyage sur la partie submergée. Quant à la cale sèche, la capacité d'accueil étant limitée et nécessitant des opérations délicates de transfert à chaque nouvelle entrée, le planificateur doit organiser de façon rigoureuse cette opération.

Cependant, malgré ces contraintes techniques, une grande partie des travaux ne nécessite pas de compétences techniques poussées. L'ensemble des ouvriers et des équipements peuvent être assignés à une grande diversité de tâches. La planification d'un projet de remise à niveau est donc la résolution d'un problème d'allocation de ressources disponibles sur les WPs les plus importants au bon moment. L'exécution d'un projet de remise à niveau est principalement freinée par un manque de ressources et non par des relations de précédence.

## 2.3 Processus et bonnes méthodes à suivre au cours de l'exécution d'un projet de remise à niveau de navires

Dans la littérature, peu de papiers s'intéressent aux bonnes techniques à adopter pour assurer une bonne gestion d'un projet de remise à niveau de navires dans sa totalité. Les articles identifiés s'articulent principalement autour de trois pôles. Le premier s'intéresse au découpage et l'affectation des spécifications à réaliser. Le second traite des grandes phases d'un projet de remise à niveau. Finalement, le dernier s'intéresse aux processus détaillés.

### 2.3.1 Description et segmentation d'un projet de maintenance de navires

De Boer et al. (1997) ont établi un modèle de base de données fournissant l'ensemble des informations nécessaires à la planification d'un projet de maintenance de navire.

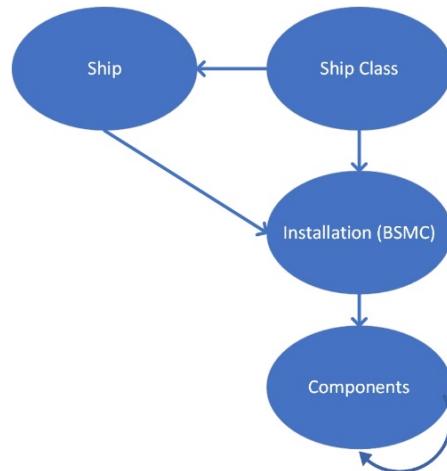


Figure 2.3 WBS des composants

Chaque navire peut être associé à une classe standard qui peut être décomposée en un nombre d'installations ou de sous-systèmes. Chaque installation peut à son tour être décomposée en composants standards ou non comme illustrée à la figure 2.3.

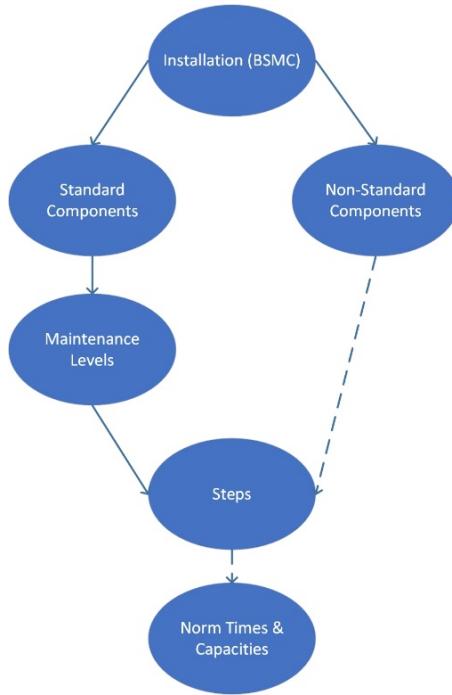


Figure 2.4 WBS des procédures

Pour chaque défaillance d'un composant standard, un niveau d'importance est fixé allant d'un défaut minime jusqu'à une urgence absolue (voir figure 2.4). Une fiche de procédure est ensuite associée à chaque réparation type avec une estimation de la charge de travail requise. Un exemple est décrit dans la figure 2.5.

STEP	Description
1	Inspection on board
2	Disassembly on board
3	Transport to workshop
4	Disassembly in workshop
6	Revision in workshop
7	Testing in workshop
8	Transport to ship
9	Revision on board
10	Assembly on board
11	Testing and start up

Figure 2.5 Exemple de procédure

Dans le cas d'une défaillance d'un composant non standard, une étude d'ingénierie est menée pour estimer le temps et les ressources nécessaires à la réparation. Cette base de données est une aide précieuse pour le planificateur lui permettant d'avoir à sa disposition l'ensemble des procédures

pour chaque sous-système, les niveaux d'importance pour chaque réparation et les charges de travail estimées.

Sur la même idée de hiérarchisation, une étape importante est la création d'un cadre pour établir l'organisation interne d'un chantier naval. Ce cadre permet de faciliter l'allocation de chaque partie d'un projet à un département spécialisé. G. Chryssolouris et al. (1999) ont proposé un modèle hiérarchique pour mieux visualiser cet enjeu. La figure 2.6 présente un modèle de WBS avec chaque zone de travail et les ressources affectées.

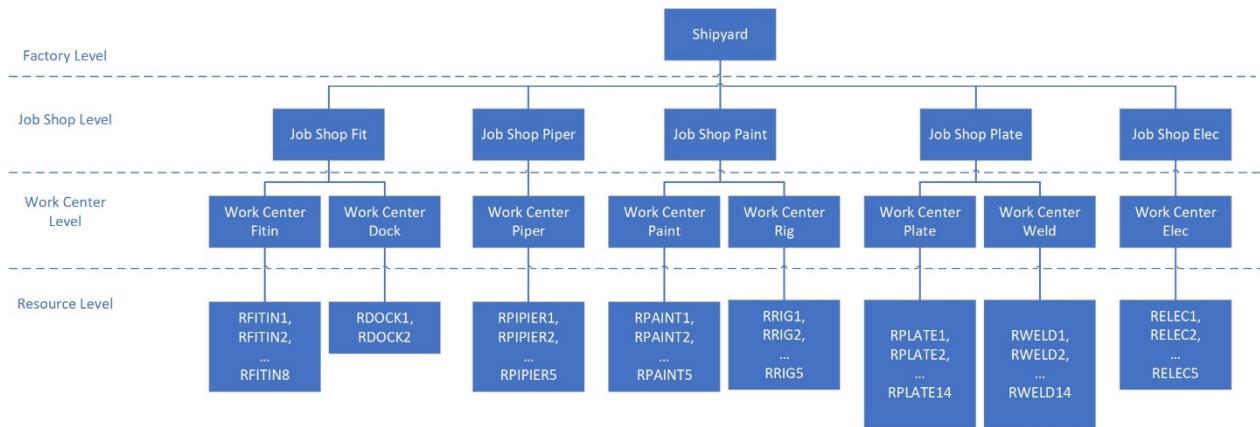


Figure 2.6 WBS des zones de travail et des ressources d'un chantier naval

Le cadre établi, les spécifications liées à chaque lot de travail d'un projet sont assignées aux sections du chantier naval compétentes en suivant un découpage comme illustré en figure 2.7.

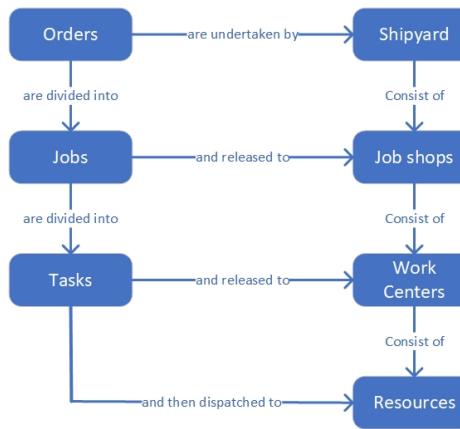


Figure 2.7 Répartition des lots de travail aux différentes sections d'un chantier naval

## Grandes phases d'un projet de remise à niveau de navires

De Boer et al. (1997) définit un projet de remise à niveau en cinq phases. Premièrement, la phase d'acceptation du contrat a pour objectif d'établir une proposition de délai et de budget en fonction de spécifications données et des ressources disponibles au chantier naval. Après signature, la seconde phase consiste à planifier les activités en leur associant des relations de précédence. La troisième phase permet d'ordonnancer les opérations en prenant en compte les ressources disponibles et les délais d'approvisionnement. La quatrième phase est l'exécution de la maintenance. Son rôle est de superviser les travaux et de gérer les imprévus. La dernière phase est la clôture dans laquelle est établi un bilan des points positifs et négatifs rencontrés. Un récapitulatif est développé en figure 2.8.



Figure 2.8 Grandes phases d'un projet de remise à niveau selon De Boer et al. (1997)

### 2.3.2 Analyse des processus à suivre au cours d'un projet de remise à niveau de navires

Chryssolouris et al. (2004) présentent une modélisation détaillée des processus d'affaires liés à un projet de remise à niveau de la manière suivante :

1. Au sein d'une entreprise commerciale, un projet de remise à niveau est décomposé en deux phases. La première phase de négociation de contrat débute par la réception d'une nouvelle soumission d'un client jusqu'à la signature du contrat. Puis la seconde phase, d'ordonnancement et d'exécution, prend le relais jusqu'à la fin du projet.
2. Le responsable commercial reçoit habituellement les nouvelles soumissions par fax ou courriel. Pour chaque nouvelle demande, il vérifie les spécifications demandées, la date d'échéance souhaitée et les matériaux requis afin d'être sûrs qu'aucune information importante ne soit manquante.
3. Puis, l'estimateur évalue pour chaque spécification, le temps de travail requis et le coût des matériaux, les heures-ouvriers et la sous-traitance. Pour réaliser cette étape, il dispose des

références passées, de son expérience et des devis des fournisseurs de matériels/sous-traitants.

4. Une proposition est envoyée au client détaillant le tarif pour chaque spécification ainsi que les coûts pour les travaux supplémentaires comme les inspections et le nettoyage. Une signature de contrat est établie dès lors qu'un accord entre le chantier naval et le client est trouvé. En cas de refus, les estimations sont saisies dans une base de données afin de pouvoir être utilisées pour de futurs projets. Dès la signature, le chantier naval crée des ordres de production relatifs aux spécifications. Suivant les ressources disponibles pour la période demandée, un ordonnancement des activités est réalisé. Pour construire le plan détaillé, trois règles sont prises en compte :

- La durée des travaux : Les travaux les plus longs sont ordonnancés en premier;
- La disponibilité des ressources : Les travaux sont ordonnancés selon leur disponibilité pour l'horizon souhaité. En cas de manque, la sous-traitance peut être utilisée; et
- Les relations de dépendance entre les activités et les contraintes physiques

Si la sous-traitance est utilisée, les ordres de production associés sont transformés en ordre de sous-traitance. Les matériaux nécessaires à la réalisation de chaque tâche sont commandés puis achetés.

5. Au cours de l'exécution d'un projet, des modifications sur les spécifications interviennent fréquemment. Certains travaux peuvent être annulés ou réalisés partiellement. Au contraire, d'autres peuvent venir s'ajouter. En relation avec le client, le chantier naval décide de la procédure d'incorporation de ces changements dans la planification et de la manière dont ils vont influencer l'avancée du projet en validant des avenants.
6. L'acquisition de ressources matérielles par les équipes de travail se fait par l'intermédiaire de requêtes à l'entrepôt de stockage des matériaux. En cas d'indisponibilité, le département achat crée un ordre d'achat auprès d'un fournisseur.
7. Chaque journée de travail se termine par l'établissement d'un rapport de suivi de consommation des ressources par chaque contremaître pour l'ensemble des ateliers.
8. En fin de projet, les coûts engendrés par les travaux des équipes et de la sous-traitance sont comparés avec les estimations préliminaires. Un rapport final et une facturation sont

produits puis envoyés au client. Si le montant de la facturation diffère de l'estimation initiale, celui-ci sera justifié par les différents avenants intervenus pendant l'exécution du projet.

À présent que les processus utilisés pour l'exécution d'un projet de maintenance sont établis, une étude sur les méthodes de planification tactique de grands projets doit être menée afin d'avoir connaissance des méthodes existantes pour le développement des plans de projets initiaux nécessaires à l'établissement de devis en début de projet.

## 2.4 Méthodes de planification tactique de grands projets

### 2.4.1 Niveaux hiérarchiques de planification de projet

Au cours d'un projet d'ingénierie, plusieurs échéanciers avec des niveaux de détails différents sont générés en fonction des informations disponibles. Pendant les premières phases, des plans très agrégés sont développés puis détaillés au fur et à mesure de la prise en compte de nouvelles données. Cette technique permet de définir progressivement l'étendue d'un projet sans attendre l'ensemble des informations requises à une planification détaillée. Dans un de ces travaux, De Boer (1998) classifie la planification en 4 niveaux comme le démontre la figure 2.9.

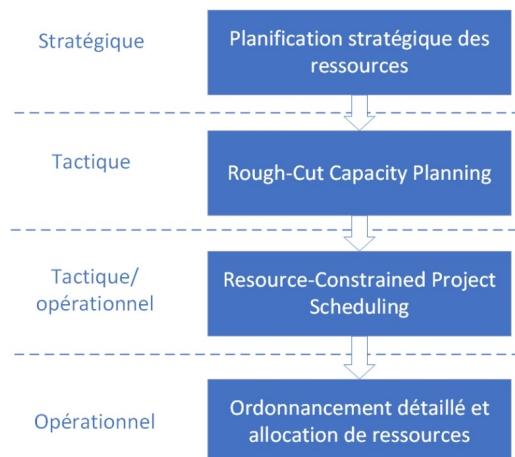


Figure 2.9 Hiérarchisation des niveaux de planification

Le niveau de planification stratégique s'adresse à la haute direction. Elle doit déterminer les capacités en ressources nécessaires en vue de la prévision de demandes de projets. Il s'agit du seul niveau qui ne s'adresse pas à un projet individuel, mais plutôt à une stratégie à long terme sur plusieurs années.

Le niveau tactique relève des gestionnaires de projet. Il permet d'évaluer les spécifications d'un client et de proposer des budgets et des dates de rendus intermédiaires « problème RCCP (Rough Cut Capacity Planning) ». Pour réaliser cette étape, l'horizon de planification est découpé en périodes de temps. Chacune d'entre elles est définie par une durée et une capacité de ressources disponibles limitées. Les activités à réaliser sont regroupées en lots de travaux exprimés en charge de travail (ressources.temps). Les capacités de ressources et les charges de travail sont établies à partir d'estimations fournies par les informations disponibles. Chaque lot est affecté à une ou plusieurs périodes successives suivant les capacités de ressources nécessaires. Un horizon de planification d'environ six mois est suggéré selon la taille du projet.

Le niveau opérationnel/tactique permet, grâce à des estimations plus détaillées, d'éclater les lots de travaux en activités de durées fixées avec des besoins en ressources définies. À l'aide de ces informations, l'ordonnancement, qui réfère au problème de RCPSP (Resource-Constrained Project Scheduling Problem) », détermine les dates de début et de fin pour chaque activité.

La planification tactique et la planification tactique/opérationnel diffère sur plusieurs points. Afin de bien comprendre les enjeux et les différences entre les deux niveaux, un exemple est documenté dans la figure 2.10.

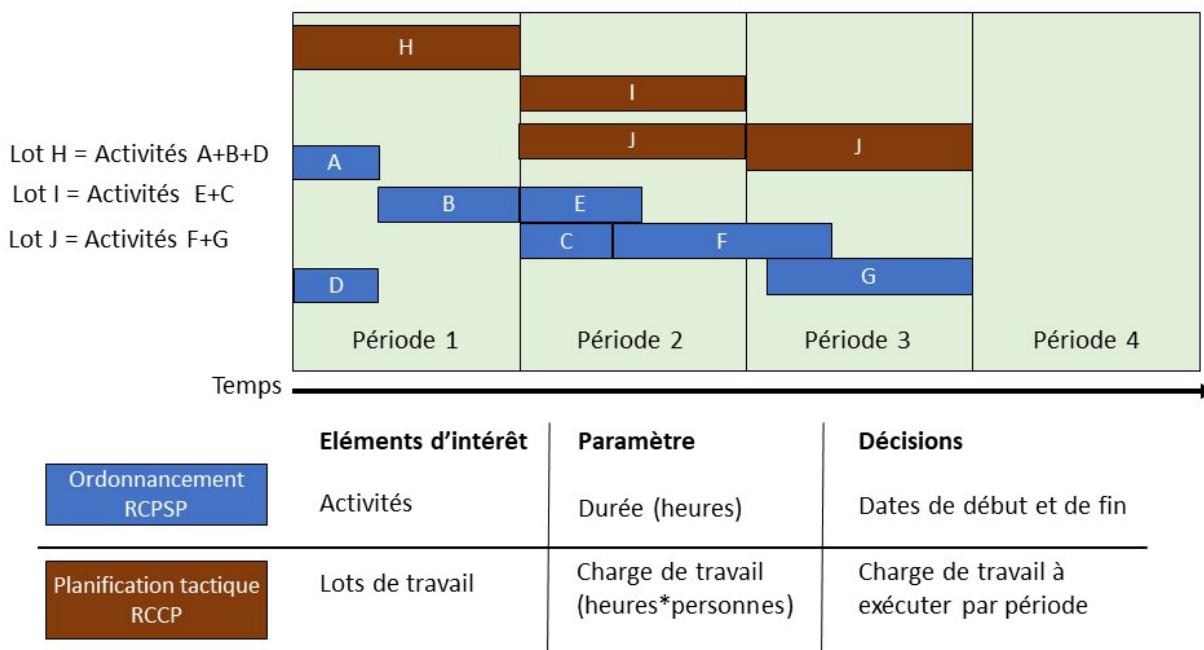


Figure 2.10 Planification tactique vs ordonnancement

En respectant les capacités de ressources disponibles de chaque période et les charges de travaux à planifier, le lot H est positionné sur la période 1, le lot I sur la période 2 et le J sur les périodes 2 et 3. Le positionnement des lots étant terminé, ceux-ci sont ensuite éclatés en activités. Cette dernière étape permet de calculer les dates de début et de fin en résolvant le problème RCPSP.

Le dernier niveau de planification opérationnel permet de désagréger les capacités de ressources. L'ordonnancement permet ainsi d'allouer les ressources à chaque activité. De Boer (1998) préconise d'effectuer cette étape quelques semaines avant l'exécution des activités planifiées.

Dans ce mémoire, le problème étudié s'intéresse à la phase de planification tactique. L'objectif est de réaliser un plan agrégé en fonction de spécifications fournies par le client puis de faire une proposition de délais adéquats pour accomplir le projet en fonction des capacités disponibles. Une revue détaillée des modèles RCCP présents dans la littérature est conduite ci-dessous.

## **2.4.2 Le niveau tactique et ses enjeux**

Au cours de la planification tactique, le problème RCCP peut être traité avec deux visions différentes. Premièrement, dans certains problèmes, on peut considérer que la capacité des ressources est fixe. L'objectif est alors de minimiser la durée des projets ou la déviation des dates de livraison par rapport aux dates initialement fixées (*Time Driven RCCP*). Cependant, dans certains cas, l'ajout de ressources supplémentaires à coût plus élevé peut être considéré (*Resource Driven*). Avec ces nouvelles variables, l'objectif du problème peut être revu en minimisant le coût additionnel généré par des ressources externes tout en respectant les dates de fin de projet initialement établies avec le client (Cherkaoui, 2017).

### **2.4.2.1 Modélisation RCCP et ses difficultés**

Un des enjeux d'un problème RCCP est le traitement des relations de précédence. Afin de faciliter la résolution de ce problème d'optimisation combinatoire, Gademann et Schutten (2005) via l'approche *Time Driven*, ont décidé de remplacer ces relations par l'ajout de fenêtres de temps d'exécution pour chaque lot de travaux dans leur modèle linéaire. Correctement positionnées, aucune violation n'est possible. Sur la même idée, Hans (2001) via une association des approches *Time Driven* et *Resource Driven* définie pour chaque lot de travail, les différentes périodes sur lesquelles il peut être exécuté. Le pourcentage d'exécution de chaque lot sur chaque période est ensuite déterminée par le calendrier de projet. Les relations de précédence sont respectées dans son

modèle linéaire en ne permettant pas à deux lots de travaux reliés par une relation de précédence d'être exécutés au cours de la même période. Des exemptions peuvent cependant être acceptées en accordant à un lot de débuter sur la dernière période d'un de ses prédecesseurs. Si cette légère violation est tolérée, le nombre de lots sur la période critique est alors limité pour risque d'infaisabilité.

Les relations de précédence entraînent la création d'un nombre important de variables binaires provoquant de grosses difficultés de modélisation et de résolution. Des approches heuristiques ou de décomposition ont alors été développées par les chercheurs (De Boer (1998), Gademann et Schutten (2005) et Wullink (2005)).

Hait et Baydoun (2012), via l'approche Time-Driven et un modèle de programmation linéaire mixte, ont évité ces difficultés en associant des variables continues pour les dates de début et de fin des lots de travaux (relations de précédence facilement modélisées) avec des variables discrètes pour prendre en compte les contraintes périodiques de ressources.

On note aussi que le problème FRCPSP (Flexible Resource Constrained Project Scheduling Problem) est une évolution du RCPSP. Dans celui-ci, les capacités de ressources utilisées pour exécuter un lot de travail peuvent varier au cours du temps. Pour l'étude présentée dans ce mémoire, une variation de la quantité de ressources utilisées dans un lot de travail peut être assimilable au passage d'une période à une autre.

Finalement, en comparant quatre modèles de programmation linéaire mixte pour des problèmes FRCPSP, Naber et Kolish (2014) ont démontré les performances de la proposition basée sur Kis (2005) et Bianco et Caramia (2013) par rapport à d'autres propositions existantes. Le modèle dénommé *variable-intensity-based* surpassé ses concurrents en termes de temps de calcul et de qualité des solutions. Cependant, il génère un nombre de variables et de contraintes important ce qui peut entraîner des limitations pour la résolution.

#### **2.4.2.2 Travaux complémentaires au problème RCCP**

Pour améliorer la performance des solutions générées par la résolution d'un problème RCCP, certains auteurs ont incorporé dans les modèles de nouveaux types de relations de précédence et la prise en compte d'incertitude.

Par exemple, le chevauchement introduit par Kis (2005) et repris par Kis (2006) permet de débuter un nouveau lot de travail dès qu'un pourcentage fixé du lot précédent est terminé. D'un point de vue de modélisation, ce chevauchement est traduit par l'emploi de variables binaires. En définissant quatre variantes de chevauchement, Alfieri et al. (2011) complètent le travail de Kis (2006).

La faible quantité d'information disponible au cours de la planification tactique rend les estimations de charges de travail incertaines. Pour prendre en compte cet aspect, Wullink et al. (2004) proposent de définir plusieurs modes d'exécution pour les lots jugés sensibles. Plusieurs scénarios sont évalués. Le choix se fera en fonction des possibles coûts supplémentaires engendrés et des probabilités d'occurrences.

À l'inverse, Masmoudi (2011) suppose que les déviations des charges sont continues. En associant les charges de travail à des nombres flous via la théorie des possibilités, un indicateur évalue l'éventualité que la charge floue dépasse la capacité disponible.

#### **2.4.2.3 Méthodes de résolution pour le problème RCCP**

Dans la littérature, quatre méthodes sont employées pour résoudre un problème RCCP.

- Heuristique simple;
- Heuristique avec modèle linéaire;
- Métaheuristique; et
- Méthode exacte.

Une heuristique est une méthode de résolution approximative. Il fonctionne à l'aide de règles de priorité et permet d'obtenir rapidement une solution viable sans programmation mathématique, en une seule passe ou bien de façon itérative. Par exemple, l'heuristique ICPA (Incremental capacity planning algorithm) décrite par De Boer (1998) planifie un nombre maximum de lots de travaux en accord avec une règle de priorité sans utilisation de ressources externes. Les lots restants sont incorporés en minimisant l'ajout de ressources non régulières. Sur le même concept, Gademann et Schutten (2005) comparent deux heuristiques en une seule passe pour le problème RCCP prenant en compte la flexibilité de capacité, les relations de précédence et la charge de travail maximum par période.

Le papier Wullink (2005) s'intéresse également au développement d'heuristique simple pour la planification de la capacité. Le positionnement des lots de travaux est réalisé en quatre étapes.

Pour leur part, le principe de fonctionnement des heuristiques basées sur la programmation linéaire est d'utiliser une solution initiale réalisable puis de l'ajuster afin d'améliorer sa qualité. Une solution non réalisable peut également être utilisée. Dans ce cas, le modèle linéaire répare chaque violation de précédence pour obtenir une solution opérationnelle. Gademann et Schutten (2005) ont développé trois classes de ce type d'heuristique avec pour objectif d'avoir une uniformisation de la charge de travail ou bien de réduire la durée d'un projet. De Boer (1998) propose aussi une heuristique avec un modèle basé sur la réparation de relations de précédence à partir d'une solution initiale ne les prenant pas en compte. Dans son modèle, Masmoudi (2011) a pour objectif de maximiser des indicateurs de robustesse non linéaires. Ne pouvant pas simplement utiliser des heuristiques basées sur la programmation linéaire, la résolution est réalisée à l'aide d'une mét-heuristique inspirée de la méthode du recuit simulé. Il s'agit d'une méthode itérative consistant à faire évoluer une solution initiale en incorporant des perturbations. À chaque itération, les modifications sont prises en compte si celles-ci améliorent la solution.

Finalement, plus un projet contient de lots de travaux, plus la résolution du problème par la méthode Branch & Bound devient complexe. En ne conservant que les plans de projets amenant à un gain de performance de la solution, le temps de résolution peut être considérablement réduit. Pour résoudre un problème RCCP de façon exacte, Hans (2001) a alors développé une méthode Branch and Price en combinant la méthode de génération de colonnes avec Branch & Bound.

Les méthodes de résolution de problème RCCP ayant été développées dans un cadre général, une revue des techniques de planification employées plus spécifiques au secteur de la maintenance de navire est présentée dans la section suivante.

## 2.5 Méthodes de planification de projets de maintenance de navires

Safaai Deris et al. (1999) ont proposé un modèle permettant le calcul d'un ordonnancement maximisant la disponibilité des navires pour la *Royal Malaysian Navy*. Celui-ci est modélisé comme un problème de satisfaction de contraintes (CSP). Ce modèle est résolu à l'aide d'une approche hybride incorporant un algorithme génétique et un raisonnement par contraintes (CBR). L'algorithme génétique permet de trouver une date de début de la toute première activité tandis que le CBR est utilisé pour construire une solution faisable satisfaisant les contraintes temporelles et les ressources. La qualité de la solution générée est par la suite évaluée avec pour objectif de minimiser le chevauchement d'activités.

Hun Go et al. (2013) se sont intéressés à résoudre le problème d'ordonnancement des opérations de maintenance pour des porte-conteneurs. Comme pour beaucoup de navires, les fenêtres de temps sont très peu négociables étant donné la forte utilisation des navires par les clients. Les contraintes principales pour ce problème sont : le délai, la capacité des ressources disponibles et la complexité des travaux à effectuer sur les différents sous-systèmes du navire. Un modèle de programmation linéaire mixte incorporant ses enjeux a été développé. À l'aide d'une heuristique, une méthode de résolution est proposée avec pour objectif de minimiser la somme des écarts entre la date d'entrée au chantier naval du navire et le début de chaque activité de maintenance. L'heuristique est construite en deux phases. La première consiste à générer une solution initiale puis la seconde a pour objectif d'améliorer sa performance.

Masmoudi et al. (2016) se sont intéressés à la planification tactique avec une approche *Time driven* pour le contexte multi projets où les notions d'incertitudes sont particulièrement présentes. L'exemple des chantiers navals est utilisé. L'exécution d'un projet dans ce secteur peut être perturbée par des évènements imprévisibles : le retard d'un navire, l'ajout de travaux additionnels et la non-disponibilité des ressources requises. Malgré ces incertitudes, le chantier naval doit être capable de réaliser des propositions budgétaires réalistes avant l'accostage du bateau. Pour prendre en compte les possibles déviations, les auteurs ont modélisé les charges de travail par des nombres flous. Un algorithme de recuit simulé est ensuite proposé pour résoudre le problème RCCP.

Chryssolouris et al. (1999) ont comparé cinq règles de priorité à l'aide de simulations pour établir des heuristiques d'ordonnancement de projet de maintenance de navires. Dans cette recherche, les indicateurs de performance principalement employés sont l'utilisation des capacités de ressources

et les retards de travail. La règle de priorité « Date d'échéance au plus tôt » est la plus performante sur les retards de travail. Cependant, celle qui utilise au mieux la capacité des ressources est « Temps de traitement le plus court ».

Bertrand (2020) a proposé une nouvelle approche de résolution pour le problème RCPSP spécialement adapté au contexte de la maintenance de navire pour la RCN. Deux modèles de programmation linéaire mixte ont été développés. Le premier permet de produire un ordonnancement en se basant sur des priorités fournies par un planificateur et des durées d'activités. Le deuxième adapte un ordonnancement établi lorsque des modifications sur les charges de travail doivent être incorporées au cours de l'exécution d'un projet.

## 2.6 Analyse critique de la littérature

Malgré les enjeux financiers associés à la maintenance de navires, la littérature traitant des bonnes techniques de gestion de projet à adopter dans ce secteur est assez faible. Peu d'auteurs se sont intéressés à élaborer des méthodes performantes assurant une planification de projets de qualité.

Cette faible littérature peut être expliquée par le fait que les processus d'affaires actuellement employés font partie des compétences clés d'un chantier naval. En partageant ces informations, les entreprises possédant des méthodes efficaces pourraient perdre des avantages compétitifs si des concurrents souhaitaient les incorporer au sein de leurs organisations. Cette absence de développement dans ce domaine peut mener certains chantiers navals à utiliser des techniques de gestion de projet approximative entraînant des erreurs et des dépassements de délais et de budget. Le développement d'un cadre de gestion de projet adaptable aux spécificités de chaque chantier naval permettrait de créer des bases solides pour chaque entreprise de ce secteur.

Les travaux de recherche s'intéressant aux méthodes de planification de projets de maintenance de navire traitent principalement de l'ordonnancement détaillé des activités. Peu de papiers traitent spécifiquement du niveau de planification tactique dans un chantier naval.

Concernant les méthodes de planification tactique pour de grands projets, le problème RCCP est assez bien traité dans la littérature. Plusieurs chercheurs ont réussi à modéliser le problème avec des points de vue différents. Afin de soullever les problèmes de résolution des méthodes exactes souvent dues à un nombre de variables importantes, des approches de résolution approximative à l'aide d'heuristique ont également été proposées. Pour la plupart des modèles, la prise en compte

de l'incertitude n'est réalisée qu'à travers l'agrégation des données pouvant entraîner des retards ou des dépassements de budget. De nouvelles approches comme les travaux de Cherkaoui (2017) essayent de prendre en compte l'incertitude notamment en créant des marges sur les capacités de ressources disponibles au cours de la résolution du problème RCCP.

Ainsi, il n'existe pas de modèle RCCP directement applicable au contexte d'un projet de remise à niveau de navire. Aucun modèle tactique dans la littérature ne prend en compte des priorités fournies par un planificateur. L'utilisation de priorité provient uniquement de règles définies et non d'un choix personnel. Seule une recherche sur le problème RCPSP prenant en compte cet enjeu a été identifiée. Dans les modèles utilisés dans la littérature, tous les lots de travaux doivent être planifiés. Or pour les problèmes traités dans ce mémoire, les planificateurs ont connaissance que certains projets ne pourront pas aboutir en totalité aux vues des dates d'échéances imposées. Une planification tactique des lots de travaux uniquement réalisables, choisis en fonction de leur priorité, serait donc plus judicieuse.

## 2.7 Conclusion

Le secteur de la maintenance de navires est un marché de niches où la planification d'un projet est une tâche difficile étant donné la complexité des navires et des exigences des clients. À l'aide de cette revue de littérature, des manquements ont été identifiés. À ce jour, aucun outil de planification tactique n'est encore adapté au contexte de ces projets. Ceci génère une opportunité de recherche à traiter qui permettra de soutenir cet enjeu stratégique.

## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre vise à préciser nos objectifs de recherche. La méthodologie de recherche retenue pour les atteindre y est aussi présentée.

### 3.1 Objectifs de recherche

Ce mémoire s'inscrit dans un programme de recherche plus général mené conjointement avec plusieurs acteurs du milieu et visant à développer des outils pour supporter l'ensemble des phases de réalisation d'un projet de remise à niveau. L'objectif principal de ce projet est de *proposer un nouveau cadre de planification tactique de projets de remise à niveau de navire capable de supporter différents types de projets (commerciaux ou militaires)*. Concrètement, cet objectif comprend deux sous-objectifs spécifiques :

- **Sous-objectif 1** : Développer un processus d'affaires pour la planification tactique de projet de remise à niveau de navires permettant de traiter les besoins exprimés tant par des clients commerciaux que la RCN. Ce processus doit notamment s'intégrer aux autres processus d'affaires de gestion de projets présents au sein des chantiers navals
- **Sous-objectif 2** : Développer un modèle de planification tactique qui prend en compte les contraintes spécifiques liées aux projets de remise à niveau compatible avec le processus d'affaires proposé. Celui-ci doit permettre d'aider le planificateur à élaborer une proposition de délai réaliste lorsque le chantier naval reçoit une demande de projet.

En atteignant ces objectifs, l'organisation d'un chantier naval bénéficiera d'une solution clés en main afin de gérer tous types de projets et aura la faculté de produire aisément des propositions aux demandes fournies par des clients.

La méthodologie suivie pour parvenir à ces objectifs est décrite dans la section suivante.

## 3.2 Démarche de recherche

### 3.2.1 Méthodologie utilisée pour l'établissement d'un nouveau processus d'affaires

Pour proposer un nouveau processus de projet de remise à niveau pouvant traiter des projets commerciaux et militaires, la méthodologie suivie est découpée en quatre parties :

1. Analyse des processus d'affaires issus de la littérature;
2. Modélisation et analyse des processus d'affaires actuellement employés dans les chantiers navals commerciaux et militaires;
3. Conception d'une proposition qui combine les travaux identifiés au cours des deux étapes précédentes; et
4. La validation de la proposition par un comité d'expert.

Avant de prendre contact avec des chantiers navals, une revue de littérature était essentielle afin de bien s'informer des travaux de recherche traitant des processus d'affaires nécessaires au bon déroulement d'un projet de maintenance de navires. La bibliothèque de l'École Polytechnique de Montréal et les bases de données Compendex, Scopus et GoogleScholar ont été les principales sources de documentation.

Avec les informations recueillies, une modélisation au format BPMN pour les travaux de la littérature sera réalisée. Ce formalisme permet d'avoir une représentation claire des activités, des événements et des échanges entre chaque entité responsable. Cette modélisation facilitera la comparaison entre les processus identifiés dans la littérature et ceux caractérisant les chantiers navals étudiés. Un modèle de données supportant la modélisation sera également développé.

La deuxième étape consistera à analyser les processus utilisés dans un chantier naval de la RCN. À l'aide d'échange avec du personnel militaire officiant dans un chantier militaire, une modélisation du traitement d'un projet de remise à niveau allant des premières négociations avec le gouvernement du Canada jusqu'à la facturation sera établie. Celle-ci sera ensuite explicitée avec un diagramme BPMN. Un modèle de données supportant le processus sera aussi réalisé.

Concernant la modélisation d'un chantier naval commercial, aucun contact au Canada n'est disponible pour répondre à l'étude, principalement pour des raisons de confidentialité. Cependant, des planificateurs d'une entreprise commerciale située en Europe ont répondu favorablement pour qu'une analyse de leurs processus d'affaires soit effectuée. Une modélisation du processus commercial au format BPMN et un modèle de données seront par la suite développés.

Au cours des deux étapes précédentes, trois modélisations différentes seront établies. Deux d'entre elles feront référence à des processus utilisés dans des chantiers navals commerciaux et la dernière à un chantier militaire. En analysant comment sera structurée chaque modélisation, une nouvelle proposition sera développée en respectant les spécificités des trois cas précédemment étudiés. Afin de mieux comprendre comment celle-ci sera construite, un code couleur permettra de déterminer de quelle modélisation initiale provient chaque activité de la nouvelle proposition. Finalement, un modèle de données supportant le processus unifié sera développé. Ce modèle permettra de faciliter l'intégration du nouveau processus dans un système intégré de gestion d'entreprise, et surtout, d'identifier les données d'entrées et de sorties nécessaires au modèle de planification qui sera développé dans un deuxième temps.

La dernière étape consistera à valider le processus unifié qui sera proposé. Cette nouvelle proposition capable de traiter à la fois des projets commerciaux et militaires devra être validée afin de confirmer sa pertinence. L'approbation de cette nouvelle modélisation unifiée sera réalisée via le biais d'un comité d'experts. Elle devra également respecter les bonnes techniques de gestion de projets développées par des organismes internationaux.

### **3.2.2 Méthodologie utilisée pour le développement d'un modèle de calcul RCCP**

L'objectif du modèle de calcul à développer sera de pouvoir générer un plan de projet agrégé en positionnant automatiquement l'ensemble des WPs d'un projet sur les périodes de temps de l'horizon souhaité par un client. Cet ordonnancement devra prendre en compte les ressources disponibles à chaque période, les délais d'approvisionnement et les priorités fournies par le planificateur. La méthodologie suivie pour réaliser cet objectif est décomposée en deux étapes :

- 1- Conception d'un nouveau modèle de planification tactique dédié au contexte de la maintenance de navires; et
- 2- Expérimentation du modèle.

À la suite des recherches effectuées dans la littérature, un modèle RCCP générique pour la planification de grands projets sera utilisé comme base de départ pour le développement du nouveau modèle. De même, une proposition de planification développée pour la maintenance de navires militaires prenant en compte l'ensemble des particularités d'un projet de remise à niveau sera exploitée. En combinant ces deux travaux et en y associant les spécificités liées au processus unifié et au modèle de données développées au cours du sous-objectif 1, un nouveau modèle RCCP adapté au contexte des chantiers navals sera développé.

Une fois le modèle établi, celui-ci sera simulé afin d'analyser son comportement face à des projets de nature différente. Des mesures de robustesse seront mises en place afin d'évaluer la qualité des solutions générées en fonction des objectifs recherchés. Finalement, le temps de calcul nécessaire à sa résolution sera étudié afin de s'assurer que le futur utilisateur puisse établir des plans de projets rapidement.

### **3.3 Conclusion**

Dans ce chapitre, deux sous-objectifs de recherche distincts ont été explicités. La méthodologie employée pour établir et valider un nouveau processus d'affaires unifié a été détaillée. De même, les étapes à suivre afin de développer un modèle de planification tactique s'intégrant au cadre proposé ont été explicitées.

Le chapitre suivant présente l'analyse des processus d'affaires issues de la littérature et des chantiers navals commerciaux et militaires. Il se conclut par la description de la nouvelle proposition.

## **CHAPITRE 4 PROPOSITION D'UN NOUVEAU CADRE**

### **4.1 Introduction**

Dans cette partie, les processus d'affaires liés à la gestion de projets de remise à niveau de navires dans plusieurs cadres sont décrits afin d'identifier les particularités liées à chaque contexte. Dans un premier temps, un rappel de la description identifiée dans la littérature est établi. Puis, une étude des processus d'un chantier naval militaire est réalisée suivie d'un examen des façons de faire d'une entreprise commerciale. Pour terminer, une nouvelle proposition de gestion de projet de maintenance de navire incorporant les spécificités liées à chaque processus sera développée. Afin d'obtenir une solution de qualité, un guide provenant d'une organisation internationale spécifiant les bonnes techniques de gestion de projet à adopter est également utilisé. Une rétroaction d'un comité d'experts portant sur la nouvelle modélisation conclut le chapitre.

### **4.2 Analyse des processus d'affaires existants**

#### **4.2.1 Processus d'affaires d'un chantier naval identifiés dans la littérature**

##### **4.2.1.1 Description**

Chryssolouris et al. (2004) présentent une modélisation détaillée des processus d'affaires liés à un projet de remise à niveau de la manière suivante :

Au sein d'une entreprise commerciale, un projet de remise à niveau est décomposé en deux phases. La première phase de négociation de contrat débute par la réception d'une nouvelle soumission d'un client jusqu'à la signature du contrat. Puis la seconde phase, d'ordonnancement et d'exécution, prend le relais jusqu'à la fin du projet.

Le responsable commercial reçoit habituellement les nouvelles soumissions par fax ou courriel. Pour chaque nouvelle demande, il vérifie les spécifications demandées, la date d'échéance souhaitée et les matériaux requis afin de s'assurer qu'aucune information importante ne soit manquante. Puis, l'estimateur évalue pour chaque spécification, le temps de travail requis et le coût des matériaux, les heures-ouvriers et la sous-traitance. Pour réaliser cette étape, il dispose des références passées, de son expérience et des devis des fournisseurs de matériels/sous-traitants.

Une proposition est envoyée au client détaillant le tarif pour chaque spécification ainsi que les coûts pour les travaux supplémentaires comme les inspections et le nettoyage. Une signature de contrat est établie dès lors qu'un accord entre le chantier naval et le client est trouvé. En cas de refus, les estimations sont saisies dans une base de données afin de pouvoir être utilisées pour de futurs projets. Dès la signature, le chantier naval crée des ordres de production relatifs aux spécifications. Suivant les ressources disponibles pour la période demandée, un ordonnancement des activités est réalisé. Pour construire le plan détaillé, trois règles sont prises en compte :

- La durée des travaux : Les travaux les plus longs sont ordonnancés en premier;
- La disponibilité des ressources : Les travaux sont ordonnancés selon leur disponibilité pour l'horizon souhaité. En cas de manque, la sous-traitance peut être utilisée; et
- Les relations de dépendance entre les activités et les contraintes physiques.

Si la sous-traitance est utilisée, les ordres de production associés sont transformés en ordre de sous-traitance. Les matériaux nécessaires à la réalisation de chaque tâche sont commandés.

Au cours de l'exécution d'un projet, des modifications sur les spécifications interviennent fréquemment. Certains travaux peuvent être annulés ou réalisés partiellement. Au contraire, d'autres peuvent venir s'ajouter. En relation avec le client, le chantier naval décide de la procédure d'incorporation de ces changements dans la planification et de la manière dont ils vont influencer l'avancée du projet en validant des avenants.

L'acquisition de ressources matérielles par les équipes de travail se fait par l'intermédiaire de requêtes à l'entrepôt de stockage des matériaux. En cas d'indisponibilité, le département achat crée un ordre d'achat auprès d'un fournisseur.

Chaque journée de travail se termine par l'établissement d'un rapport de suivi de consommation des ressources par chaque contremaître pour l'ensemble des ateliers.

En fin de projet, les coûts engendrés par les travaux des équipes et de la sous-traitance sont comparés avec les estimations préliminaires. Un rapport final et une facturation sont produits puis envoyés au client. Si le montant de la facturation diffère de l'estimation initiale, celui-ci sera justifié par les différents avenants intervenus pendant l'exécution du projet.

#### 4.2.1.2 Modélisation BPMN

Afin d'obtenir une meilleure visualisation des processus utilisés identifiés dans la littérature, une modélisation au format BPMN est développée à l'aide des informations récoltées au cours de l'interview. La modélisation est présentée en annexe A.

#### 4.2.1.3 Description des données d'entrées et de sorties pour chaque activité ou sous-processus de planification

Pour donner suite aux informations fournies par la littérature, une liste des données d'entrées nécessaires au bon déroulement de chaque activité est explicitée en figure 4.1. Les résultats attendus sont également précisés.

Activity	Input	Output
2 Estimation of makespan and bid price for a new submission	Customer jobs, due dates, quotations from materials suppliers, quotations from subcontractors, man hours cost, previous estimations of time and cost (historic data), standard jobs,	Estimation of time required for each job, Estimation of cost for man hours, materials, subcontracts and standard jobs.
1.4 Evaluate bid proposal of makespan made by the commercial manager with an estimator point of view	Proposal of time and cost made by the commercial manager, initial proposal made by the estimator	Acceptation or not of the proposal of time and cost made by the commercial manager
1.10 Estimated filed for future reference	Refused proposal of time and cost made by the commercial manager or the estimator by the owner representative	Refused proposal enter in database for future estimation
1.9 Evaluate bid proposal and makespan made by the owner representative with an estimator point of view	Proposal of time and cost made by the owner representative, initial proposal made by the process of estimation time and cost	Acceptation or not of the proposal of time and cost made by the owner representative
1.12 Plan the worklist of repair	Customer and standard jobs, due dates, estimation of time required for each job, repair facilities capacity, availability of material resources, human resources capacity, geospatial constraints, precedence relationship , subcontracting	Schedule of the worklist in respect with geospatial constraints, resources and due dates.
1.10 Make proposal of subcontracting and on site works in link with the ship manager interest	Customer and standard jobs, due dates, human resources capacity, repair facilities capacity, availability of material resources, skills of personnel	Proposal of working orders between foremen and subcontractors
1.15 Evaluate the proposal of subcontracting and on site works made by the commercial manager with a ship manager point of view	Proposal made by the commercial manager, initial proposition made by the ship manager.	Acceptation or not of the proposal of working orders between foremen and subcontractors made by the commercial manager
1.16 Check materials in stock	Availability of material resources	Levels of materials available updated, request for purchase order
1.20 Propose modifications for the planning in link with the ship manager interest due to the change order notification	Customer and standard jobs, new defaults, cancellations works, new works,fixed budget, schedule	Proposals of modified WP and schedule in link with the significant default / cancellations / new works
1.24 Evaluate the proposal of the modified planning made by the owner representative with a ship manager point of view due to the change order notification	Proposal of modified WP and schedule made by the owner representative, Initial proposition made by the ship manager,	Acceptation or not of the proposal of modified schedule made by the owner representative
1.26 Update budget	Previous budget, Cost generated by the modified planning	Budget updated

Figure 4.1 Données d'entrées et sorties des activités de planification identifiée dans la littérature

#### 4.2.1.4 Modèle de données

Associé à la modélisation, un modèle de données soutenant les processus développés dans la littérature est proposé en figure 4.2. Celui-ci permet de décrire les relations entre les entités principales afin d'aider son incorporation au sein d'un système intégré de gestion d'entreprise.

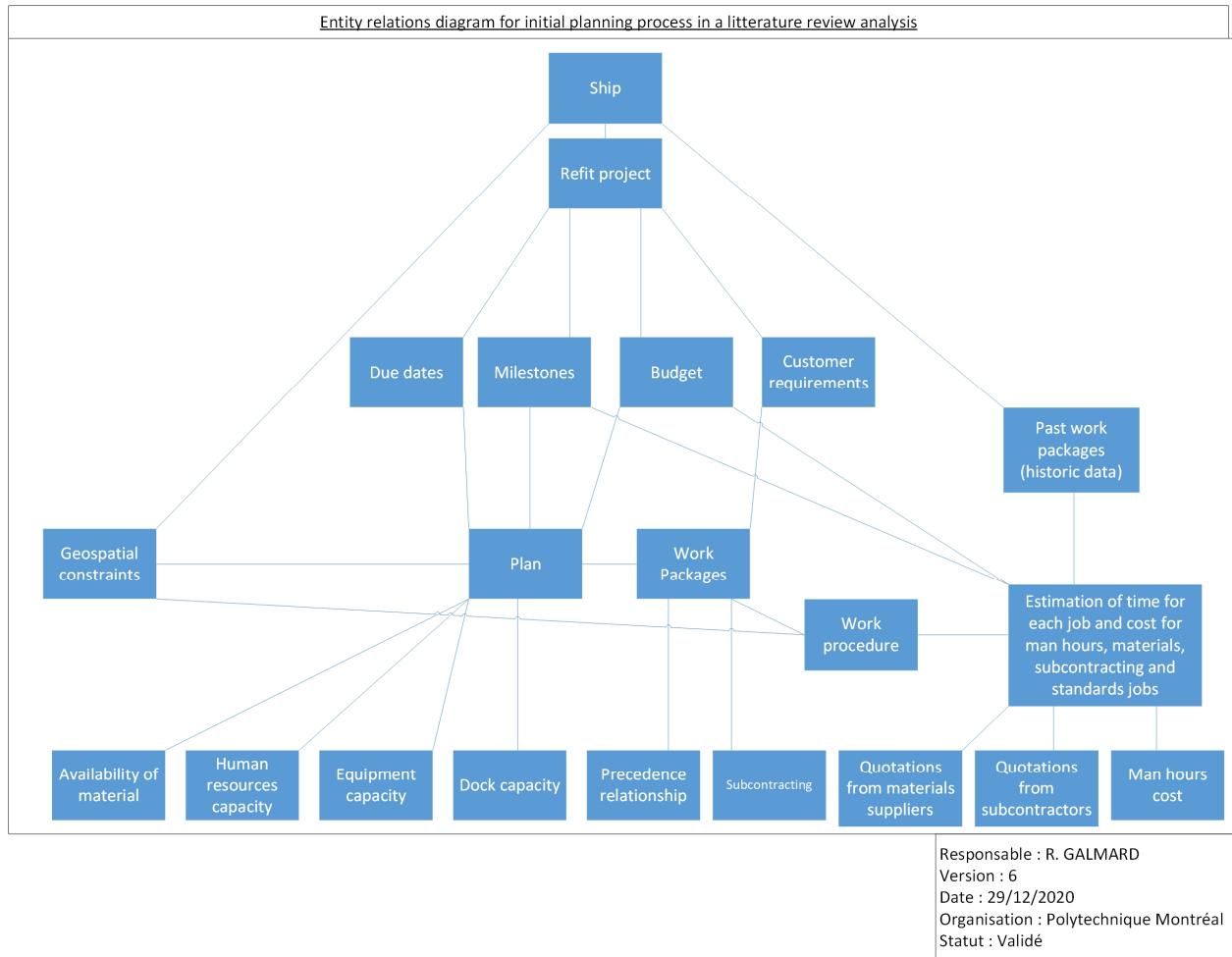


Figure 4.2 Diagramme d'entités relations pour la gestion des activités de planification d'un chantier naval identifiées dans la littérature

#### 4.2.2 Processus d'affaires dans un chantier naval militaire

À la suite d'une analyse de documents fournis par un « Capitaine de corvette » de la RCN, le travail suivant a pu être réalisé : La modélisation des processus d'affaires utilisés dans un chantier naval militaire pour le compte de la RCN.

Chaque chantier possède un contrat avec la RCN d'une durée de 6 ans renouvelable, ce qui lui donne l'opportunité d'embaucher de nouveaux salariés, d'investir dans du matériel et de créer une relation de confiance avec le gouvernement du Canada.

Au niveau organisationnel, un projet de remise à niveau est décomposé en deux parties. La première phase de planification initiale débute à partir des premières discussions pour la future période de travail jusqu'à l'arrivée du bateau à quai. Puis la seconde phase englobe l'intégralité de l'exécution du projet, soit de la prise en charge du bateau jusqu'à sa récupération par la RCN.

La préparation d'un projet de remise à niveau pour un navire militaire débute bien avant l'entrée du bateau au chantier naval. Un système d'information appelé DRMIS (Defence Resource Management Information System) permet à l'équipe de maintenance d'avoir un lien permanent avec l'ensemble de la flotte canadienne. Lorsqu'un défaut apparaît, si les matelots du navire ne parviennent pas à l'acquitter, ils soumettent une notification dans le système. Celle-ci indiquera la nature du défaut ainsi que sa gravité. Grâce à ce système, le chantier naval connaît en temps réel les nouveaux défauts de l'ensemble des navires, mais également les opérations de maintenance préventive à réaliser. Cette information lui permet de commencer la planification des différents travaux qui seront à réaliser en créant des WPs. L'utilisation de données historiques permet de faciliter leurs élaborations.

Chaque année, la RCN, ADM(Mat) (Assistant Deputy Manager (Materiel)) et le FMF (Fleet Maintenance Facility) négocient les périodes de travail pour les maintenances à venir. La RCN et ADM(Mat) ont pour objectifs la réparation des navires en temps optimum alors que le chantier naval souhaite, lui, obtenir un maximum de temps pour exécuter le plus de spécifications possibles. Ces négociations utilisent des données historiques. Si le projet couvre un navire âgé, le délai nécessaire à sa remise à niveau sera supérieur à un navire neuf.

Quelques semaines avant le début des réparations, le FTA (Fleet Technical Authority), la RCN et le FMF se concertent pour définir des niveaux de priorités à chaque WP. Ils sont catégorisés en trois groupes : Essential work, High opportunity work et Normal opportunity work appelés également niveaux de priorité 1, 2 et 3. Afin de faciliter la planification, toutes les activités d'un même WP héritent de la même priorité.

Les niveaux de priorités des WPs et la période de travail définis, le planificateur ordonne les WPs. Si au cours des activités d'inspection, un défaut important est identifié, le chantier naval négocie avec la RCN les options suivantes :

- Résoudre le défaut, mais alléger l'ensemble des travaux prévus pour maintenir le budget et la période de travail initialement prévus;
- Résoudre le défaut et l'intégrer dans l'ensemble des travaux prévus initialement sans prolongation de la période de travail, mais avec un coût additionnel élevé; et
- Résoudre le défaut et l'insérer dans l'ensemble des travaux prévus initialement avec un prolongement de la période de travail, mais avec un coût additionnel standard.

Un nouveau WP est créé avec les nouvelles spécifications à réaliser et le projet est replanifié. Si celui-ci ne peut être exécuté par le chantier naval, par manque de capacité ou de spécialité, il pourra être sous-traité.

La maintenance d'un navire militaire nécessite des pièces complexes, onéreuses et difficilement accessibles. Il est facile d'imaginer que l'acquisition d'un canon militaire est une opération délicate. Afin de simplifier l'approvisionnement, ADM(Mat) fournit l'ensemble des pièces onéreuses et sensibles. Seul l'achat des équipements de basses valeurs est effectué par le département d'approvisionnement puis sera facturé au RCN.

Afin d'apporter de la souplesse dans la gestion de trésorerie du chantier naval, une facture pour les matériaux et la main-d'œuvre est envoyée au gouvernement du Canada chaque mois.

Un dispositif de contrôle est établi avec la RCN afin d'avoir une rétroaction continue sur les travaux réalisés. Des inspections aléatoires peuvent également avoir lieu afin de s'assurer de la qualité et de l'avancement des travaux réalisés.

#### **4.2.2.1 Modélisation BPMN**

Afin d'obtenir une meilleure visualisation des processus utilisés dans un chantier naval militaire, une modélisation au format BPMN est développée à l'aide des informations récoltées au cours de l'interview. La modélisation est présentée en annexe B.

#### 4.2.2.2 Description des données d'entrées et de sorties pour chaque activité ou sous-processus de planification

Pour donner suite aux informations recueillies au cours de l'interview, une liste des données d'entrées nécessaires au bon déroulement de chaque activité est explicitée en figure 4.3. Les résultats attendus sont également précisés.

Activity	Input	Output
1.18 Convert notifications from DRMSI system into work packages	Priority levels, notifications from DRMSI, Past Work Packages (historic data), ship age, material resources, precedence relationship	Work packages with priority levels and time estimated to execute them.
1.19 Plan WP according to precedence relationship and priority levels	Priority levels, work packages, due dates, geospatial constraints, repair facilities capacity, availability of material resources, human resources capacity, precedence relationship, media events constraints, emissions and radiations constraints, space limitations constraints	Schedule of the work packages in respect with technical constraints, resources and due dates
1.23 Propose technical solutions for the planning due to the change order notification	Work packages, new defaults, cancellations works, new works, due dates, planning horizon,	<p>Tree solutions proposed :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• fixing the new problem found but not completing the original PM routine at no fault to the contractor</li> <li>• fixing the problem and completing the PM routine at a higher additional cost, or</li> <li>• fixing both at normal additional costs where the project makespan is extended.</li> </ul>
1.21 Update WP in link with the decision made by the RCN	Decision made by the RCN, previous work packages	Work packages updated with priority levels and time estimated to execute them.
1.22 Reschedule WP	Decision made by the RCN, priority levels, work packages, due dates, geospatial constraints, repair facilities capacity, availability of material resources, human resources capacity, media events constraints, emission and radiations constraints, precedence relationship, space limitation constraints,	Schedule of the work packages updated in respect with technical constraints, resources and due dates
1.25 List expensive equipment needed for the repair	Notification from DRMSI, new default, new work, material resources	List of expensive equipment needed for the repair
1.26 Decide which WP are subcontracted	Repair facilities capacity, work packages, skills of personnel, human resource capacity, due-date	Decision of which WP are subcontracted

Figure 4.3 Données d'entrées et sorties de chaque activité ou sous-processus de planification pour le contexte militaire

#### 4.2.2.3 Modèle de données

Associé à la modélisation, un modèle de données soutenant le processus militaire est proposé en figure 4.4. Celui-ci permet de décrire les relations entre les entités principales afin d'aider son incorporation au sein d'un système intégré de gestion d'entreprise.

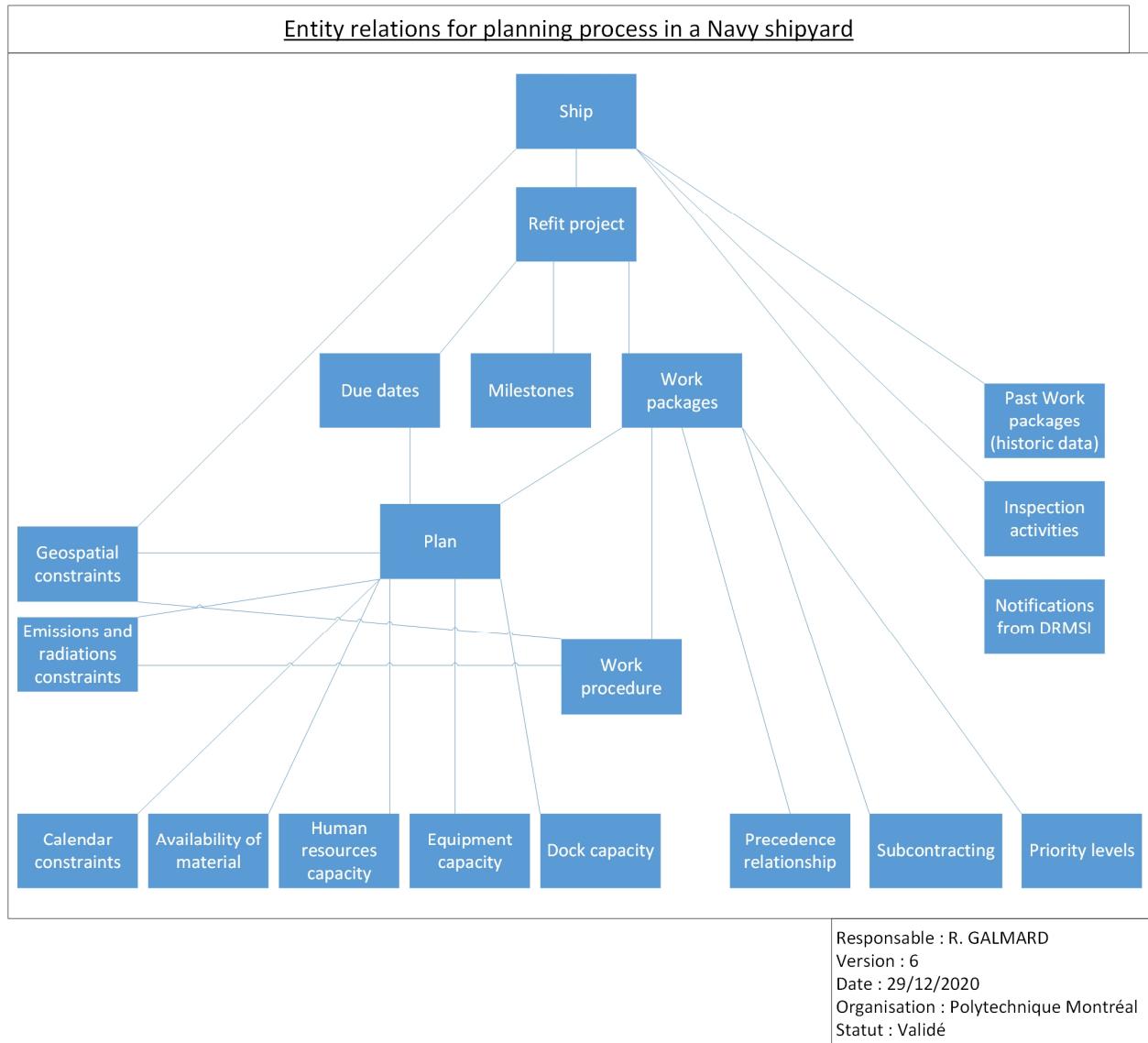


Figure 4.4 Diagramme d'entités relations pour la gestion des activités de planification d'un chantier naval militaire

## 4.2.3 Processus d'affaires dans un chantier naval commercial

### 4.2.3.1 Interview

À la suite d'une interview avec plusieurs planificateurs, nous avons pu modéliser les processus d'affaires utilisés dans un chantier naval commercial traitant exclusivement des navires commerciaux.

Au sein du chantier étudié, un projet de remise à niveau est décomposé en trois phases. La première phase de planification initiale débute à partir de la réception d'une nouvelle soumission par le client jusqu'à la signature du contrat. Puis, la seconde phase de planification détaillée s'initialise par la signature de celle-ci jusqu'à la réception du bateau. La dernière phase d'exécution de projet est réalisée entre l'arrivée du bateau au chantier naval et sa récupération par le client.

Dans le contexte commercial, chaque projet est indépendant. Il existe peu de contrats de longue durée contrairement au domaine militaire.

Un projet de remise à niveau débute par la réception d'une nouvelle soumission de la part d'un client. Le responsable commercial vérifie les spécifications demandées et s'assure qu'aucune information importante ne soit manquante.

À la suite de cette étape, le planificateur prend en charge la soumission et crée une fiche projet dans le système informatique. Ce système permet de simplifier et de retrouver plus facilement un dossier. La fiche projet comprend un code unique d'identification, un statut, une plage de temps souhaitée par le client ainsi que d'autres éléments (client, type de bateau, spécifications demandées, date de soumission ...).

La fiche créée, le planificateur convertit chaque spécification du client en un ou plusieurs WPs et un premier WBS est développé. À l'aide de la description des WPs, le processus d'estimation peut débuter.

Pour exécuter ce processus, le planificateur nomme un collaborateur ou une équipe responsable de l'estimation des données initiales. Ces données estimées comprennent la charge de travail par corps de métiers en heures/hommes, les ressources nécessaires, les besoins particuliers en équipement, une liste partielle de matériels demandant de longs délais d'approvisionnement et le budget global.

En parallèle de ces estimations, une évaluation de la capacité disponible des quais, de la cale sèche et des ressources est réalisée par le planificateur pour les périodes souhaitées.

Dès que l'évaluation des capacités et les estimations sont terminées, le planificateur développe un premier plan de travail. Les WPs sont séquencés et les jalons sont fixés de manière à respecter les délais d'approvisionnement et les capacités disponibles.

Au cours de ce séquencement, le planificateur décide également des choix de sous-traitance.

Une première budgétisation est calculée à l'aide de l'ensemble des informations obtenues précédemment.

L'évaluation budgétaire ainsi que le plan de travail permettent d'effectuer une activité de gestion des risques. Les participants sont : le gestionnaire de projet, le planificateur, l'estimateur et des spécialistes, si nécessaires. Cette activité a pour objectif d'identifier les éléments de risques importants, leurs probabilités et leurs impacts potentiels. Une fois terminé, un plan d'action (plan de contingence) est rédigé pour les éléments jugés les plus critiques. Finalement, suite à cette étude, le comité prend la décision de continuer ou non le projet. Dans le cas positif, un nouveau budget est établi pour incorporer les actions de mitigations et si besoin le WBS est mis à jour.

Une soumission est alors envoyée au client comprenant un coût et une durée totale estimée. Si le client accepte la proposition, un contrat est rédigé puis signé entre les deux parties.

La nouvelle phase de planification détaillée peut commencer en affinant le WBS jusqu'au niveau des activités. Les procédures de travail sont alors établies et une estimation des ressources et du matériel requis est donnée pour chaque activité. En parallèle de l'estimation des ressources, un réseau d'activités est construit en respectant les contraintes de précédence. Ce réseau permet d'établir le plan d'approvisionnement puis d'ordonnancer les activités. Le plan agrégé est envoyé au client afin qu'il puisse accéder à l'avancée des travaux.

Concernant le suivi de projet, les contrôles sont effectués au niveau des WPs et non des activités. En cas d'ajout de spécifications de la part du client ou de la découverte d'un défaut, une procédure formelle de gestion de demandes de changement de la charge de travail est mise en place. Celle-ci identifie le problème rencontré, détermine l'ampleur de l'imprévu et le communique au client si besoin. Si la perturbation est importante, une ou des solutions techniques sont proposées avec une estimation de coûts. Après réflexion, le client décide s'il souhaite incorporer l'exécution d'une des

solutions proposées au plan. Si oui, le WBS est mis à jour avec l'ajout d'un nouveau WP. Le budget et le plan d'approvisionnement sont également revus.

En fin de projet, un rapport détaillant l'ensemble des travaux réalisés est rédigé puis communiqué au client, puis est envoyée la facturation. Dans le cas de longs projets, une organisation avec plusieurs rapports intermédiaires et une facturation périodique peut être mise en place.

#### **4.2.3.2 Modélisation BPMN**

Afin d'obtenir une meilleure visualisation des processus utilisés dans un chantier naval commercial, une modélisation au format BPMN est développée à l'aide des informations récoltées au cours de l'interview. La modélisation est présentée en annexe C.

#### **4.2.3.3 Description des données d'entrées et de sorties pour chaque activité ou sous-processus de planification**

Pour donner suite aux informations recueillies au cours de l'interview, une liste des données d'entrées nécessaires au bon déroulement de chaque activité est explicitée en figure 4.5. Les résultats attendus sont également précisés.

Activity	Input	Output
1.2 Create a project with customer information	Customer information, work specifications, workperiod wished, type of ship, date of submission and priority levels	Project sheet with customer information, work specifications, workperiod wished, type of ship, date of submission and priority levels
1.3 Convert work specifications into work packages	Project sheet with customer information, work specifications, workperiod wished, type of ship, date of submission and priority levels	Work packages
1.4 Develop WBS (work packages level)	Work packages	WBS up to work packages level
1.5 Identify estimator in charge of preliminary estimates	WBS, technical team available	Estimator in charge for the preliminary estimates
1.6 Evaluate available capacity of the dock, dry-dock and human resources during the workperiod project	Total capacity of the dock, dry-dock and human resources. Capacity occupied by other project during the workperiod	Available capacity of the dock, dry dock and human resource during the workperiod
2. Work package workload, cost and long lead-time items estimation	Experience of the estimator in charge, work packages, workperiod, type of ship, suppliers information	Estimation of workload by profession, resources, equipment, supply delays and total cost for each work package
1.7 Define Milestones and precedence relationship between work packages	Work packages, geospatial constraints, technical constraints	Precedence relationship between work packages
3. Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions	Workperiod, work packages, precedence relationship, available shipyard capacities, supply delays, subcontracting decisions	Project milestones
1.9 Calculate project cost	Estimation of workload by profession, resources, equipment, supply delays and total cost for each work package, subcontracting decisions, subcontracting tariff	Initial project cost
4 Project risk assessment	Work packages, workperiod, available shipyard capacities, subcontracting decisions, project milestones, initial project cost, supply delays, estimation of workload by profession, resources and equipment, type of ship. Experience of the planner, estimator and technical specialist	Identification of important risk elements, their probabilities and their potential impact followed by the development of an action plan
1.10. Modify WBS, cost estimate and project plan according to risk mitigation decisions	Initial WBS, workperiod, risk elements with their probabilities and their potential impact. Action plan	WBS or workperiod updated
1.11 Determine bid price	Initial project cost, risk elements with their probabilities and their potential impact. Action plan, WBS and workperiod	Total project cost with initial budget and mitigation actions budget
1.13 Refine WBS (activity level)	WBS up to work packages level, work specifications, type of ship, workperiod	WBS up to activity level
1.14 Develop activity network with precedence relationship	WBS up to activity level, precedence relationship	Activity network with precedence relationship
1.15 Establish supply plan	Activity network, supply delays, capacities of the shipyard, project milestones, workperiod, subcontracting decision	Supply plan
5 Estimation of resources and materials required for each activity	WBS up to activity level, experience of the estimator	Estimation of resources and materials required for each activity
1.26 Schedule activities thanks to priority levels, activity network, project milestones, supply plan, subcontracting decisions, estimations of resources and materials	activity network, priority levels, supply plan, subcontracting decisions, estimation of resources and materials, available capacities of the shipyard, geospatial constraints, technical constraints, project milestones	Schedule of the activities
1.19 Estimate the cost generated by the technical solution to execute the new work	Technical solution proposed by the technical specialist, experience of the estimator, resources and materials required to fix the new work	Cost generated by the technical solution to execute the new work proposed by the technical specialist
1.21 Modify contract and add work package to the WBS	Previous WBS, technical solution proposed to execute the new work	WBS updated
1.22 Update budget and plan	Previous budget, Cost generated by the technical solution to execute the new work proposed by the technical specialist	Budget updated

Figure 4.5 Données d'entrées et de sorties de chaque activité ou sous-processus de planification pour le contexte commercial

#### 4.2.3.4 Modèle de données

Associé à la modélisation, un modèle de donnée soutenant les processus commerciaux est proposé en figure 4.6. Celui-ci permet de décrire les relations entre les entités principales afin d'aider son incorporation au sein d'un système intégré de gestion d'entreprise.

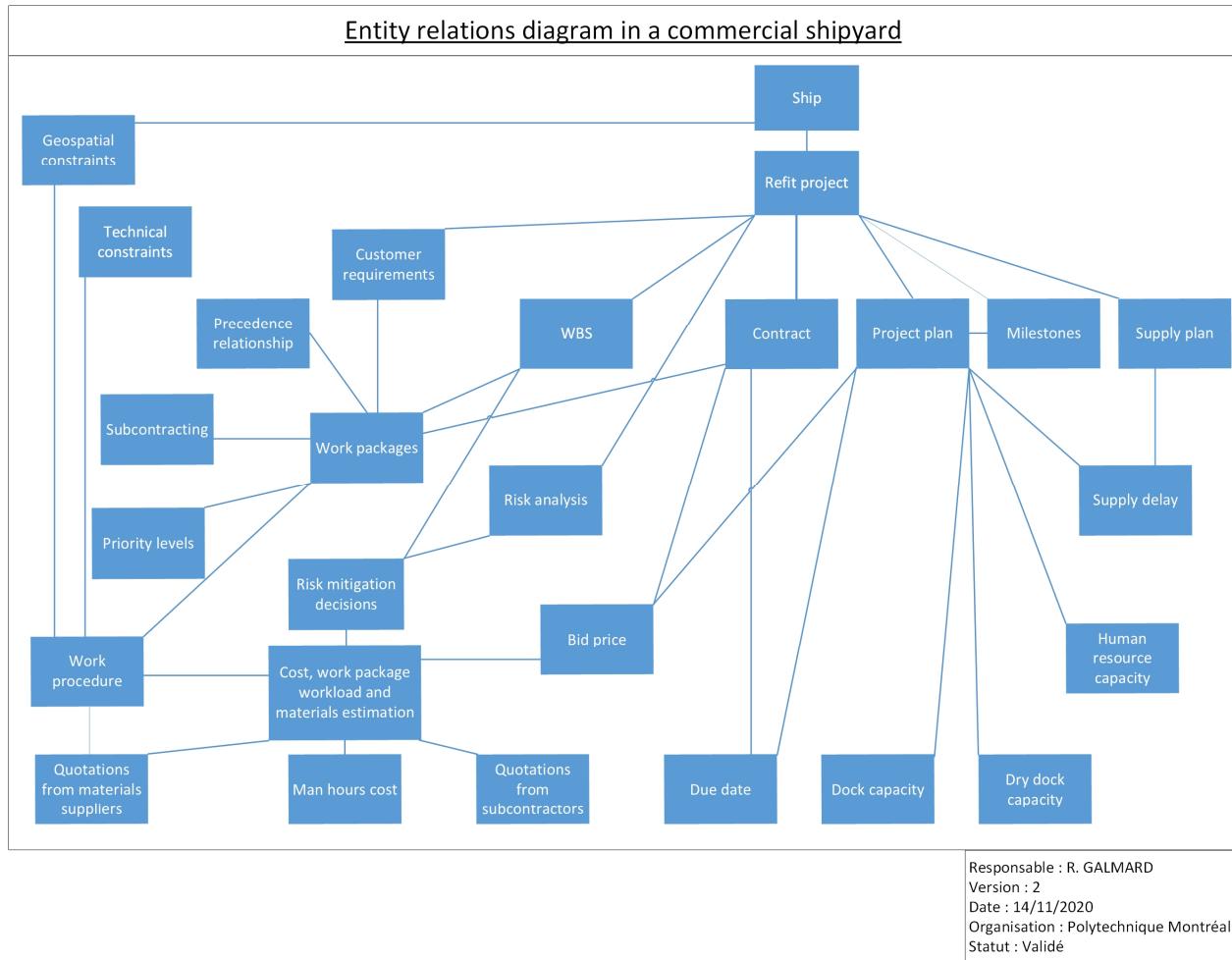


Figure 4.6 Diagramme d'entités relations pour la gestion des activités de planification d'un chantier naval commercial

## 4.3 Processus d'affaires selon l'AACE

### 4.3.1.1 Introduction

L'AACE International est une organisation à but non lucratif publant des revues scientifiques de renommée internationale. Dans la publication « Total Cost Management : An Integrated Approach to Portfolio, Program, and Project Management » (Lance Stephenson, 2015), une description des bonnes techniques à adopter pour planifier et contrôler les ressources, les coûts, la profitabilité et les risques d'un projet est développée. Chaque processus de gestion est construit comme un cycle d'amélioration continue constitué de quatre étapes (Plan, Do, Check, Act).

### 4.3.1.2 Gestion des actifs stratégiques

Dans le TCM (Total Cost Management), les processus de planification, de contrôle de l'avancée d'un projet, de contrôle des coûts et de la gestion des indicateurs de performance sont étudiés. L'ensemble des actifs et des relations à prendre en compte sont détaillés en figure 4.7.

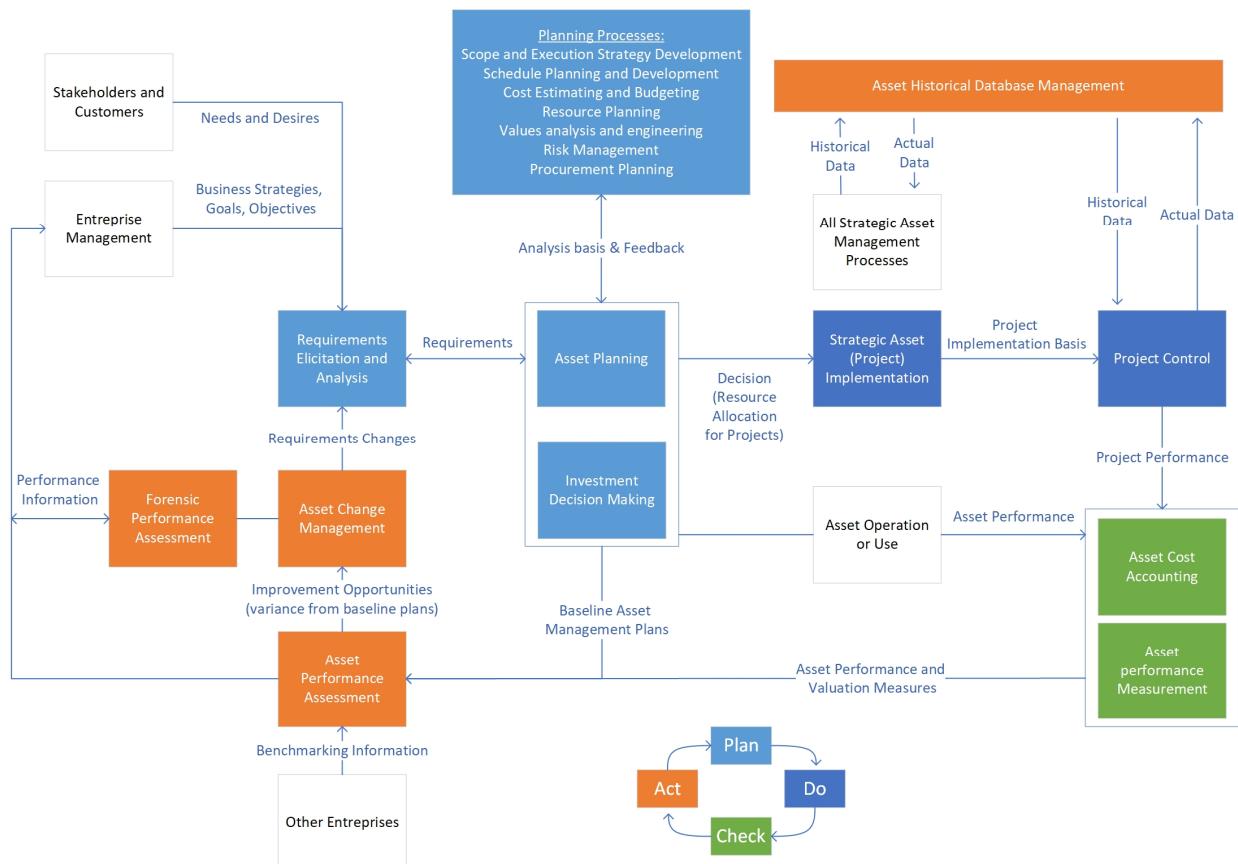


Figure 4.7 Carte des processus pour la gestion stratégique des actifs

Pour élaborer la nouvelle proposition, les activités des processus liées à la planification proposées dans le TCM doivent être prises en compte.

#### 4.3.1.3 Processus AACE

Selon l'AACE, la planification d'un projet peut être subdivisée en six processus.

Le premier consiste à définir la portée d'un projet et à établir une stratégie d'exécution suivant le processus de la figure 4.8.

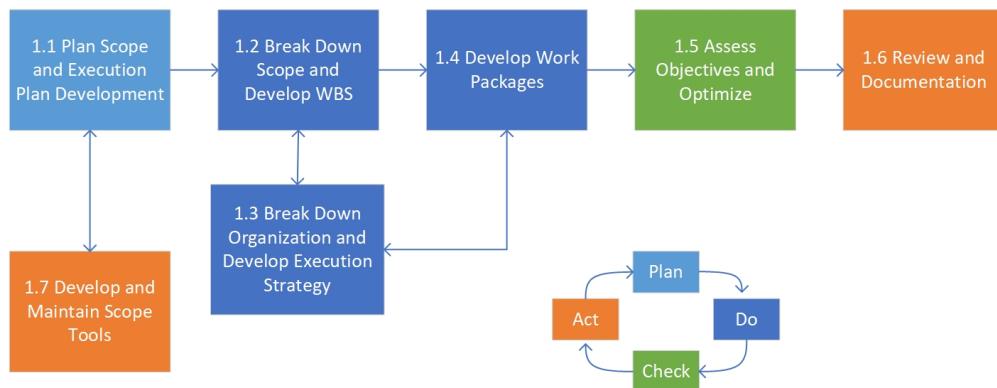


Figure 4.8 Processus pour la définition d'un projet

Une fois une équipe de projet formée, celle-ci définit une stratégie pour atteindre des objectifs fixés. Ceux-ci sont décomposés sous la forme d'un WBS afin de visualiser et contrôler au mieux chaque partie du projet. En parallèle, une décomposition de l'organigramme de l'entreprise est réalisée afin de permettre d'affecter facilement chaque lot de travail aux équipes compétentes.

L'équipe procède ensuite à une vérification globale de la cohérence de la stratégie puis s'assure que tous les éléments importants sont traités. Si une demande de changement intervient sur le contenu, une évaluation est conduite et une mise à jour de la définition ou de la stratégie d'exécution est réalisée si besoin. Enfin, les outils supportant la création des WBS et des OBS sont développés continuellement afin qu'ils conservent des performances de haut niveaux.

L'ordonnancement d'un projet est une activité complexe nécessitant l'interaction de plusieurs acteurs. La figure 4.9 détaille le processus associé du TCM.

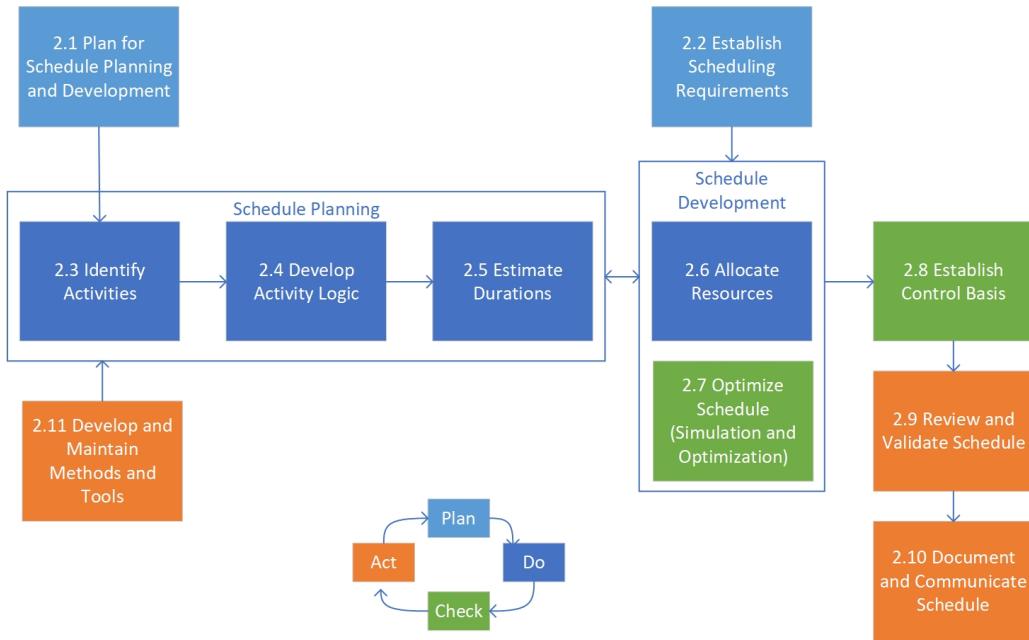


Figure 4.9 Carte des processus pour l'ordonnancement d'un projet

Ce processus est planifié afin qu'il intervienne au bon moment par rapport aux autres processus de planification. Toutes les personnes compétentes nécessaires à son bon déroulement doivent être impliquées. À l'aide de la définition du projet, une identification des activités est menée. Des relations de précédence sont établies et un réseau d'activité est construit. L'ordonnancement temporel est ensuite développé puis optimisé à l'aide de règles ou outils de calcul. Celui-ci prend en compte les estimations de durées, les ressources disponibles, les contraintes et autres spécificités liées au projet. Des mesures de performance sont définies pour assurer le contrôle au cours de l'exécution. Après vérification de la cohérence globale de l'ordonnancement, celui-ci est communiqué aux différentes parties prenantes. Finalement, les outils nécessaires à la planification sont régulièrement mis à jour afin qu'ils aient une efficacité optimale.

Afin d'établir des estimations budgétaires de qualité, un processus encadrant cet enjeu est développé dans la figure 4.10.

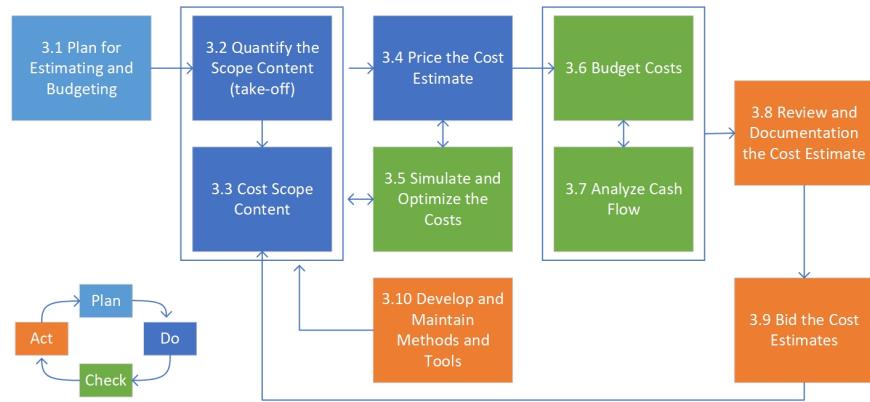


Figure 4.10 Carte des processus pour l'estimation des coûts d'un projet

La planification du processus d'estimation des coûts est établie conjointement avec celles des autres processus de planification. Toutes les personnes compétentes nécessaires à son bon déroulement doivent être impliquées. Le contenu des travaux est analysé puis quantifié afin de permettre d'estimer les ressources et les investissements financiers nécessaires à chaque partie du projet. Un budget est calculé en prenant en compte les estimations de coût, la marge de profit et les intérêts de l'entreprise. Les possibles variations sont étudiées afin d'ajuster les estimations en fonction des probabilités d'occurrence d'événements imprévus. Afin de contrôler les coûts engendrés par l'exécution, le budget est divisé en plusieurs comptes relatifs à chaque jalon du projet. Des indicateurs de performance sont développés afin d'analyser les différences entre les coûts réels et les coûts estimés. Après une vérification globale, une proposition de budget est envoyée au client. Les méthodes utilisées pour effectuer les estimations sont régulièrement revues afin qu'elles aient une performance optimale.

La gestion des ressources est un aspect primordial d'un projet. Un processus concernant la planification de celles-ci est proposé par le TCM en figure 4.11.

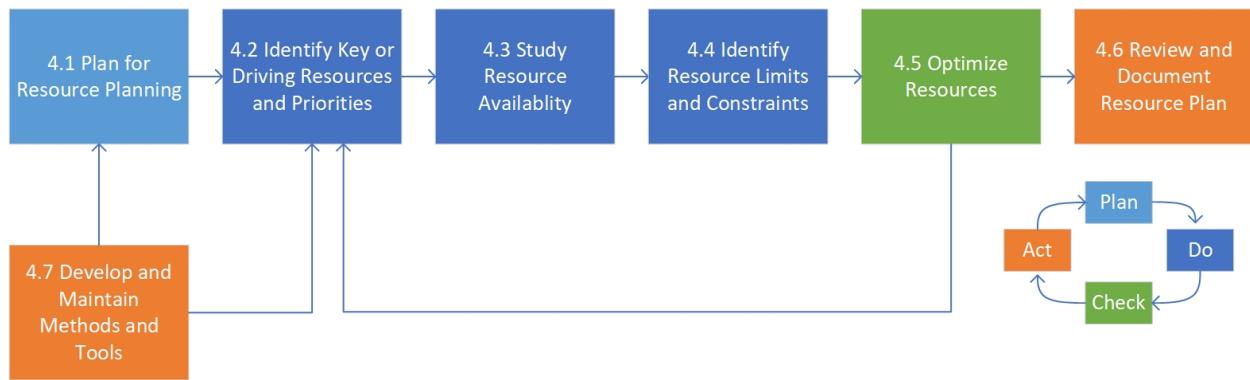


Figure 4.11 Carte des processus pour la planification des ressources d'un projet

L'exécution de la planification des ressources d'un projet est planifiée afin qu'elle s'aligne parfaitement avec celles des autres processus de planification. Toutes les personnes compétentes nécessaires à son bon déroulement doivent être impliquées. Une étude permet d'identifier les ressources critiques en fonction des besoins et des capacités disponibles. Afin d'assurer une bonne exécution, une attention particulière est accordée à la planification des activités les nécessitant. Le planificateur optimise par la suite l'utilisation des ressources au cours de la planification tout en respectant les délais et capacités d'approvisionnement. Les contraintes physiques liées au projet sont également prises en compte. Finalement, après vérification, les profils d'utilisation des ressources sont documentés. Afin de conserver une performance de haut rang, les outils liés à la planification des ressources sont mis à jour périodiquement.

Afin d'identifier les éléments les plus importants d'un projet et de proposer des solutions de qualité, un processus relatif à l'analyse de la valeur est détaillé en figure 4.12.

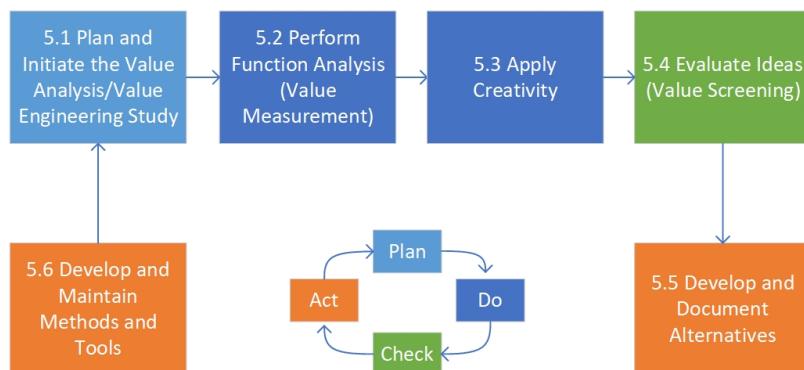


Figure 4.12 Carte des processus pour l'analyse de la valeur d'un projet

L'étape de l'analyse de la valeur d'un projet est réalisée au bon moment au cours de l'exécution d'un projet. Celle-ci est soutenu par un processus associé. Toutes les personnes compétentes nécessaires à son bon déroulement doivent être impliquées. Une analyse des différentes spécifications à réaliser permet d'attribuer un niveau de priorité à chacune d'entre elles. Des solutions sont ensuite développées afin de répondre aux spécifications. Toutes les propositions sont évaluées afin de choisir les plus performantes. Finalement, les solutions retenues sont documentées. Les techniques employées nécessaires au traitement de l'analyse de la valeur sont réévaluées régulièrement afin d'obtenir des résultats qualitatifs.

L'analyse des risques est un aspect crucial d'un projet. Un processus lié à son bon déroulement est présenté en figure 4.13.

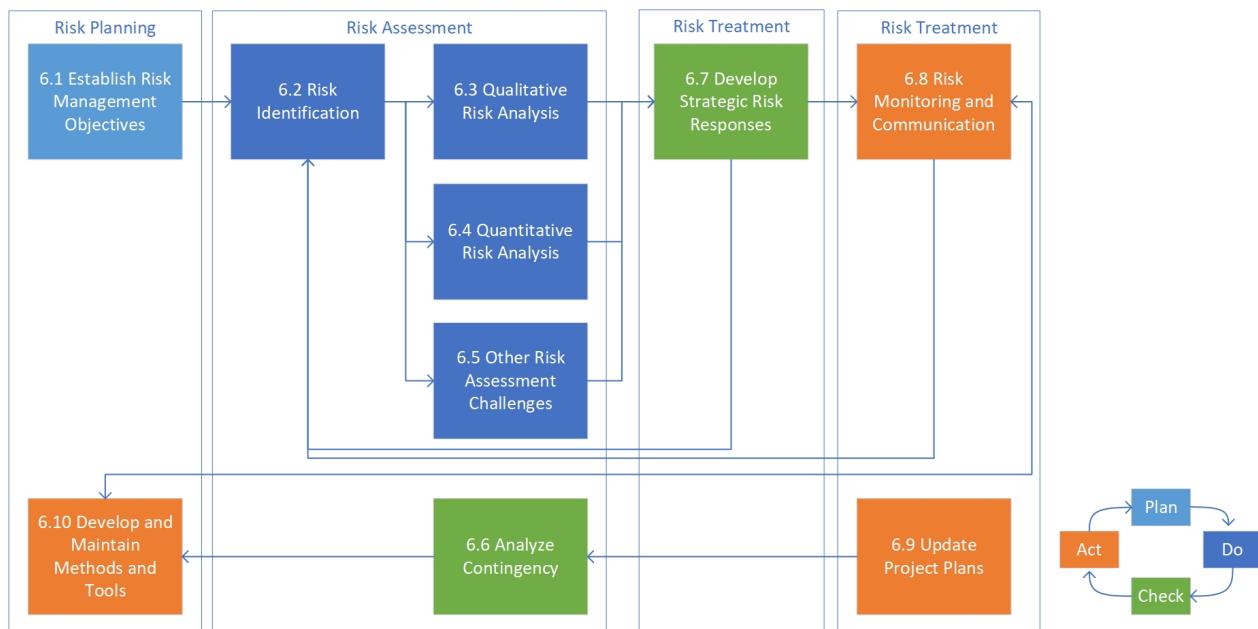


Figure 4.13 Carte des processus pour l'analyse des risques d'un projet

Ce processus est planifié afin qu'il s'insère de façon adéquate dans l'enchaînement des processus de planification. Toutes les personnes compétentes nécessaires à son bon déroulement doivent être impliquées. L'analyse des risques débute par l'identification des risques en listant les évènements ou circonstances pouvant mener à une perturbation du projet. Il s'en suit une analyse qualitative et quantitative afin de catégoriser et quantifier l'importance de chacun d'entre eux. Afin de prendre en compte les incertitudes, une contingence est ajoutée aux estimations afin de limiter les écarts entre l'exécution réelle et l'exécution planifiée. Des plans d'action sont rédigés afin d'agir

rapidement et efficacement si une perturbation intervient. Périodiquement, l'analyse des risques est revue au cours des étapes de contrôle afin qu'elle s'adapte à l'avancée du projet. En fonction des décisions de mitigations choisies, les plans de projets, WBS et autres documents sont mis à jour. Les outils utilisés pour les analyses de risques évoluent continuellement au cours de l'exécution des projets afin qu'ils conservent les plus hautes performances possibles.

Le dernier processus de planification s'intéresse à l'étude des stratégies d'approvisionnement. Celui-ci est détaillé en figure 4.14.

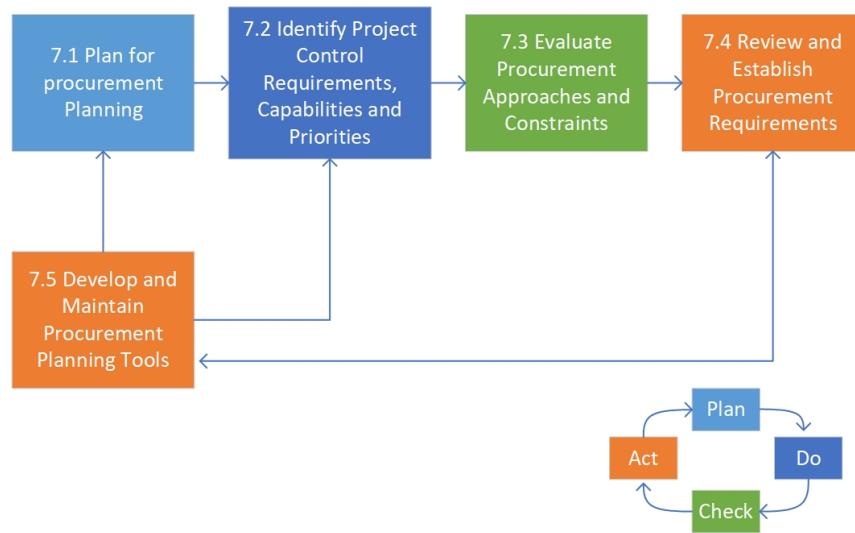


Figure 4.14 Carte des processus pour la planification de l'approvisionnement d'un projet

Le processus associé à l'approvisionnement d'un projet est planifié afin de s'assurer de son bon déroulement et de la compatibilité de son exécution avec les autres processus de planification. Toutes les personnes compétentes nécessaires à son bon déroulement doivent être impliquées. En fonction de la stratégie d'exécution et du contenu du projet, l'équipe responsable de l'approvisionnement définit des exigences avec plusieurs niveaux d'importance. Celles-ci permettent d'identifier des sous-traitants et des fournisseurs adéquats. Ensuite, plusieurs approches d'approvisionnement sont étudiées en fonction des atouts et des contraintes qu'elles font intervenir. Puis, un choix de fournisseurs et de stratégie d'approvisionnement est effectué. Il s'en suit la rédaction d'un plan d'approvisionnement.

Les méthodes développées pour la planification de l'approvisionnement sont revues périodiquement afin qu'elles entretiennent une grande efficacité en incorporant progressivement les nouveaux travaux de recherche pertinents associés à cet enjeu.

## 4.4 Nouvelle proposition de processus d'affaires unifiée

### 4.4.1 Modélisation BPMN

En associant les trois modélisations présentées précédemment et en appliquant les recommandations de l'AACE, une nouvelle proposition est développée. Celle-ci est capable de traiter tout type de projet, qu'il soit de nature commerciale ou militaire. La nouvelle modélisation est présentée en annexe D. La bonne intégration des processus de l'AACE dans la nouvelle modélisation est justifiée en annexe E.

### 4.4.2 Description

Un projet de remise à niveau de navire s'exécute en trois phases. La première est la planification initiale. Elle prend en compte l'ensemble des activités à réaliser entre la réception d'une nouvelle demande d'un client jusqu'à la signature du contrat. La seconde est la planification détaillée. Celle-ci est réalisée entre la signature du contrat et l'arrivée du navire au quai du chantier naval. La troisième est l'exécution et le contrôle de l'avancée des travaux. Elle regroupe toutes les activités de prise en charge du navire jusqu'à la facturation.

À la réception d'une nouvelle soumission d'un client, le responsable commercial s'assure que parmi les opérations de maintenances demandées, aucune information importante ne soit manquante.

Une fois l'étape de vérification terminée, la soumission est transmise au planificateur. Si un contrat de longue durée existe avec ce client dans la base de données, celui-ci est sélectionné. À défaut, un nouveau dossier est créé avec les coordonnées du client. Une nouvelle fiche projet est ensuite associée au dossier concerné. Celle-ci comprend un code unique d'identification, un statut, le type de bateau, les spécifications demandées, la date de soumission et une plage de temps souhaitée par le client.

La fiche étant complétée, le planificateur analyse chacune des spécifications en fonction de leur niveau d'importance puis les convertit en un ou plusieurs WPs. Un premier WBS est développé. Pour chaque lot de travail, les contraintes physiques et géospatiales sont étudiées en fonction des caractéristiques du navire. Le processus d'estimation peut débuter grâce aux informations disponibles caractérisant les WPs.

Un collaborateur expérimenté ou une équipe est nommé responsable de l'estimation des données agrégées par le planificateur.

Afin de connaître les ressources disponibles pour l'horizon souhaité, le planificateur évalue la capacité disponible des quais, de la cale sèche et des ressources pour les périodes concernées. En parallèle, l'équipe responsable des estimations détermine les charges de travail nécessaires et les ressources requises pour chaque WP, les besoins en équipement spécifiques, les délais d'approvisionnement du matériel et le budget global.

Les estimations et l'évaluation des capacités disponibles terminées, le planificateur définit un réseau à l'aide des relations de précédence caractérisant les WPs. Les dates de jalons sont établies pour segmenter l'exécution du projet en fonction de la stratégie choisie.

La résolution du problème de planification tactique séquence les WPs au cours des périodes de travail en respectant les délais d'approvisionnement et les capacités disponibles à l'aide d'un outil dédié. Celui-ci est développé en collaboration entre le planificateur et une équipe d'expert. En fonction des spécifications à réaliser, les ressources critiques sont identifiées afin qu'une attention particulière soit accordée à la planification des activités les nécessitant. Les profils d'utilisations pour chaque type de ressources sont également optimisés puis documentés. À l'aide d'exigences spécifiques, une sélection des fournisseurs et des sous-traitants potentiels est établie. Les différentes responsabilités sont par la suite affectées aux équipes internes et externes du chantier naval. Les plans agrégés sont ensuite évalués de façon proactive à l'aide de mesure de robustesse puis des mesures de performance sont également proposées afin de permettre de contrôler l'exécution du projet.

À l'aide des informations obtenues précédemment, un premier budget est calculé en prenant en compte les estimations de coût, la marge de profit et la sous-traitance. Celui-ci est divisé en plusieurs blocs pour chaque partie du projet afin de contrôler les dépenses liées à son exécution. Des indicateurs de performance sont également développés afin d'analyser facilement les différences entre les coûts réels et les coûts estimés.

Une revue de la stratégie d'exécution du projet, du plan agrégé et des estimations de coûts est ensuite réalisée en effectuant une analyse des risques. En associant le gestionnaire de projet, le planificateur, l'équipe d'estimation et des spécialistes, si besoin, une identification des éléments de risques importants, des probabilités et des impacts potentiels est menée à l'aide d'une analyse

qualitative et quantitative. Des plans d'action sont développés afin de traiter rapidement et efficacement tout type d'événement imprévu pouvant intervenir. Une vérification qu'aucun élément important ne soit manquant est également menée. Une étude permettant d'évaluer différentes approches d'approvisionnement est effectuée afin de décider quelle stratégie adopter. En fin d'étude, le comité prend la décision de continuer ou non en fonction de la difficulté à mener à bien le projet. Si l'étude précédente concerne un projet déjà prévu dans un contrat, le chantier naval ne pourra pas simplement refuser le projet. Une négociation entre les deux parties doit être réalisée afin que le projet devienne acceptable. S'il est poursuivi, une revue des estimations est réalisée pour prendre en compte les actions de mitigations. Le WBS et le plan de projet initial peuvent être mis à jour si besoin.

Les étapes de planification initiale étant terminées, une proposition est envoyée au client comprenant un coût et une durée totale estimée pour des spécifications données. Le plan d'exécution agrégé lui est également communiqué. Un contrat est rédigé puis signé si le client accepte la proposition. Dans le cas contraire, le client peut choisir entre l'abandon du projet ou revoir l'étendue des travaux souhaités afin que le chantier naval puisse établir une nouvelle proposition.

La phase de planification détaillée débute par le développement du WBS jusqu'au niveau de chaque activité. Pour chaque opération, les procédures de travail sont rédigées.

Le WBS terminé, le planificateur construit un réseau d'activités. En parallèle, l'équipe d'estimation établie les ressources, les équipements et les temps d'exécution requis pour chaque activité.

Après avoir effectué un inventaire des matières premières disponibles dans l'entrepôt du chantier naval, le planificateur établit un plan d'approvisionnement avec les fournisseurs sélectionnés pour les matériaux manquants. Dans le cas militaire, une liste du matériel nécessaire est envoyée au gouvernement qui se chargera de l'acheminement des pièces jusqu'au chantier naval.

La création d'un ordonnancement temporel en fonction des ressources disponibles et des contraintes spécifiques du bateau et du chantier naval conclut la phase de planification détaillée. Une copie de l'ordonnancement est ensuite envoyée à chaque équipe responsable de l'exécution d'une partie du projet. Les profils d'utilisation des ressources détaillés sont également documentés.

Concernant le suivi de projet, les contrôles sont effectués au niveau des WPs et non des activités. En cas d'ajout de spécifications de la part du client ou de la découverte d'un défaut, une procédure formelle

de gestion de demandes de changement de la charge de travail est mise en place. Celle-ci identifie le problème rencontré, détermine l'ampleur de l'imprévu et le communique au client si besoin. Si la perturbation est importante, une ou des solutions techniques sont proposées à l'aide de spécialistes avec une évaluation des estimations des charges de travail et de coûts. Après réflexion, le client décide s'il souhaite incorporer l'exécution d'une des solutions proposées au plan. Si oui, le WBS est mis à jour avec l'ajout d'un nouveau WP. Le budget et le plan d'approvisionnement sont également revus.

Périodiquement, de nouvelles analyses des risques sont effectuées au cours des activités de contrôle afin d'intégrer les nouveaux éléments apparus au cours de l'exécution du projet.

Lorsque le projet se termine, un rapport détaillant précisément l'exécution de la maintenance est rédigé puis envoyé au client. Celui-ci contrôle les travaux effectués par rapport aux spécifications initialement demandées. À l'approbation du projet, une facturation est établie. Dans le cas de longues interventions, une organisation avec plusieurs rapports intermédiaires et une facturation périodique peut être mise en place.

#### **4.4.3 Description des données d'entrées et de sorties pour chaque activité ou sous-processus de planification**

Pour chaque activité ou sous-processus présenté dans la nouvelle modélisation, une liste des données d'entrées nécessaires au bon déroulement de ceux-ci est explicitée en figure 4.15. Les résultats attendus sont également précisés.

Activity	Inputs	Output
1.2 Create a new folder with customer information in the database system	Customer information	Folder with customer information
1.3 Create a new project in the customer folder	Customer information, work specifications, Proposal of workperiod made by the applicant, Type of ship, Ship age, Date of submission, Priority levels	Project sheet with work specifications, proposal of workperiod made by the customer type of ship, ship age, date of submission and priority levels
1.4 Convert work specifications into work packages	Project sheet with customer information, work specifications, Proposal of workperiod made by the applicant, type of ship, ship age, date of submission and priority levels; Previous project (historic data)	Work packages with priority levels
1.5 Develop WBS (work packages level)	Work packages, Previous project (historic data)	WBS up to work packages level
1.6 Modify WBS	Initial WBS, Work specifications updated	WBS updated
1.7 Identify estimator in charge of preliminary estimates	WBS, technical team available	Estimator in charge for the preliminary estimates
1.8 Evaluate available capacity of the dock, dry-dock and human resources during the workperiod project	Total capacity of the dock, dry-dock and human resources. Capacity occupied by other project during the workperiod	Available capacity of the dock, dry dock and human resources during the workperiod
2 Work package workload, cost and long lead-time estimation	Experience of the estimator in charge, work packages, type of ship, ship age, suppliers information; Previous project (historic data)	Estimation of workload by profession, resources, equipment, supply delays and total cost for each work package
1.9 Define Milestones and precedence relationship between work packages	WBS, geospatial constraints, technical constraints; Previous project (historic data)	Precedence relationship between work packages
3 Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions	Proposal of workperiod made by the applicant, Estimation of workload by profession, resources, equipment, supply delays for each work package; Precedence relationship, Available shipyard capacities, Subcontracting decisions; Previous project (historic data)	Project milestones
1.11 Calculate project cost	Estimation of total cost for each work package executed, subcontracting tariff; Past work packages (historic data)	Initial project cost
4 Project risk assessment	WBS, Previous project (historic data), Proposal of workperiod made by the applicant, Available shipyard capacities, Subcontracting decisions, Project milestones, Initial project cost, Supply delays, Estimation of workload by profession, resources and equipment, type of ship. Experience of the planner, estimator and technical specialist	Identification of important risk elements, their probabilities and their potential impact followed by the development of an action plan
1.12 Modify WBS, cost estimate and project plan according to risk mitigation decisions	Initial WBS, Proposal of workperiod made by the applicant, risk elements with their probabilities and their potential impact. Action plan	WBS updated
5 Work procedure development	WBS, Estimation of workload by profession, resources, equipment, supply delays and total cost, Geospatial constraints, Emissions and radiations constraints, Technical constraints	Work procedure established
1.19 Refine WBS (activity level)	WBS up to work package level, Work specifications, Type of ship	WBS up to activity level
1.20 Develop activity network with precedence relationship	WBS up to activity level, Precedence relationship	Activity network with precedence relationship
1.21 Check materials in stock	Estimation of materials and equipment needed for each work package, Available materials,	Request for purchase order
6 Estimation of resources required for each activity	WBS up to activity level, Experience of the estimator, Previous project (historic data)	Estimation of resources and materials required for each activity
1.22 List expensive materials needed for the repair	Estimation of materials and equipment needed for each work package	List of expensive equipment needed for the repair
1.23 Establish supply plan	Activity network, Supply delays, Capacities of the shipyard, Project milestones, Workperiod, Subcontracting decision	Supply plan
1.24 Schedule project activities	Activity network, Priority levels, Supply plan, Subcontracting decisions, Estimation of resources and materials, Available capacities of the shipyard, Geospatial constraints, Technical constraints, Project milestones, Work procedure	Schedule of the activities
1.29 Estimate the cost generated by the technical solutions to execute the new work	Technical solutions proposed by the technical specialist, Experience of the estimator, Resources and materials required to fix the new work	Cost generated by the technical solution to execute the new work proposed by the technical specialist
1.31 Modify contract	Initial contract, Technical solution proposed to execute the new work	Contract updated
1.32 Reschedule project	Initial schedule, New work package to execute the new work	Schedule updated

Figure 4.15 Données d'entrées et de sorties de chaque activité ou sous-processus de planification pour la nouvelle modélisation

#### 4.4.4 Modèle de données

Associé à cette proposition, un modèle de donnée soutenant la nouvelle modélisation est proposé en figure 4.16. Celui-ci permet de décrire les relations entre les entités principales afin d'aider son incorporation au sein d'un système intégré de gestion d'entreprise.

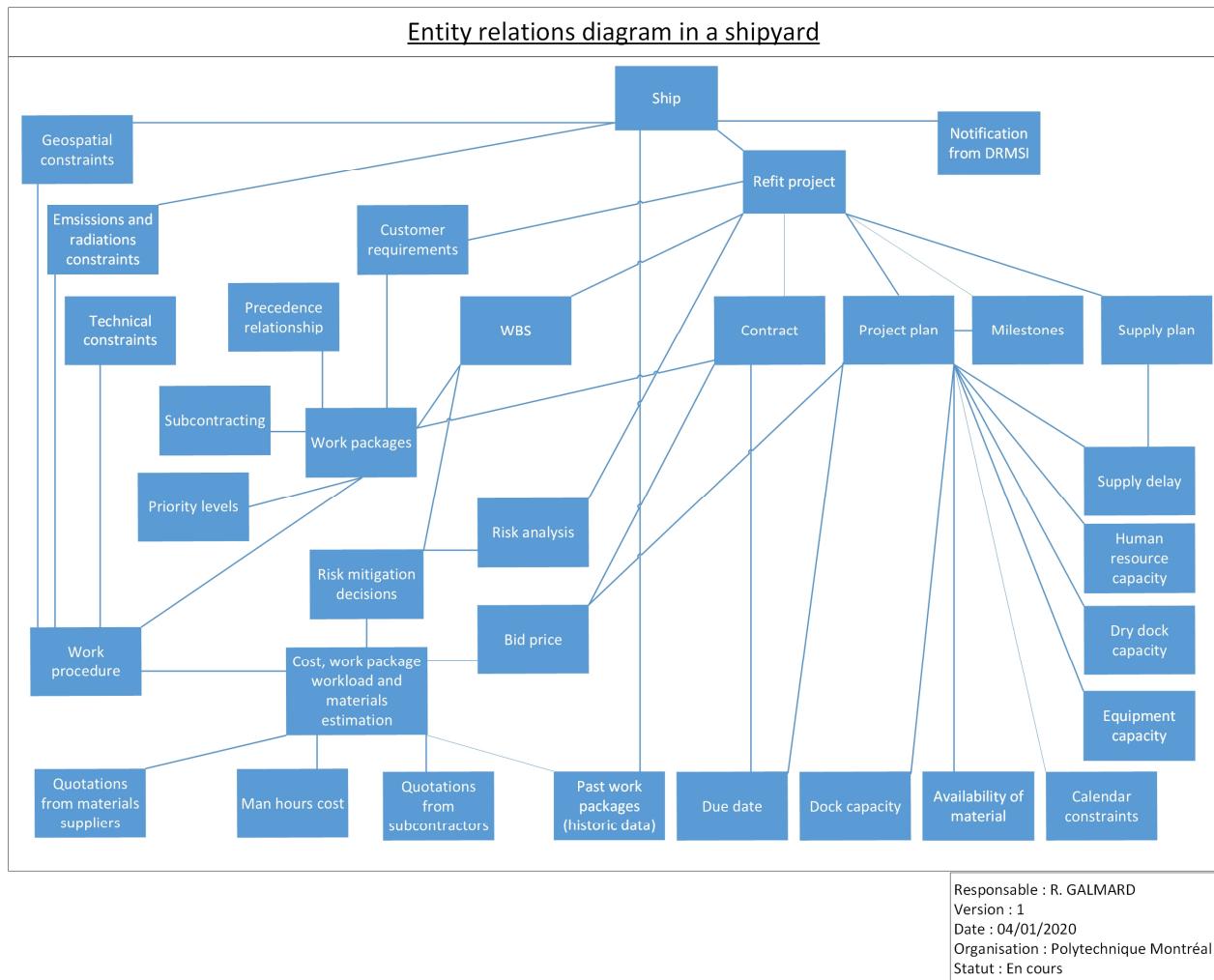


Figure 4.16 Diagramme d'entités relations pour la gestion des activités de planification du processus unifié proposé

#### 4.4.5 Validation par un comité d'expert

Pour valider la nouvelle proposition de processus d'affaires, un comité d'expert travaillant sur le développement de logiciel de planification pour la maintenance de navire a été convié le 10 novembre 2020. Il était composé de plusieurs professeurs d'université, d'ingénieurs et de gestionnaires de projet. À la suite d'une présentation, un temps d'échange a permis d'obtenir une rétroaction. L'enjeu de planification initiale n'étant pas traité dans les solutions existantes, son incorporation dans les modèles actuels ne pose aucun conflit de grande envergure. Le développement d'un processus détaillant précisément les différentes étapes d'estimations nécessaires à l'obtention de données fiables a été soutenu par certains membres du comité. De même, le contexte d'exécution pouvant varier d'un projet à un autre, la possibilité d'utiliser uniquement un seul processus unifié est un grand atout qui a été mis en avant au cours des échanges. Finalement, l'utilisation des recommandations de l'AACE au cours du développement de la proposition afin de vérifier que l'ensemble des enjeux de planification sont intégrés a été appréciée.

### 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, trois modélisations de processus d'affaires utilisés dans des contextes différents pour la maintenance de navires ont été analysées. Pour chacune d'entre elles, un modèle de données a été développé afin de visualiser les relations entre chaque entité importante et une étude des données d'entrées et de sorties de chaque activité ou sous-processus a été menée. En parallèle, les recommandations du TCM concernant les processus de planifications ont été documentées.

À l'aide de ces travaux, une nouvelle modélisation et un modèle de donnée ont été développés en intégrant tous les aspects de la gestion de projet et les spécificités de chaque contexte. Afin de juger de la pertinence de cette modélisation, celle-ci a été approuvée par des experts du domaine.

## **CHAPITRE 5 PROPOSITION DE MODÈLE DE PLANIFICATION AGRÉGÉ**

### **5.1 Introduction**

La seconde partie de ce mémoire s'intéresse au développement d'un modèle de planification tactique afin d'aider un planificateur lors d'élaboration d'une proposition de délai. Sa réalisation repose sur l'adaptation d'un modèle existant générique développé par Cherkaoui (2017) qui s'intéresse à la planification tactique de grands projets.

Pour adapter ce modèle au contexte de la maintenance de navires, une nouvelle fonction objectif et de nouvelles contraintes viennent s'ajouter au modèle existant. Un travail de recherche de Bertrand (2020) portant sur la planification détaillée de maintenance de navires militaire prenant en compte les spécificités d'un projet de remise à niveau est principalement utilisé pour effectuer l'adaptation.

### **5.2 Proposition**

Ce chapitre est découpé en trois parties distinctes. Dans un premier temps, le modèle RCCP générique fournissant un socle de construction au développement du nouveau modèle est présenté. Puis, le modèle RCPSP détaillant les contraintes et les objectifs de planification spécifiques à la remise à niveau de navires est exposé. Finalement, les modifications apportées au modèle de Cherkaoui (2017) permettant l'obtention de la nouvelle proposition sont précisées.

#### **5.2.1 Modèle RCCP utilisé**

Dans ses travaux, Cherkaoui (2017) généralise le modèle de Haït et Baydoun (2012). Celui-ci a été choisi, car il permet de représenter les dates de début et de fin des WPs à l'aide de variables continues et de définir les contraintes de ressources pour chaque période à l'aide de variables discrètes. Les relations de précédence sont ainsi plus facilement modélisables comme expliquées dans la revue de littérature. Les deux variantes du problème RCCP *Time Driven* et *RCCP Resource Driven* sont traitées. Le modèle est présenté ci-après.

### 5.2.1.1 Données d'entrées :

Soit un horizon de planification  $H$  découpé en périodes (ensemble  $P$ ). À chaque période  $p$  est associée une durée  $D_p$  (exprimée en semaines) d'indice  $p$ . Pour chaque lot  $i$  de l'ensemble des lots de travaux  $I$ , un sous-ensemble de ressources indépendantes (indice  $r$ ) de l'ensemble  $R$  est nécessaire pour son exécution. Des contraintes de précédence de type fin-début relient les lots de travaux entre eux. Pour chaque lot  $i \in I$ , un ensemble  $Pred_i$  spécifie tous les prédecesseurs directs de  $i$ . La charge de travail total  $Q_i$  (exprimée en heures-hommes) d'un lot  $i$  est la somme des charges requises  $Q_{ri}$  de chaque groupe de ressource  $r$ . Une hypothèse sur l'additivité des ressources est considérée afin de faciliter la modélisation. Un lot peut nécessiter l'utilisation de plusieurs groupes de ressources simultanément. Lors de l'utilisation de plusieurs groupes de ressources, la proportionnalité entre les groupes est supposée constante sur toutes les périodes où le lot  $i$  est exécuté. Les charges de travail maximale et minimale qui peuvent être assignées à un lot  $i$  au cours d'une semaine à cause de différentes contraintes sont représentées par  $Q_i^{max}$  et  $Q_i^{min}$ . Une date de lancement  $RD_i$  limite la date de début de chaque lot  $i$ . Les paramètres  $K_{rp}$  définissent les capacités pour chaque groupe de ressources internes  $r$  disponibles au cours de la période  $p$ . Un coût d'utilisation  $C_{rp}$  est défini pour chaque unité de ressource  $r$  utilisée au cours de chaque période  $p$ .

### 5.2.1.2 Contraintes :

La résolution de ce problème est sujette à quatre catégories de contraintes différentes :

- Les contraintes qui déterminent les dates de début et de fin des lots dans les périodes;
- Les contraintes qui spécifient les durées des lots dans les périodes;
- Les contraintes de temps et les relations de précédence; et
- Les contraintes de capacité.

### Variables :

- $ts_i, tf_i$  : Date de début et de fin du lot de travail  $i$ .
- $zs_{ip}$  : Variable binaire qui vaut 1 si  $ts_i$  se trouve dans la période  $p$  ou avant et 0 sinon.
- $zf_{ip}$  : Variable binaire qui vaut 1 si  $tf_i$  se trouve dans la période  $p$  ou avant et 0 sinon.
- $d_{ip}$  : Durée du lot  $i$  durant la période  $p$  ( $0 \leq d_{ip} \leq D_p$ ).

- $x_{ip}$  : Fraction du lot  $i$  traitée durant la période  $p$  ( $0 \leq x_{ip} \leq 1$ ).
- $yint_{rp}$  : Nombre de ressources internes de type  $r$  utilisé au cours de la période  $p$ .
- $yext_{rp}$  : Nombre de ressources externes de type  $r$  utilisé au cours de la période  $p$ .
- $Cmax$  : Date de fin du projet.
- $coût$  : Coût d'utilisation des ressources externes.

$$ts_i \geq \sum_{k=1}^p D_k (1 - zs_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (1)$$

$$ts_i \leq \sum_{k=1}^p D_k + (H - \sum_{k=1}^p D_k) (1 - zs_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (2)$$

$$zs_{ip} \geq zs_{ip-1} \quad \forall i \in I, p \in P \setminus \{1\} \quad (3)$$

$$tf_i \geq \sum_{k=1}^p D_k (1 - zf_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4)$$

$$tf_i \leq \sum_{k=1}^p D_k + (H - \sum_{k=1}^p D_k) (1 - zf_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (5)$$

$$zf_{ip} \geq zf_{ip-1} \quad \forall i \in I, p \in P \setminus \{1\} \quad (6)$$

Les contraintes (1) à (3) garantissent que les variables binaires  $zs_{ip}$  valent 1 si le lot  $i$  commence avant ou durant la période  $p$  et 0 sinon. Le même schéma est appliqué avec les dates de fin des lots pour les variables binaires  $zf_{ip}$  dans les contraintes (4) à (6).

La plage de temps occupée par le lot  $i$  au cours de la période  $p$  est représentée par  $d_{ip}$ . Cette durée est non nulle uniquement pour les périodes  $p$  respectant  $zs_{ip} - zf_{ip-1} = 1$ . Un lot  $i$  peut être positionné de six façons distinctes par rapport à une période  $p$ . Les contraintes explicitées ci-dessous permettent de traiter l'ensemble des configurations possibles.

$$d_{ip} \leq D_p(zs_{ip} - zf_{ip-1}) \quad \forall i \in I, p \in P \setminus \{1\} \quad (7)$$

$$d_{ip} \geq D_p(zs_{ip-1} - zf_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \setminus \{1\} \quad (8)$$

$$d_{ip} \geq tf_i - \sum_{k=1}^p D_k + D_p * zs_{ip-1} - H(1 - zf_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (9)$$

$$d_{ip} \geq \sum_{k=1}^p D_k(1 - zs_{ip-1}) - ts_i - D_p * zf_{ip} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P} d_{ip} = tf_i - ts_i \quad \forall i \in I \quad (11)$$

Les contraintes (7) mettent à 0 la variable  $d_{ip}$  si le lot  $i$  n'est pas exécuté au cours de la période  $p$  et limite sa durée à  $D_p$  sinon. Dans le cas où un lot  $i$  débute avant une période  $p$  et fini après celle-ci, les contraintes (8) obligent  $d_{ip}$  à être égale à  $D_p$ . Si un lot  $i$  est réalisé sur plusieurs périodes en commençant ou en se terminant dans une période  $p$ , les contraintes (9) et (10) donnent une borne inférieure à  $d_{ip}$ . Les contraintes (11) assurent que pour chaque lot  $i$ , la somme des durées exécutées dans chaque période est égale à la différence entre la date de fin et de début du lot.

De par les contraintes techniques, les besoins de certificats ou autorisations, chaque lot  $i$  possède une date  $RD_i$  avant laquelle il ne peut être exécuté (contraintes (12)).

$$ts_i \geq RD_i \quad \forall i \in I \quad (12)$$

Les relations de précédence sont respectées à l'aide des contraintes (13). La date de fin de projet  $Cmax$  est assurée grâce aux contraintes (14).

$$ts_i \geq tf_j \quad \forall i \in I, j \in Pred_i \quad (13)$$

$$Cmax \geq tf_i \quad \forall i \in I \quad (14)$$

Les contraintes de capacité ont pour objectif d'étaler les charges de travail sur l'ensemble des périodes. Les contraintes (15) assurent que la somme des charges de travail associée à chaque groupe de ressources engagées pour réaliser un certain pourcentage d'un lot  $i$  au cours d'une période  $p$  ne dépasse pas la charge maximale admissible du lot  $i$  tout au long de la durée  $d_{ip}$  qui lui est alloué.

Cette borne supérieure correspond à la charge maximale totale de tous les groupes de ressources confondus. Sur le même schéma, les contraintes (16) assurent le respect de la borne inférieure de la charge durant l'exécution d'un lot.

Les contraintes (17) assurent que lot  $i$  est exécuté en entier.

Les besoins associés à chaque groupe de ressources  $r$  nécessaires pour exécuter les différents lots de travaux pour chaque période  $p$  sont satisfaits à l'aide de ressources internes  $yint_{rp}$  et externes  $yext_{rp}$  (contraintes (18)).

Les contraintes (19) assurent que l'utilisation des ressources internes dans une période ne dépasse pas la capacité interne disponible. La variable  $coût$  est définie par la contrainte (20) comme le coût total d'utilisation des ressources externes pour tous les groupes de ressources sur toutes les périodes.

$$x_{ip} * Q_i \leq Q_i^{max} * d_{ip} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (15)$$

$$x_{ip} * Q_i \geq Q_i^{min} * d_{ip} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (16)$$

$$\sum_{p \in P} x_{ip} = 1 \quad \forall i \in I \quad (17)$$

$$yint_{rp} + yext_{rp} = \sum_{i \in I} x_{ip} * Q_{ri} \quad \forall r \in R, p \in P \quad (18)$$

$$yint_{rp} \leq K_{rp} \quad \forall r \in R, p \in P \quad (19)$$

$$coût = \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} C_{rp} * yext_{rp} \quad (20)$$

Les domaines de définition des variables sont explicités ci-dessous.

$$zs_{ip}, zf_{ip} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (21)$$

$$toutes\ les\ variables \geq 0 \quad (22)$$

### 5.2.1.3 Fonction-objectif du modèle RCCP

La distinction entre les deux variantes du problème RCCP *Time Driven* et *Resource Driven* est réalisée avec la fonction objectif. Dans le RCCP *Time Driven*, l'objectif est de minimiser l'utilisation des ressources externes pour une date limite fixée, soit dans ce modèle, la variable *coût*. Dans le RCCP *Resource Driven*, l'objectif est de minimiser la durée du projet sans utiliser de ressources externes, soit dans ce modèle, la variable *Cmax*.

## 5.2.2 Modèle RCPSP utilisé

Dans son mémoire, Bertrand (2020) s'est focalisé sur le développement de nouvelles méthodologies, de formulations et d'heuristiques pour résoudre les problèmes d'ordonnancement et de réordonnancement de projet de maintenance de navires à l'aide de plusieurs modèles de programmation linéaire mixte (Mixed Integer Programming). L'objectif lors de l'établissement d'un ordonnancement initial est de planifier en premier celles qui nécessitent la plus grande charge de travail et celles qui possèdent les niveaux de priorité les plus hauts. Le modèle est présenté ci-après.

### 5.2.2.1 Données d'entrées

Soit un horizon de planification  $H$  initialisé à zéro en début de projet. Pour chaque activité  $j \in J$ , un sous-ensemble de ressources indépendantes  $r_{jk}$  (indice  $k$ ) de l'ensemble  $R$  est nécessaire pour son exécution. Chaque groupe de ressource  $k$  a une capacité limitée  $R_k$ . Pour chaque mode  $m \in M$ , une durée  $d_{jm}$  et  $d_{im}$  sont associées aux activités  $j$  et  $i$ , respectivement. La notion de mode permet notamment d'exécuter une même activité de plusieurs façons différentes et d'inclure la possibilité de travailler en heures supplémentaires.

Soit  $P$  l'ensemble des paires d'activités ayant une relation de précédence immédiate ( $i$  prédecesseur immédiat de  $j$ ). Chaque date de début d'activité  $j$  est contrainte par une date de lancement au plus tôt  $ES_j$  et une date de lancement au plus tard  $LS_j$ .

Un niveau de priorité  $p_j$  est associé à chaque activité  $j$ . Trois niveaux de priorité existent (1, 2, 3).. Afin d'éviter l'utilisation de modes très complexes au cours de l'exécution de l'ensemble des activités, un paramètre  $\beta_{M1}$  est défini. De même, un paramètre  $\beta_{M2}$  limite le nombre total d'activités utilisant des modes alternatifs.

### 5.2.2.2 Contraintes

La résolution de ce problème est sujette à quatre catégories de contraintes différentes :

- Les contraintes qui assurent que l'unicité de l'exécution de chaque activité et du respect des dates de début;
- Les contraintes de relations de précédence;
- Les contraintes de capacité; et
- Les contraintes limitant le nombre de modes pouvant être utilisés.

Variables :

- $x_{jtm}$  : variable binaire qui vaut 1 si l'activité  $j$  débute au temps  $t$  dans le mode  $m$ , 0 sinon.

Les contraintes (23) assurent que chaque activité  $j$  débute seulement entre  $ES_j$  et  $LS_j$  et ce au maximum une seule fois.

$$\sum_{m \in M} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{jtm} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (23)$$

Les contraintes (24) assurent que la date de lancement d'une activité doit être supérieure ou égale à la date de lancement de ses prédecesseurs immédiats plus leur durée d'exécution.

$$\sum_{m \in M} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} x_{jtm} t \geq \sum_{m \in M} \sum_{t=ES_i}^{LS_i} x_{itm} (t + d_{im}) \quad \forall j \in J, \forall (i, j) \in P \quad (24)$$

Les contraintes (25) assurent que les ressources déployées à un instant  $t$  ne dépassent pas la capacité disponible de chaque type de ressource  $k$ .

$$\sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{b=\max\{t-d_{jm}+1, ES_j\}}^{\min\{LS_j, t\}} x_{jbm} * r_{jk} \leq R_k \quad \forall k \in K, \forall t \in 0 \dots H \quad (25)$$

La contrainte (26) permet de limiter l'utilisation des modes d'exécution complexes très éloignées du mode standard. Les modes les plus simples sont privilégiés.

La contrainte (27) définit le nombre maximum d'activités non exécutées dans le mode standard.

$$\sum_{j \in J} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} (x_{jt2} + 2x_{jt3} + \dots + (M-1)x_{jtM}) \leq \beta_{M1} \quad (26)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} (x_{jt2} + x_{jt3} + \dots + x_{jtM}) \leq \beta_{M2} \quad (27)$$

Les domaines de définition des variables sont explicités ci-dessous.

$$x_{jtm} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, t \in ES_j \dots LS_j, m \in M \quad (28)$$

### 5.2.2.3 Fonction objectif du modèle RCPSP

La fonction objectif a pour but de maximiser le produit des trois termes associés à chaque activité

Un paramètre  $\theta \geq 0$  est utilisé afin d'ajuster un poids d'importance des activités en fonction de leur priorité au cours de la résolution du problème. Pour prendre en compte la durée consacrée à la clôture de chaque phase, un paramètre  $\varepsilon_1 \geq 0$  est défini. Une pénalisation est mise en place sur les activités planifiées tardivement à l'aide du paramètre  $\varepsilon_2 \geq 0$ . Si un objectif est de privilégier la planification des activités avec une longue durée d'exécution, une valeur de 1,1 est associée à un paramètre  $\alpha$ , 1 sinon.

Le premier est relatif à la durée, le second concerne le niveau de priorité et finalement le dernier s'intéresse à la date de lancement de l'activité.

$$\text{Maximize} \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} \sum_{t=ES_j}^{LS_j} \frac{x_{jtm}}{p_j^\theta} (\varepsilon_1 + d_{j1})^\alpha (1 - \varepsilon_2 t) \quad (29)$$

### 5.2.3 Nouvelle proposition

Pour développer la nouvelle proposition, le modèle RCCP générique a été adapté au contexte de la maintenance de navire à l'aide du modèle RCPSp de Bertrand (2020) traitant de la planification détaillée de projets de remise à niveau pour la RCN. Les modifications apportées au modèle RCCP sont décrites dans les sous-sections suivantes :

#### 5.2.3.1 Données d'entrées :

La nouvelle proposition reprend les données d'entrées du modèle RCCP générique mais transforme la variable  $Cmax$  en paramètre afin que le planificateur puisse spécifier une date maximale de fin de projet. D'autres paramètres supplémentaires sont également incorporés afin de prendre en compte les particularités des projets à traiter. Tous les lots ne devant pas obligatoirement être exécutés, une priorité  $Prior_i$  est assignée à chaque lot  $i$  afin d'ordonnancer en premier les lots les plus importants. La prise en compte des longs délais de livraison est considérée à l'aide du paramètre  $Livr_i$  pour chaque lot  $i$ . Associé à la date de fin de projet  $Cmax$ , une date de lancement  $Debut$  est modélisée. Finalement, une distinction entre les capacités régulières internes  $Kint_{rp}$  et les capacités régulières externes  $Kext_{rp}$  disponibles pour chaque groupe de ressources  $r$  et période  $p$  est établie.

#### 5.2.3.2 Contraintes :

Le modèle est sujet aux mêmes catégories de contraintes que le modèle RCCP de base :

- Les contraintes qui déterminent les dates de début et de fin des lots dans les périodes;
- Les contraintes qui spécifient les durées des lots dans les périodes
- Les contraintes de temps et les relations de précédence; et
- Les contraintes de capacité.

### Variables :

- Variables du modèle RCCP générique.
- $wf_{it}$  : Variable binaire inspiré du modèle RCPSP qui vaut 1 si  $tf_i = t$ , 0 sinon.

Les contraintes (1) à (11) déterminant les dates de début et de fin des lots dans les périodes ainsi que les contraintes spécifiant les durées des lots dans les périodes sont reprises à l'identique.

Afin de compléter le modèle RCCP initial, de nouvelles contraintes sont ajoutées. Les contraintes (30) assurent que pour chaque lot  $i$ , sa date de lancement est supérieure aux délais d'approvisionnement des pièces nécessaires à son exécution.

$$ts_i - Livr_i \geq Debut \quad \forall i \in I \quad (30)$$

Les contraintes (31) assurent que chaque lot de travail est exécuté au maximum une seule fois. Les contraintes (32) permettent de faire correspondre les variables binaires  $wf_{it}$  avec les dates de fin des lots.

$$\sum_{t=Debut}^H wf_{it} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (31)$$

$$\sum_{t=Debut}^H wf_{it} * t = tf_i \quad \forall i \in I \quad (32)$$

Afin de distinguer les capacités de ressources internes et externes disponibles, les nouvelles contraintes (33) et (34) viennent remplacer les contraintes (19) du modèle générique.

$$yint_{rp} \leq Kint_{rp} \quad \forall r \in R, p \in P \quad (33)$$

$$yext_{rp} \leq Kext_{rp} \quad \forall r \in R, p \in P \quad (34)$$

Les domaines de définition des nouvelles variables venant compléter le modèle initial sont explicités ci-dessous.

$$wf_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, p \in P, t \in [Debut, Cmax] \quad (35)$$

### 5.2.3.3 Fonction-objectif du modèle RCCP adapté:

La fonction objectif associée au nouveau modèle RCCP est flexible afin qu'elle puisse s'adapter à n'importe quel contexte de remise à niveau de navires. Celle-ci est inspiré des travaux développés par Bertrand (2020). En effet, les objectifs de planification varient d'un chantier naval à un autre. Afin de permettre au planificateur de proportionner les différents termes de la fonction, des coefficients  $\lambda$  sont utilisés. Les objectifs pouvant être recherchés sont :

- Maximiser l'exécution des lots de travaux qui ont une forte priorité ( $\lambda_{Priorite}$ );
- Maximiser l'exécution des lots de travaux qui ont une charge de travail importante ( $\lambda_{Charge}$ );
- Minimiser la date de fin des lots de travaux ( $c \lambda_{makespan}$ );
- Minimiser l'utilisation de ressources externes (sous-traitance, ...) ( $\lambda_{Cout}$ ); et
- Maximiser l'utilisation des ressources internes au plus tôt dans le projet puis les libérer le plus rapidement possible ( $\lambda_{Nivellement}$ ).

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize} \sum_{i \in I} \sum_{t=Debut}^{Cmax} w_{fit} \left( \frac{1 + \lambda_{Charge} * t * Q_i^{1.1}}{(t * Prior_i)^{\lambda_{Priorite}}} \right) \left( 10 - \frac{\lambda_{makespan}}{Cmax^4} t^4 \right) - \lambda_{Cout} * cout \\
 & + \lambda_{Nivellement} * \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} y_{int_{rp}} / p
 \end{aligned} \tag{36}$$

## 5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle RCCP générique identifié dans la littérature associé à la planification tactique de grands projets a été présenté. Afin d'adapter ce modèle au contexte de la maintenance de navires, un modèle RCPSP prenant en compte les spécificités des projets réalisés dans des chantiers navals a également été exposé. Le nouveau modèle RCCP repose principalement sur une flexibilisation de la fonction objective du modèle RCPSP et l'ajout de nouvelles contraintes au modèle RCCP initial.

Afin de juger de la pertinence de ce nouveau modèle, celui-ci doit à présent être validé à l'aide d'expérimentations.

## CHAPITRE 6 EXPÉRIMENTATION

### 6.1 Introduction

Dans ce chapitre, une expérimentation du modèle RCCP développé dans la section 5.2.3 est conduite afin d'identifier son comportement et d'évaluer ses performances par rapport à des projets de taille et de nature différentes. Celle-ci est complétée par une étude sur les temps de calcul.

### 6.2 Génération d'instances de projets

Dans ses travaux, De Boer (1998) a proposé une méthodologie pour générer automatiquement des instances de projets liées aux problèmes RCCP. Celles-ci sont caractérisées par deux paramètres N et K associés au nombre de lots de travaux et aux groupes de ressources. Neuf classes d'instances sont créées en permettant à N de prendre les valeurs 10, 20 ou 50 et K les valeurs 3, 10 ou 20. Chaque lot i peut nécessiter entre 1 à 5 groupes de ressources suivant la loi uniforme discrète parmi les K associés au projet. Dans le cas où K=3, le nombre maximum de groupes de ressources affectés à un lot i est diminué à 3.

Pour chaque classe, l'horizon de planification est fixé à 40, puis il est découpé en périodes de durées égales à 4. Une durée minimale  $D_{min}$  comprise dans l'intervalle [1,5] est affectée à chaque lot i en utilisant la loi uniforme discrète. De même, une charge maximale  $Q_{ri}^{max}$  dans l'intervalle [1-20] est assignée à chaque lot i pour chaque groupe de ressources r sur toutes les périodes p. Pour tous les groupes de ressources non utilisés,  $Q_{ri}^{max}$  est mis à zéro.

Pour prendre en compte les spécificités liées au problème *resource-driven*, Cherkaoui (2017) a introduit les paramètres supplémentaires :

- $Q_{ri}$  : Charge requise du lot i pour le groupe de ressources r; et
- $Q_i^{max}$  : Charge maximale pouvant être associée au lot i durant une période p.

Les charges  $Q_{ri}$  sont définies par  $Q_{ri} = D_{min} * Q_{ri}^{max}$  et les charges maximales  $Q_i^{max}$  par  $Q_i^{max} = \sum_{r \in R} Q_{ri}^{max}$ .

Pour prendre en compte les spécificités liées au projet de remise à niveau, les relations de précédence sont définies comme suit :

- 70% des chemins du réseau comportent un seul lot de travail;
- 20% des chemins du réseau comportent deux lots de travaux; et
- 10% des chemins du réseau comportent trois lots de travaux.

Toutes les variables  $Livr_i$  et  $RD_i$  sont fixées à zéro pour plus de simplicité. La date de fin maximale et de début de projet  $Cmax$  et  $Debut$  sont établies respectivement à 40 et 0.

L’allocation des niveaux de priorité est définie de la manière suivante :

- 20% des lots de travaux ont un niveau de priorité égale à 1 (Niveau important);
- 30% des lots de travaux ont un niveau de priorité égale à 2 (Niveau moyen); et
- 50% des lots de travaux ont un niveau de priorité égale à 3 (Niveau facultatif).

Afin d’assurer l’existence d’une solution réalisable, les capacités des ressources sont établies à l’aide d’un algorithme. Celui-ci débute par la construction d’une solution lissée sur l’ensemble de l’horizon afin de minimiser le minimum de marge totale en supprimant les contraintes de ressources. Cette stratégie permet d’établir une solution avec des durées de lots maximales, puis de déterminer les utilisations périodiques des ressources en admettant que les lots sont exécutés avec une exploitation uniforme des ressources. Ensuite, un calcul des capacités de ressources adéquates est effectué. L’algorithme est présenté dans la figure 6.1.

#### Paramètres de l’algorithme de construction de solutions réalisables

- $ES_i, EF_i$  : Dates de début et de fin au plus tôt du lot de travail i
- $LS_i, LF_i$  : Dates de début et de fin au plus tard du lot de travail i
- $MT_i$  : Marge totale du lot de travail i
- $d_{ip}$  : Durée du lot i sur la période p
- $d_i$  : Durée totale du lot i
- $Lmax$  : Le plus grand nombre de lots sur un chemin
- $Q_{ri}$  : Charge du groupe de ressources r du lot i
- $U_{rp}$  : Charge d’utilisation du groupe de ressources r au cours de la période p
- $K_{rp}$  : Capacité du groupe de ressources r au cours de la période p

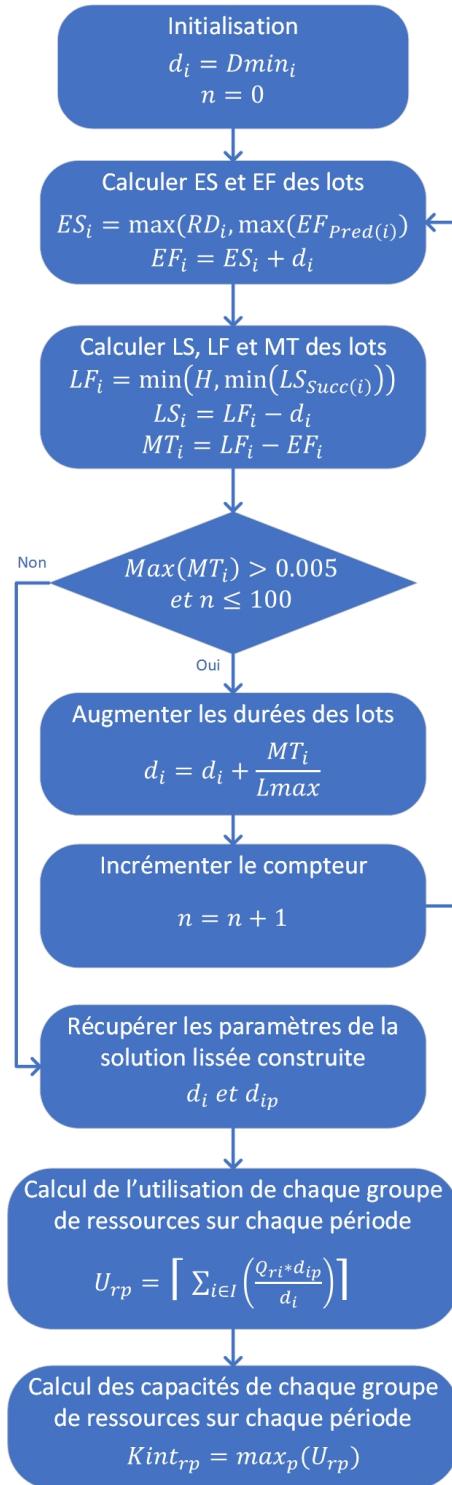


Figure 6.1 Algorithme de construction d'une solution réalisable au cours de la génération d'une instance de projet

En appliquant ce processus à chaque instance, l'existence de solutions réalisables est garantie au cours des résolutions avec le modèle d'optimisation. Pour les simulations où le paramètre  $\lambda_{cout}$  est non nul, les capacités  $Kext_{rp}$  sont définies aux mêmes niveaux que les capacités  $Kint_{rp}$ . Dans le cas contraire, les capacités  $Kext_{rp}$  sont fixées à zéro. La valeur 1 est associée à tous les paramètres  $Cout_{rp}$ .

## 6.3 Expérimentation

La fonction objectif étant très modulable, l'étude expérimentale c'est focalisée sur cinq combinaisons possibles de trois aspects:

1. Minimiser la date de fin de projet
2. Exécuter en premier lieu les lots de travaux possédant les niveaux de priorités les plus importants
3. Minimiser la date de fin de projet et exécuter en premier les lots de travaux possédant les niveaux de priorités les plus importants
4. Minimiser la date de fin de projet tout en limitant le coût d'utilisation des ressources externes
5. Exécuter en premier lieu les lots de travaux possédant les niveaux de priorités les plus importants tout en limitant le coût d'utilisation des ressources externes

### 6.3.1 Analyse du temps de calcul

La pertinence de notre modèle de calcul va en premier temps être évaluée en analysant les temps de calcul nécessaires à la résolution des différentes classes d'instances et objectifs recherchés. Le délai de résolution est un aspect important pour le confort d'utilisation et la viabilité du modèle. Les expérimentations ont été conduites à l'aide du solveur CPLEX 20.1.0.0 en utilisant une grille de calcul de 26 PCs comportant des processeurs 3.07 GHz Intel® Xeon® X5675 sous Linux. Le code du modèle mathématique ainsi qu'un exemple de résolution d'un projet est présenté en annexe F.

Les résolutions étant plus ou moins complexes en fonction des projets générés, les temps sont calculés en effectuant une moyenne sur 10 projets pour chaque classe d'instance.

Les temps CPU pour résoudre les problèmes répondant à l'objectif de date de fin de projet ( $\lambda_{makespan} = 6$ ) sont présentés dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 Temps de calcul (en secondes) pour l'objectif de date de fin de projet

	N=10	N=20	N=50
K=3	0,93	1,93	10,45
K=10	1,05	6,47	28,08
K=20	1,21	13,78	45,69

On remarque que les temps de calcul évoluent exponentiellement avec le nombre de lots de travaux. Cependant, avec une durée de 45,69 secondes pour un projet de 50 lots de travaux avec 20 ressources, le temps de calcul reste très raisonnable. Une comparaison avec les temps de résolution du modèle original du Cherkaoui (2017) est présentée dans le tableau 6.2.

Tableau 6.2 Temps de calcul (en secondes) avec le modèle Cherkaoui (2017)

	N=10	N=20	N=50
K=3	0,31	0,86	2,92
K=10	0,53	1,65	5,88
K=20	0,83	2,32	12,12

Les temps de résolution obtenus avec le modèle de Cherkaoui sont moindres. Toutefois, le nouveau modèle développé reste acceptable.

Concernant l'objectif de priorité ( $\lambda_{priorité} = 2$ ), les temps CPU sont présentés dans le tableau 6.3.

Tableau 6.3 Temps de calcul (en secondes) pour l'objectif de priorité

	N=10	N=20	N=50
K=3	1,81	7,69	284,7
K=10	2,5	20,17	860,42
K=20	2,61	21,86	1392,19

Contrairement aux temps de calcul de l'objectif de date de fin de projet, les temps de résolution liés à l'objectif de priorité sont plus importants, notamment pour les grands projets.

Cependant, pour un contexte de planification initial où l'horizon de planification est de l'ordre de 3 à 6 mois, un temps de calcul de 23 minutes est admissible.

Les temps CPU liés à la recherche simultanée des objectifs 1 et 2 ( $\lambda_{Makespan} = 6$  et  $\lambda_{Priorité} = 2$ ) sont exposés dans le tableau 6.4.

Tableau 6.4 Temps de calcul (en secondes) pour l'objectif simultané de makespan et de priorité

	N=10	N=20	N=50
K=3	2,17	11,77	428,13
K=10	2,77	21,45	761,64
K=20	2,88	25,54	1100,33

On remarque que lorsque les objectifs de priorité et de date de fin de projet sont combinés, les temps de résolution sont similaires à ceux de l'objectif de priorité seul pour les projets de petite et moyenne envergure. Néanmoins, pour les grands projets, il semble que les temps de calcul diminuent. Afin de tester le modèle sur de très grands projets, une expérimentation avec une instance comportant 100 lots de travaux et 20 groupes de ressources a été conduite. Celle-ci n'a pas pu aboutir à cause d'un nombre de variables trop important provoquant des problèmes dans la gestion de la mémoire vive.

Les tableaux 6.5 et 6.6 représentent les temps de calcul liés aux objectifs de date de fin de projet ( $\lambda_{Makespan} = 6$  et  $\lambda_{Coût} = 0.001$ ) et de priorité ( $\lambda_{Priorité} = 2$  et  $\lambda_{Coût} = 0.001$ ) en considérant cette fois-ci l'utilisation de ressources externes.

Tableau 6.5 Temps de calcul (en secondes) pour l'objectif simultané de makespan et de coût

	N=10	N=20	N=50
K=3	0,61	1,43	4,44
K=10	0,78	8,02	18,37
K=20	1,12	14,77	47,69

Tableau 6.6 Temps de calcul (en secondes) pour l'objectif simultané de priorité et de coût

	N=10	N=20	N=50
K=3	1,22	10,52	237,36
K=10	1,92	24,6	527
K=20	2,16	28,53	948,24

On remarque que l'ajout de ressources externes modifient très peu les complexités de résolution.

Maintenant que les temps de calcul associés aux différentes classes d'instances ont été analysés, une étude examinant l'influence des coefficients de la fonction objective est présentée dans la section suivante.

### 6.3.2 Analyse de sensibilité

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence des valeurs des coefficients  $\lambda$  sur la performance du modèle en fonction des objectifs recherchés.

#### 6.3.2.1 Mesures de performance

Afin de pouvoir quantifier et comparer les performances des solutions générées, les mesures de performances suivantes sont proposées :

$$Makespan = Date de fin de projet - Date de début de projet \quad (37)$$

Le makespan est la durée totale entre le début et la fin d'un projet. On peut considérer que plus celui-ci est faible, plus la solution est performante.

$$Buffer P\_1 = \frac{Date de fin de projet - Date de fin de la dernière activité de priorité 1}{Durée de projet} \quad (38)$$

L'indicateur *Buffer P\_1* est défini comme le pourcentage du makespan où seulement des lots de niveaux de priorités 2 et 3 sont ordonnancés en fin du projet. Un pourcentage élevé signifie que les lots de priorité 1 se terminent tôt dans le projet.

Dans le cas où certains lots importants dépassent les délais initialement prévus, ceux-ci pourront tout de même être exécutés en intégralité en annulant ou déplaçant des lots moins importants. On peut considérer que plus celui-ci est élevé, plus la solution est performante.

$$Avg centroid P\_1 = \sum_{j \in J} \frac{x_{j\_start} + x_{j\_finish}}{2 * n_{pri\_1}} d_j \quad (39)$$

Afin de connaître de manière générale comment sont positionnés les lots de priorité 1 dans l'horizon de planification, Bertrand (2020) a développé l'indicateur *Avg centroid P\_1*. Ce critère définit le positionnement central du lot moyen en termes d'unités de temps pondérées par les durées des lots. Une valeur de 200 jours signifie par exemple que les lots de priorité 1 ont une durée d'environ 10 jours positionnés en moyenne 20 jours après le début du projet. Pour définir cet indicateur, l'ensemble *J* des lots de travaux de priorité 1 est utilisé. Le paramètre *n<sub>pri\_1</sub>* représente le nombre de lot de priorité 1, *x<sub>j\_start</sub>* représente la date de début du lot *j*, *x<sub>j\_finish</sub>* représente la date de fin du lot *j* et *d<sub>j</sub>* représente la durée du lot *j*.

$$Avg centroid = \sum_{i \in I} \frac{x_{i\_start} + x_{i\_finish}}{2 * n} d_i \quad (40)$$

En appliquant le même raisonnement que la mesure précédente, l'indicateur *Avg centroid* considère cette fois ci l'ensemble *I* total des lots du projet afin de connaître le positionnement central du lot moyen pondérée par les durées. Le paramètre *n* représente le nombre total de lots de travaux.

$$cout = \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} C_{rp} * yext_{rp} \quad (41)$$

La consommation des ressources externes est calculée à l'aide de la variable coût.

### 6.3.2.2 Instance utilisée et valeurs des coefficients étudiés

Pour réaliser cette étude de sensibilité, une instance de projet comprenant 50 lots de travaux et 20 groupes de ressources a été générée. La même instance a été utilisée sur l'ensemble des simulations afin d'obtenir des résultats comparables.

Les différentes valeurs associées aux coefficients pour l'étude sont :

- $\lambda_{makespan} = 0, 3, 6$  et  $9$
- $\lambda_{Priorité} = 0, 1, 2, 3$
- $\lambda_{Coût} = 0.0001, 0.001$  et  $0.01$

### 6.3.2.3 Résultats

La première analyse porte sur la configuration où les objectifs de date de fin et de priorité sont recherchés simultanément. Pour chaque valeur de coefficients, les mesures de performances *Makespan*, *Buffer P\_1*, *Avg centroid P\_1* et *Avg centroid* sont calculées pour chaque combinaison possible des valeurs de coefficients. Les résultats obtenus sont documentés dans les figures 6.2 à 6.5.

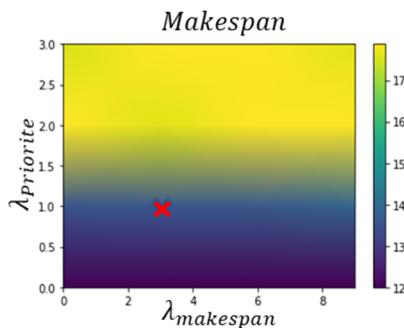


Figure 6.2 Variation du *Makespan* en fonction des coefficients  $\lambda_{makespan}$  et  $\lambda_{Priorité}$

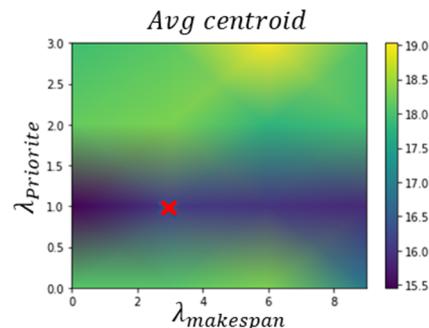


Figure 6.3 Variation du *Avg centroid* en fonction des coefficients  $\lambda_{makespan}$  et  $\lambda_{Priorité}$

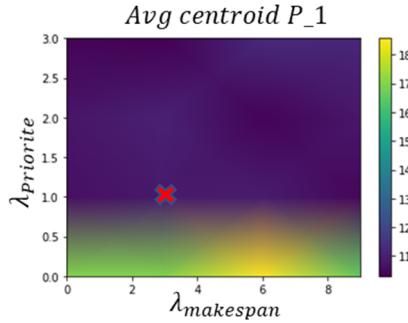


Figure 6.4 Variation du *Avg centroid P\_1* en fonction des coefficients  $\lambda_{makespan}$  et  $\lambda_{Priorité}$

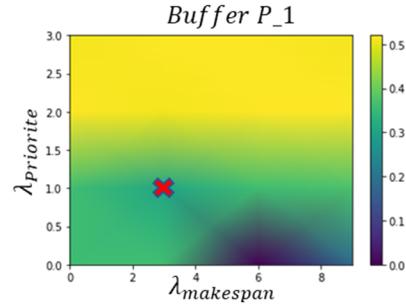


Figure 6.5 Variation du *Buffer P\_1* en fonction des coefficients  $\lambda_{makespan}$  et  $\lambda_{Priorité}$

On observe conjointement que plus le coefficient  $\lambda_{Priorité}$  augmente, plus les mesures de performances associées à l’objectif de priorité sont de meilleure qualité. Le même phénomène est observé entre le coefficient  $\lambda_{Makespan}$  et l’objectif de date de fin de projet. Cependant, lorsque les deux coefficients sont élevés, on remarque que l’objectif de priorité est privilégié à la date de fin de projet. L’affectation des valeurs 3 et 1 aux coefficients  $\lambda_{makespan}$  et  $\lambda_{Priorité}$  est un choix judicieux si l’on souhaite trouver un bon compromis entre les deux objectifs.

La seconde analyse porte sur la configuration où l’objectif de date de fin de projet est associé à l’utilisation de ressources externes. Les mesures de performance *Makespan*, *Cout* et *Avg centroid* sont calculées pour chaque combinaison possible des valeurs de coefficients. Les résultats obtenus sont exposés dans les figures 6.6 à 6.8.

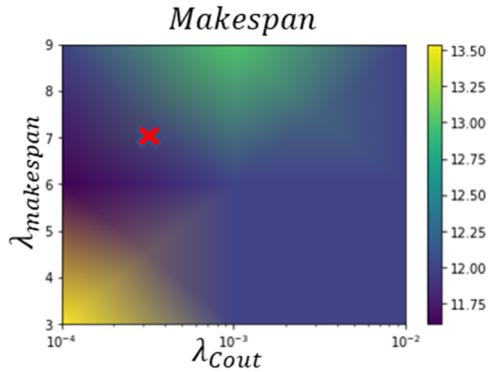


Figure 6.6 Variation du *Makespan* en fonction des coefficients  $\lambda_{makespan}$  et  $\lambda_{Cout}$

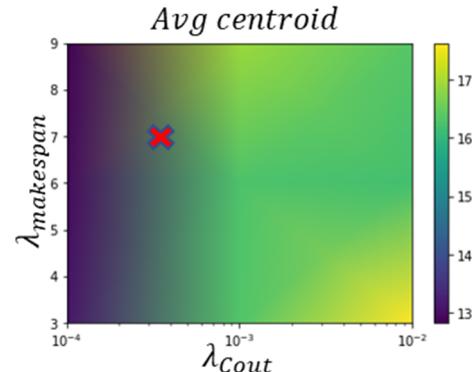


Figure 6.7 Variation du *Avg centroid* en fonction des coefficients  $\lambda_{makespan}$  et  $\lambda_{Cout}$

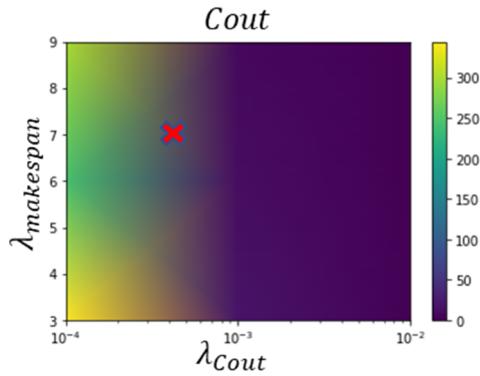


Figure 6.8 Variation du  $Cout$  en fonction des coefficients  $\lambda_{makespan}$  et  $\lambda_{Cout}$

D'après les résultats, on distingue que le makespan obtenu est très peu influencé par les valeurs des différents coefficients. Ce comportement peut être expliqué par les durées minimales des lots de travaux établies au cours de la génération des instances et des relations de précédence. On observe également que plus le coefficient  $\lambda_{Cout}$  est petit, plus la quantité de ressources externes déployée est importante. De plus, l'utilisation de ses ressources supplémentaires permet de diminuer le centroïde pondéré par les durées de manière non négligeable.

De façon plus générique, avec les instances utilisées pour les expérimentations, les projets ont un makespan relativement constant, peu importe le nombre de ressources externes utilisées. Cependant, celles-ci permettent d'exécuter plus tôt les activités au cours du projet. Si un bon compromis est recherché entre les deux objectifs, l'affectation des valeurs 7 et 0.00045 aux coefficients  $\lambda_{makespan}$  et  $\lambda_{Cout}$  est pertinent.

La dernière analyse porte sur la configuration où l'objectif de priorité est associé à l'utilisation de ressources externes. Les mesures de performance  $Cout$ ,  $Buffer P\_1$ ,  $Avg centroid P\_1$ ,  $Makespan$  et  $Avg centroid$  sont calculées pour chaque combinaison possible des valeurs de coefficients. Les figures 6.9 à 6.13 récapitule les résultats obtenus.

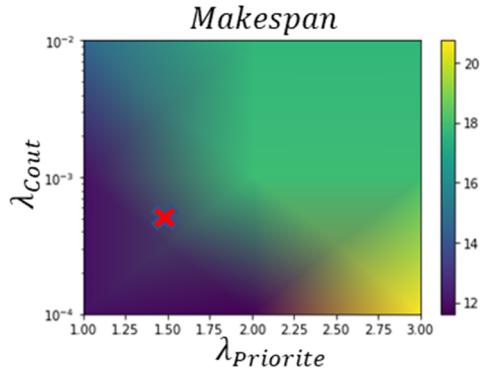


Figure 6.9 Variation du *Makespan* en fonction des coefficients  $\lambda_{priorite}$  et  $\lambda_{cout}$

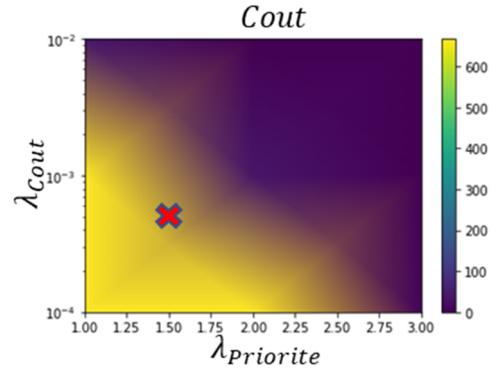


Figure 6.12 Variation du *Cout* en fonction des coefficients  $\lambda_{priorite}$  et  $\lambda_{cout}$

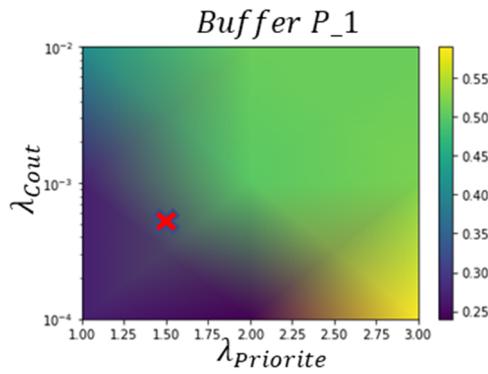


Figure 6.10 Variation du *Buffer P\_1* en fonction des coefficients  $\lambda_{priorite}$  et  $\lambda_{cout}$

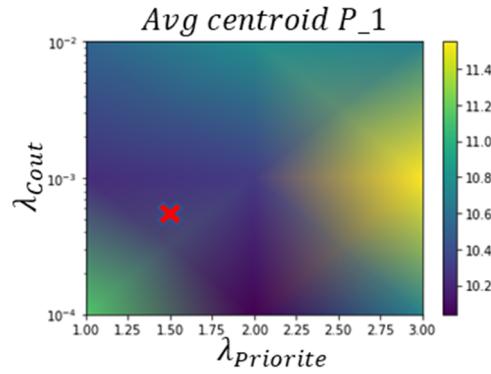


Figure 6.13 Variation du *Avg centroid P\_1* en fonction des coefficients  $\lambda_{priorite}$  et  $\lambda_{cout}$

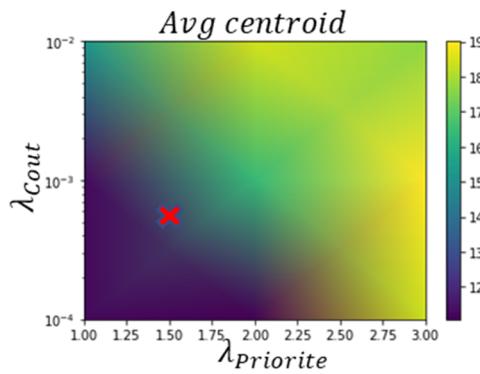


Figure 6.11 Variation du *Avg centroid* en fonction des coefficients  $\lambda_{priorite}$  et  $\lambda_{cout}$

On remarque que plus le coefficient  $\lambda_{Priorité}$  est élevé, plus les mesures de performances *Buffer P\_1* et *Avg centroid P\_1* sont de bonne qualité. Cependant, le *Makespan* et *Avg centroid* sont détériorés avec l'augmentation de celui-ci. Une diminution de cette détérioration peut être réalisée en affectant une faible valeur au coefficient  $\lambda_{Coût}$ . Néanmoins, cette décision entraîne le déploiement d'un nombre important de ressources externes. L'affectation des valeurs 1.5 et 0.0006 aux coefficients  $\lambda_{Priorité}$  et  $\lambda_{Coût}$  est un choix approprié si un bon compromis est souhaité entre les deux objectifs.

Le choix des coefficients est une tâche difficile entraînant des comportements et des résultats très variables. Ils doivent être choisis scrupuleusement afin d'atteindre un objectif précis et ne pas dévier de celui-ci.

La planification initiale est soumise à des incertitudes sur la portée des projets et sur les estimations des charges de travail. Jusqu'à présent dans ce mémoire, les projets ont été évalués à l'aide de différentes mesures de performance pour estimer leur qualité. Cependant, la prise en compte des incertitudes n'a pas encore été incorporée au modèle.

### **6.3.3 Prise en compte de la robustesse**

Les estimations des charges dans les lots de travaux sont souvent incertaines. Une variation de plus ou moins grande ampleur peut intervenir. Afin de prendre en compte l'incertitude dans notre modèle, la stratégie adoptée est de conserver des ressources disponibles au cours de la planification tactique afin que celles-ci puissent être déployées en cas d'imprévus.

#### **6.3.3.1 Profils de conservation des ressources**

Deux profils de conservation des ressources sont proposés en figure 6.14 et 6.15.

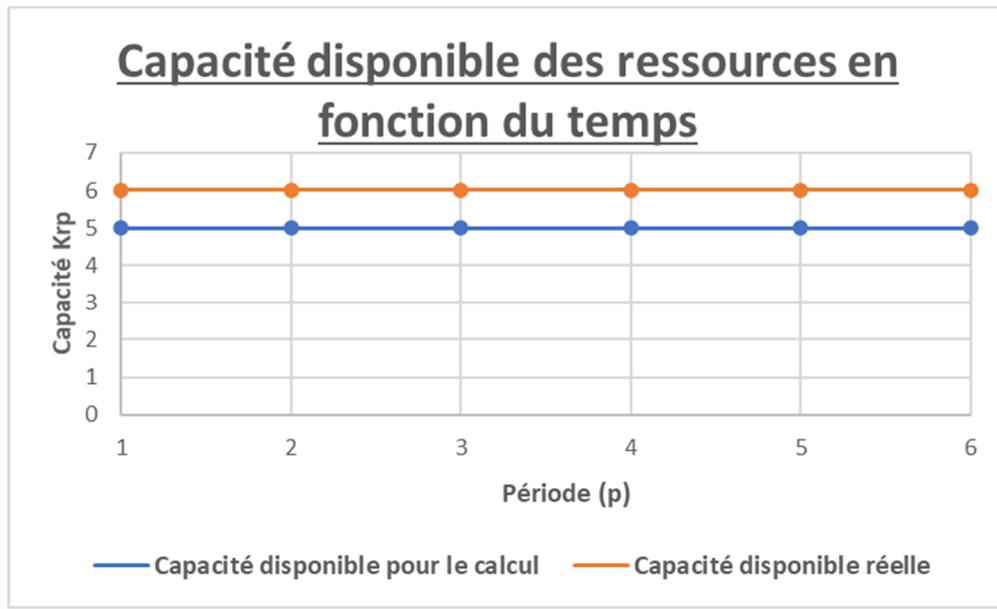


Figure 6.14 Profil 1 de conservation de capacité de ressources disponible

Ressource disponible pour le calcul:  $K_{rp\_calcul} = K_{rp\_réelle} * \beta_1$

La stratégie du profil 1 consiste à ne planifier qu'un certain pourcentage des ressources sur l'ensemble du projet afin de garder des disponibilités en cas d'imprévus. Le pourcentage est considéré constant sur l'ensemble des périodes. Celui-ci est représenté par le paramètre  $\beta_1$  ( $0 < \beta_1 < 1$ ). On suppose que les imprévus peuvent survenir à tout moment au cours du projet et que leurs résolutions ne nécessitent pas de délai de traitement important.

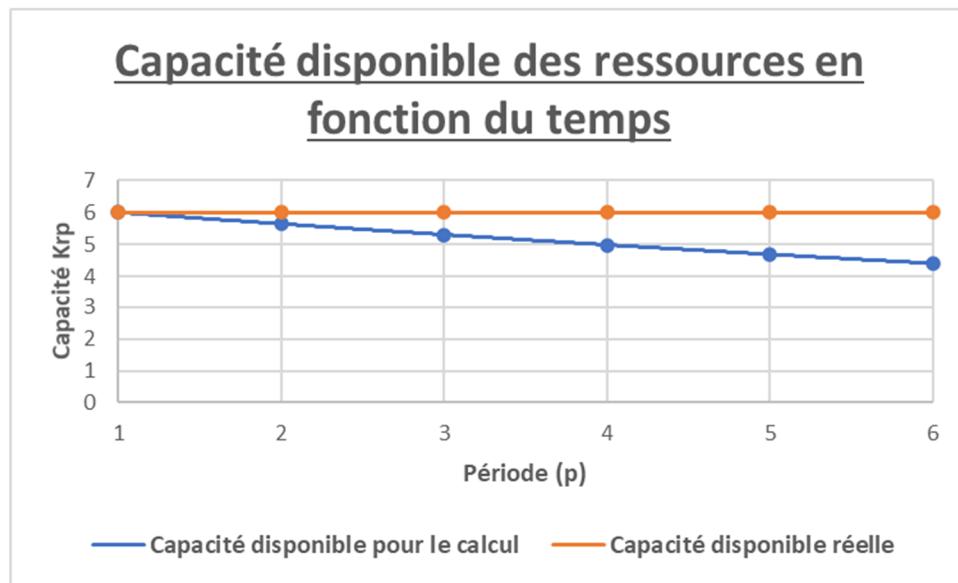


Figure 6.15 Profil 2 de conservation de capacité de ressources disponible

Ressource disponible pour le calcul:  $K_{rp\_calcul} = K_{rp\_réelle} * \beta_2^{(p-1)}$

La stratégie du profil 2 consiste à conserver progressivement des ressources au fur et à mesure de l'avancée de l'horizon de planification. On suppose que les perturbations interviennent rarement en début de projet, mais au fur et à mesure de son exécution. L'apparition de ces imprévus venant continuellement accroître les charges de travail au cours des périodes, le déploiement constant de nouvelles ressources est nécessaire. Le paramètre associé à ce profil est  $\beta_2$  ( $0 < \beta_2 < 1$ ).

### 6.3.3.2 Plan expérimental

Afin de calibrer les deux profils de conservation des ressources en fonction d'un niveau d'incertitude préalablement connu, le plan expérimental suivant est proposé. Celui s'applique indépendamment aux deux profils de conservation des ressources.

- 1- Générer une instance de projet
- 2- Développer des échéanciers de référence en faisant varier le paramètre  $\beta$  puis noter les valeurs de centroïdes pondérés par les durées obtenues.
- 3- Développer des échéanciers optimaux sans profil de conservation des ressources en augmentant les charges de 0 à  $\alpha\%$  de chaque lot de travail suivant une loi triangulaire afin de simuler les incertitudes liées au contenu du projet, puis noter les valeurs de centroïdes pondérés par les durées obtenues.
- 4- Tracer les valeurs des paramètres en fonction du centroïde pondéré par les durées, puis tracer les courbes de tendance linéaire associées aux graphiques.
- 5- Déterminer la relation entre  $\alpha$  et  $\beta$  à l'aide des équations des courbes de tendance en fonction du centroïde pondéré par les durées
- 6- Calculer le coefficient de corrélation entre les valeurs de  $\beta$  optimum avec celles obtenues à l'aide de la relation liant les deux paramètres.
- 7- Analyser les résultats

### 6.3.3.3 Résultats

La première étape du plan expérimental consiste à faire varier les différents paramètres sur une même instance puis de récupérer les centroïdes pondérés par les durées obtenues.

Le tracé des paramètres en fonction du centroïde pondéré par les durées est illustré en figure 6.16.

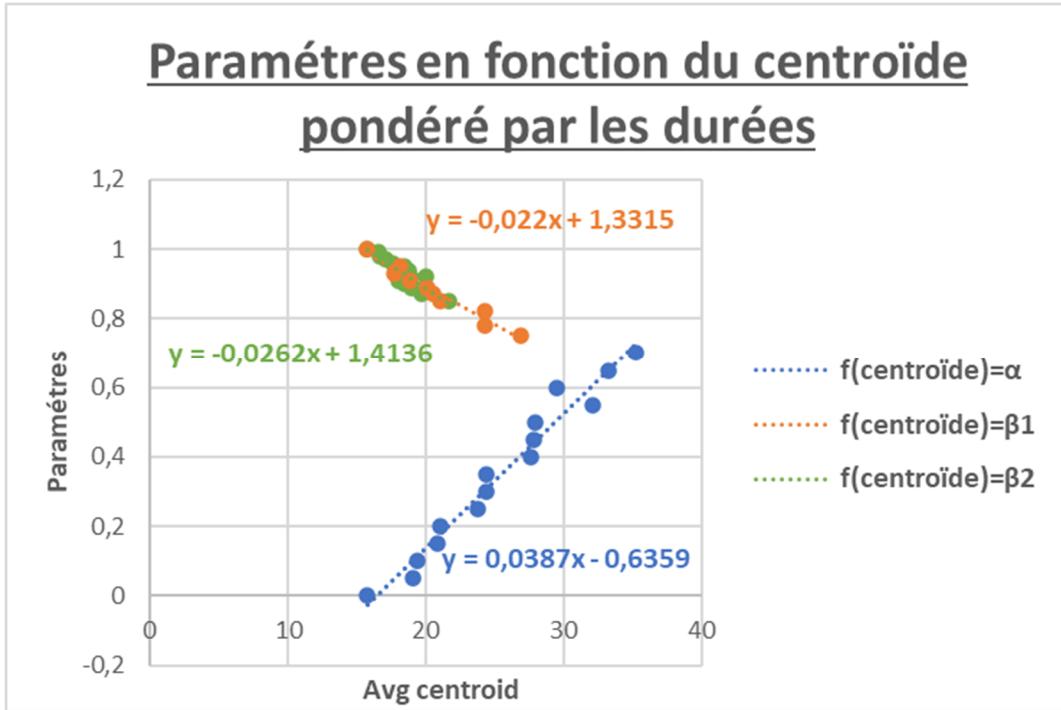


Figure 6.16 Influence des paramètres sur la variation du centroïde pondérée par les durées des activités

Les courbes de tendances permettent d'établir les relations suivantes :

$$\alpha = 0,0387 * Avg\ centroid - 0,6359 \quad (42)$$

$$\beta_1 = -0,022 * Avg\ centroid + 1,3315 \quad (43)$$

$$\beta_2 = -0,0262 * Avg\ centroid + 1,4136 \quad (44)$$

Ce qui permet de déduire :

$$Avg\ centroid = \frac{\alpha + 0,6359}{0,0387} \quad (45)$$

$$\beta_1 = -0,5685 * \alpha + 0,97 \quad (46)$$

$$\beta_2 = -0,677 * \alpha + 0,9831 \quad (47)$$

Afin de juger la pertinence de la relation liant  $\alpha$  à  $\beta_1$ , le coefficient de corrélation entre les paramètres  $\beta_1$  calculés à partir des paramètres  $\alpha$ , et les paramètres  $\beta_1$  optimaux permettant d'obtenir un même centroïde pondéré par les durées, est établi à partir de la figure 6.17.

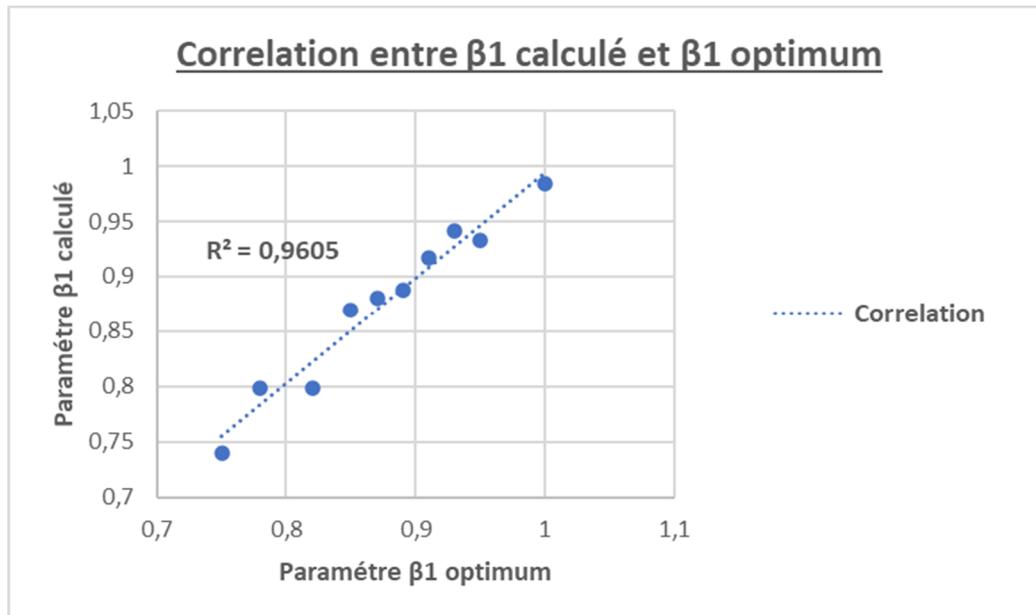


Figure 6.17 Calcul du coefficient de corrélation entre le paramètre  $\beta_1$  calculée et  $\beta_1$  optimum

De même, le coefficient de corrélation entre les paramètres  $\beta_2$  calculés à partir des paramètres  $\alpha$ , et les paramètres  $\beta_2$  optimaux, est déterminé à partir de la figure 6.18.

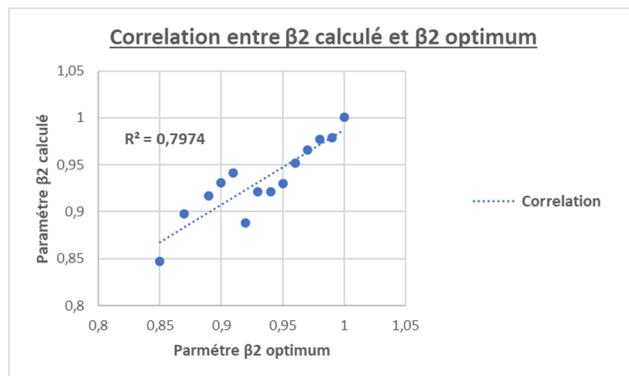


Figure 6.18 Calcul du coefficient de corrélation entre le paramètre  $\beta_2$  calculée et  $\beta_2$  optimum

Pour les deux profils, on remarque une bonne corrélation entre les paramètres  $\beta$  calculés à partir des paramètres  $\alpha$  et les paramètres  $\beta$  optimaux permettant d'obtenir un même centroïde pondéré par les durées. Cependant, le profil 1 semble être le choix le plus judicieux pour le type d'instance

utilisé au cours de l'étude. En effet, la relation liant le niveau d'incertitude dans les charges de travail au pourcentage de ressources disponibles a déployé est de meilleure qualité.

## 6.4 Conclusion

Le modèle de calcul développé permet de calculer rapidement des plans initiaux. On distingue tout de même que les temps de résolution évoluent selon les objectifs visés et la taille des projets. En ajustant les différents coefficients de la fonction objective du modèle, les aspects pouvant être recherchés simultanément sont nombreux. Une certaine proportionnalité entre les coefficients doit tout de même être respectée afin d'obtenir les comportements souhaités.

Afin d'incorporer la notion d'incertitude dans le modèle, deux profils de conservation des ressources à utiliser au cours des résolutions ont été étudiés. Pour le type d'instance généré au cours des expérimentations, la relation déduit du profil 1 associé à la conservation d'un pourcentage constant des ressources disponibles possède le coefficient de corrélation entre les paramètres optimaux et calculés le plus élevé. Cette forte corrélation rend ce profil le plus pertinent à utiliser au cours des résolutions. Cependant, cette stratégie d'incorporation des incertitudes n'est pertinente que pour les incertitudes liées aux charges de travail des lots de travaux connus. La démarche proposée ne permet pas de prendre en compte les incertitudes liées à la création de nouveaux lots de travaux à la suite de découverte de nouveaux défauts. Afin de pouvoir considérer toutes les types d'incertitudes, une analyse sur des données historiques aurait été requise. N'ayant pas ces informations à disposition, celle-ci n'a pas pu être effectuée.

Un récapitulatif des contributions scientifiques apportées dans ce mémoire ainsi que des opportunités de recherches envisageables sont présentés dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de ce mémoire était de proposer un nouveau cadre de planification tactique de projets de remise à niveau de navires capable de supporter différents types de projets commerciaux et militaires. Tout au long de ce travail de recherche, plusieurs contributions scientifiques ont été apportées.

Tout d'abord, aucun processus d'affaires comprenant à la fois les spécificités des projets de remise à niveau militaires et commerciaux n'existeit. La revue de littérature a permis de mettre en évidence que peu de travaux traitent précisément des grandes étapes encadrant ce type de projet. En collaboration avec un chantier naval de la RCN et un chantier naval commercial, les enjeux liés à chaque secteur ont été identifiés puis combinés dans une unique proposition. Une revue internationale spécifiant l'ensemble des bonnes techniques de gestion de projets à incorporer dans un processus de planification a été utilisée pour soutenir le développement du nouveau processus. L'élaboration de cette nouvelle proposition répond entièrement au sous-objectif 1. La contribution apportée par ce travail fournit aux différents chantiers navals une nouvelle démarche d'exécution généralisée permettant de faciliter leurs échanges. Ce cadre supportant le traitement de projets de nature et de complexité très variables peut également inciter certaines organisations à développer de nouvelles activités en s'ouvrant à de nouveaux marchés. L'incorporation de l'ensemble des bonnes pratiques de gestion de projets dans le processus est également une piste de recadrage pour certaines entreprises de ce secteur. Ce travail leur permet de vérifier qu'elles traitent l'ensemble des enjeux importants de gestion de projets développés tout au long de cette proposition.

Ensuite, nous avons observé que les outils de calcul de planification tactique documentés dans la littérature ne sont pas associés à des contextes particuliers. Ils sont directement applicables à un grand nombre de projets, mais ne prennent pas en considération les caractéristiques d'un domaine précis. En s'appuyant sur un travail existant, un nouveau modèle dédié à la planification tactique de projets de remise à niveau de navires a été proposé afin de traiter le sous-objectif 2. Des nouvelles contraintes ont été ajoutées au modèle de base et la fonction objective a été adaptée. Ces modifications ont permis d'incorporer l'ensemble des spécificités liées au sous-objectif. L'atout principal de notre modèle est son adaptabilité par rapport aux différents contextes d'exécution pouvant être rencontrés. La fonction objective est décomposée en plusieurs sous-objectifs pouvant être atteints simultanément. En associant des valeurs aux coefficients de chaque aspect, le

planificateur peut personnaliser simplement le modèle en fonction des objectifs recherchés. Cette possibilité de personnalisation permet l'utilisation d'un seul modèle, là où auparavant plusieurs auraient été nécessaires pour traiter les différentes combinaisons de sous-objectifs.

Cependant, notre étude comporte des limites. La validation du processus proposé a été réalisée uniquement à l'aide d'une rétroaction d'un comité d'expert travaillant sur le développement de logiciel de planification. Aucun retour sur la facilité de compréhension et d'utilisation du nouveau processus par un planificateur officiant dans un chantier naval n'a été considéré. La phase de transition entre les anciennes méthodes et les nouvelles à appliquer n'a également pas été traitée. De même, l'absence de simulation du modèle sur de véritables données historiques réduit la pertinence des expérimentations effectuées. De plus, la génération d'un nombre important de variables au cours des résolutions n'a pas permis d'obtenir des résultats concluants sur des projets de très grande envergure. Les combinaisons de coefficients étant infinies, le comportement du modèle n'a également pas pu être testé sur l'ensemble d'entre elles.

Afin de compléter ce mémoire, plusieurs perspectives de recherche apparaissent. À présent que le modèle permet de calculer des plans agrégés nécessaires à l'estimation de délais adéquats en réponse à des appels d'offres, il serait profitable de le compléter avec un module porté sur le calcul des budgets. Il serait également intéressant d'étudier comment incorporer des techniques d'intelligence artificielle au modèle afin d'obtenir des estimations plus précises sur le contenu et les charges de travail des projets en fonction de données historiques. Enfin, les contributions apportées par ce mémoire au secteur de la remise à niveau de navires pourraient être aisément réutilisées dans d'autres industries en suivant la même méthodologie.

En conclusion, les outils développés dans cette étude peuvent être considérés comme les fondations de nouvelles méthodes de planification initiale soutenant les chantiers navals dans l'exécution de projets complexes de remise à niveau de navires.

## RÉFÉRENCES

- Alfieri, A., Tolio, T., & Urgo, M. (2011), "A project scheduling approach to production planning with feeding precedence relations" International Journal of Production Research, vol. 49(4), pp. 995-1020. DOI: 10.1080/00207541003604844
- Arun, D., & Makaraksha, S. (2016), "Modeling and analysis of ship repairing labour", Journal of Ship Production and Design, vol. 32, no. 4, pp. 258-271
- Bertrand, E. L. J. (2020), "Optimization of the naval surface ship resource-constrained project scheduling problem", (MSc. Thesis, Dalhousie University, Canada).
- Bianco, L., & Caramia, M. (2013), "A new formulation for the project scheduling problem under limited resources", Flexible Services and Manufacturing Journal, vol. 25(1), pp. 6-24. DOI: 10.1007/s10696-011-9127-y
- Cherkaoui, K. (2017), "Planification tactique des grands projets d'ingénierie et de construction", (Ph. D. thesis, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada). Accessible par Google Scholar
- Chryssolouris, G., Papakostas, N., Makris, S., & Mourtzis, D. (1999), "Planning and scheduling of shipyard processes", Application of Information Technologies to the Maritime Industries, C. Guedes Soares, J. Brodda, (Eds.), Edições Salamandra, Lisbon, (ISBN : 972-689-157-4), pp 255-274
- Chryssolouris, G., Makris, S., Papakostas, N., & Mourtzis, D. (2004), "An integrated software framework for synchronizing internal business functions of a ship-repair yard", Advances in e-Engineering and Digital Enterprise Technology - I. Proceedings of the Fourth International Conference on e-Engineering and Digital Enterprise Technology, pp. 255-264
- De Boer, R., Schutten, J. M. J., & Zijm, W. H. M. (1997), "A decision support system for ship maintenance capacity planning", Annals of CIRP, vol. 46, pp. 391-396
- De Boer, R. (1998), "Resource-constrained multi-project management, a hierarchical decision support system", (Ph. D. thesis, University Of Twente, The Netherlands). Accessible par Google Scholar.

- Deris, S., Omatu, S., Ohta, H., Lt. Cdr Kutar, S., & Abd Samat, P. (1999), "Ship maintenance scheduling by genetic algorithm and constraint-based reasoning", European Journal of Operational Research, vol.112, pp. 489-502
- Gademann, N., & Schutten, M. (2005), "Linear-programming-based heuristics for project capacity planning". IIE Transactions, vol. 37:2, pp. 153-165, DOI:10.1080/07408170590885611
- Go, H., Kim, J. S., & Lee, D. H. (2013), "Operation and preventive maintenance scheduling for containerships: Mathematical model and solution algorithm", European Journal of Operational Research, vol. 229, Issue 3, pp. 626-636
- Gouvernement du Canada. Construction navale, réparation, entretien et remise à niveau [en ligne]. 2020 [consulté le 26 septembre 2020]. Disponible sur : [https://www.ic.gc.ca/eic/site/sim-cnmi.nsf/fra/h\\_uv00068.html](https://www.ic.gc.ca/eic/site/sim-cnmi.nsf/fra/h_uv00068.html)
- Haït, A., & Baydoun, G. (2012), "A new event-based MILP model for the resource-constrained project scheduling problem with variable intensity activity (RCPSPV)", Communication présentée à Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong.
- Hans, E. W. (2001), "Resource loading by branch-and-price techniques", (Ph. D. thesis, University Of Twente, The Netherlands). Accessible par Google Scholar.
- Kis, T. (2005), "A branch-and-cut algorithm for scheduling of projects with variable-intensity activities", Mathematical programming, vol. 103(3), pp. 515-539. DOI: 0.1007/s10107-004-0551-6
- Kis, T. (2006), "Rcps with variable intensity activities and feeding precedence constraints", Perspectives in Modern Project Scheduling (vol. 92, pp. 105-129): Springer.
- Kolisch, R., & Sprecher, A. (1996), "PSLIB - A project scheduling problem library" European Journal of Operations Research, vol. 96, no. 1, pp. 205-216.
- Lance Stephenson, H. (2015), "Total Cost Management Framework, An integrated Approach to Portfolio, Program, and Project Management" AACE International (second edition)

- Masmoudi, M. (2011), "Tactical and operational project planning under uncertainties: application to helicopter maintenance", (Ph. D. thesis, Université de Toulouse, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, France). Accessible par Google Scholar.
- Masmoudi, M., Hait, A., & Hans, E., (2016), "Tactical project planning under uncertainty: Fuzzy approach, European Journal of Industrial Engineering 10(3):301
- Naber, A., & Kolisch, R. (2014), "MIP Models for Resource-Constrained Project Scheduling with Flexible Resource Profiles", European Journal of Operational Research, vol. 239(2), pp. 335-348. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.05.036
- Wullink, G., Gademann, A., Hans, E. W., & Van Harten, A. (2004), "Scenario-based approach for flexible resource loading under uncertainty", International Journal of Production Research, vol. 42(24), pp. 5079-5098. DOI: 10.1080/002075410001733887
- Wullink, G. (2005), "Resource loading under uncertainty", (Ph. D. thesis, University of Twente, The Netherlands). Accessible par Google Scholar.

## ANNEXE A PROCESSUS D'AFFAIRES DANS UN CHANTIER NAVAL IDENTIFIÉS DANS LA LITTÉRATURE

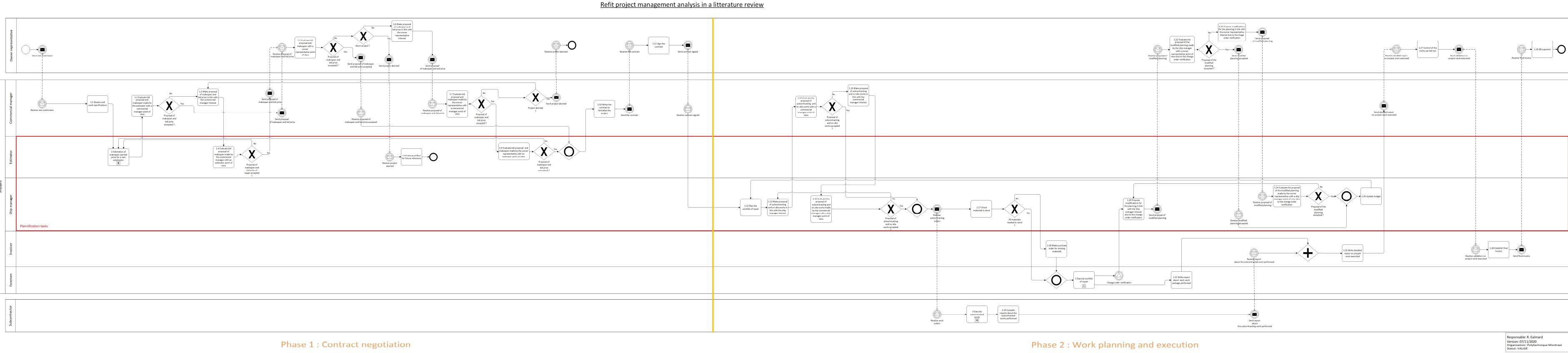


Figure A.1 Processus d'affaires dans un chantier naval identifiés dans la littérature

## ANNEXE B PROCESSUS D'AFFAIRES DANS UN CHANTIER NAVAL MILITAIRE

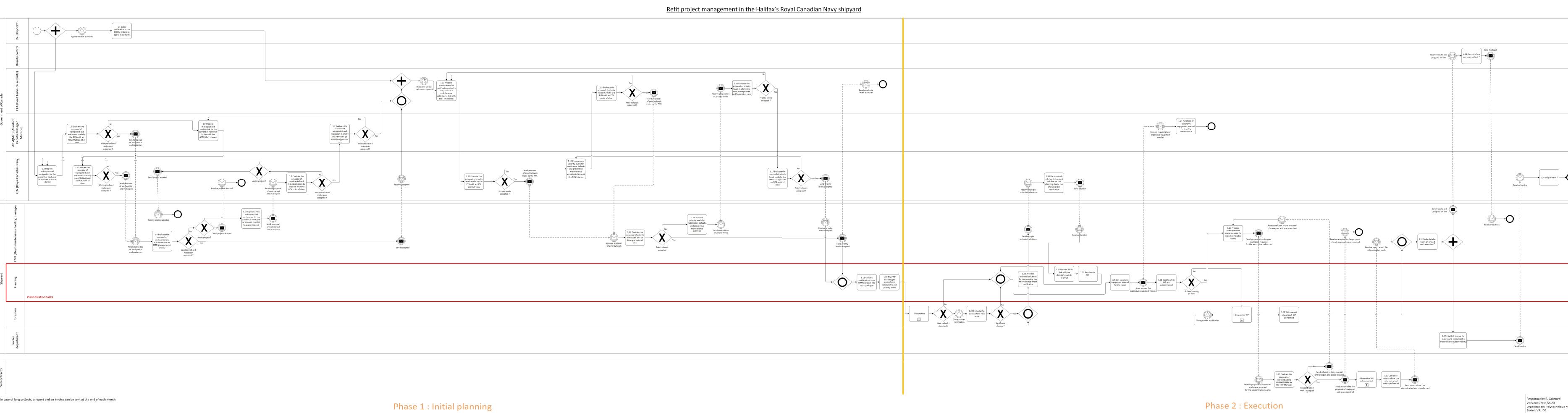


Figure B.1 Processus d'affaires dans un chantier naval militaire

## ANNEXE C PROCESSUS D'AFFAIRES DANS UN CHANTIER NAVAL COMMERCIAL

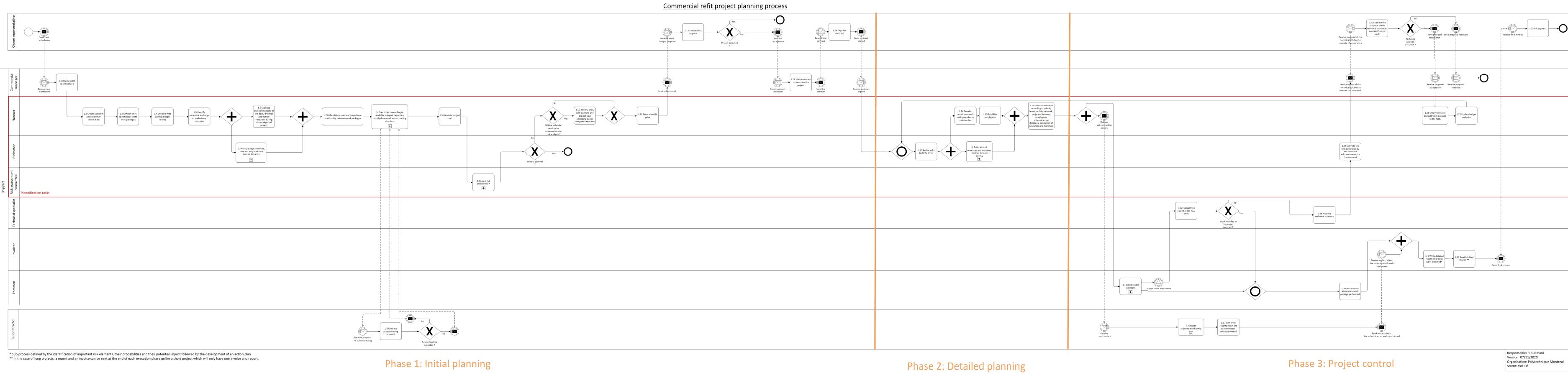


Figure C.1 Processus d'affaires dans un chantier naval commercial

## ANNEXE D NOUVELLE PROPOSITION DE PROCESSUS D'AFFAIRES UNIFIÉE

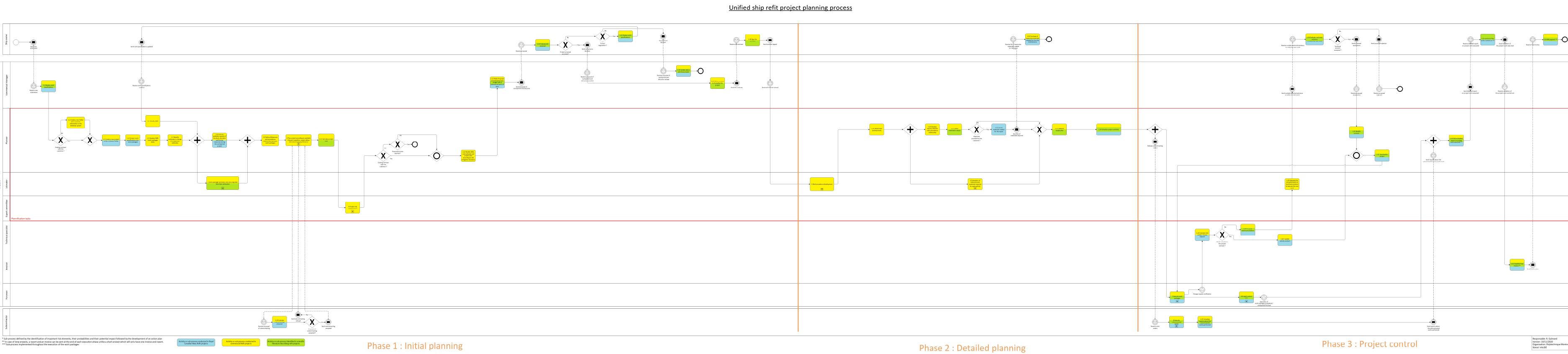


Figure D.1 Nouvelle proposition de processus d'affaires unifiée

## ANNEXE E VÉRIFICATION DE L'INCORPORATION DES PROCESSUS DE L'AACE

À l'aide des tableaux développés ci-dessous, une analyse de l'incorporation ou non des activités de chaque processus de planification développé par l'AACE dans le processus unifié est réalisée.

Tableau E.1 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase de définition d'un projet

Activités processus AACE	Activités processus unifié	Commentaires
1.1 Plan Scope and Execution Plan Development	Aucune activité, mais les entités à impliquer dans le processus sont détaillées dans le BPMN	Afin de réaliser les activités de ce processus, le responsable commercial et le planificateur sont conviés
1.2 Break Down Scope and Develop WBS	1.5 WBS Develop (work packages level)	Les spécifications à réaliser sont décomposées à l'aide d'un WBS en début de projet
1.3 Breakdown Organization and Develop Execution Stragey	1.9 Define Milestones and precedence relationship between work packages + 3 Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions	La stratégie d'exécution débute par l'établissement des jalons. Ensuite, les différentes responsabilités sont affectées aux équipes internes ou externes au cours de l'élaboration du plan de projet agrégé.
1.4 Develop work Packages	1.4 Convert work specifications into work packages	Une fois le WBS réalisé, les spécifications sont regroupées afin de créer des lots de travaux

Tableau E.1 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de définition d’un projet (suite et fin)

1.5 Assess Objectives and Optimize	1.6 Modify WBS	Dans le cas où une demande de changement intervient suite à une demande du client, le WBS est mis à jour par le planificateur
1.6 Review and Documentation	4 Project risk assessment	Au cours de l’analyse de risque: le WBS, les lots de travaux et la stratégie d’exécution sont revus afin de s’assurer de leur cohérence et que toutes les spécifications sont traitées
1.7 Develop and Maintain Scope Tools	Aucune activité	Des WBS standards et des données historiques sont utilisés afin de faciliter la description des nouveaux projets. Cependant, aucune activité relative à l’élaboration de nouveaux outils n’a été décrite dans le processus unifié. Cette activité fait partie de la stratégie globale d’un chantier naval et n’est pas spécifiquement liée à un projet.

Tableau E.2 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase d'ordonnancement d'un projet

Activités processus AACE	Activités processus unifié	Commentaires
2.1 Plan for Schedule Planning and Development	Aucune activité, mais les entités à impliquer dans le processus sont détaillées dans le BPMN	Afin de réaliser ces activités, le responsable commercial, le planificateur, l'équipe d'estimation, des spécialistes techniques et le comité de gestion des risques sont conviés
2.2 Establish Scheduling Requirements	1.17 Write contract to formalize the project + 1.9 Define Milestones and precedence relationship between work packages	La date de fin de projet est établie conjointement entre le client et le chantier naval. Afin de segmenter l'exécution du projet, des jalons sont positionnés.
2.3 Identify Activities	1.19 Refine WBS (activity level) + 1.26 Evaluate And update change request	La planification détaillée permet d'identifier chaque activité pour chaque lot de travail. Lors d'imprévus, une identification des nouvelles spécifications est également opérée.
2.4 Develop Activity Logic	1.9 Define Milestones and precedence relationship between work packages + 1.20 Develop activity network with precedence relationship)	Un réseau de lots de travaux est établi au cours de la planification agrégée. Puis, un réseau d'activité est développé pour chaque lot de travail au cours de la planification détaillée.

Tableau E.2 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase d'ordonnancement d'un projet (suite)

2.5 Estimate Durations	2. Work package workload, cost and long lead time estimation + 6 Estimation of resources and materials required for each activity + 1.27 Propose technical solutions	Une estimation de la charge de travail pour chaque lot de travail est réalisée au cours de la planification agrégé. Puis, au cours de la planification détaillée, un nombre de ressources et une quantité de matériel nécessaire sont estimés pour chaque activité. Dans le cas d'imprévu, une estimation de la durée d'exécution de chaque solution technique est menée.
2.6 Allocate Resources	3. Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions + 1.24 Schedule project activities+ 1.32 Reschedule project	L'allocation des ressources est réalisée au cours du développement des plans de projet (agrégée, détaillée et replanification).
2.7 Optimize Schedule (Simulation and Optimization)	3. Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions + 1.24 Schedule project activities + 1.32 Reschedule project	L'optimisation de l'ordonnancement et du réordonnancement des activités est réalisée à l'aide d'un outil dédié
2.8 Establish Control Basis	3. Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions	Des mesures de performance sont développées au cours de la planification tactique. Celles-ci sont ensuite utilisées pour évaluer l'exécution au cours des étapes de contrôle.

Tableau E.2 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase d’ordonnancement d’un projet (suite et fin)

2.9 Review and Validate Schedule	4 Project risk assessment	Au cours de l’analyse des risques, le plan agrégé est analysé afin qu’aucun élément important ne soit manquant et que l’exécution ne pose aucune difficulté majeure.
2.10 Document and Communicate Schedule	1.13 Make proposal of workperiod and budget with a commercial point of view + 1.24 Schedule project activities	Lorsque le client reçoit une proposition de délai et de budget, le plan de projet agrégé lui est communiqué. Au cours de la planification détaillée, une copie de l’ordonnancement est également envoyée à chaque équipe responsable d’une partie du projet.
2.11 Develop and Maintain Methods and Tools	Aucune activité	Cette activité fait partie de la stratégie globale d’un chantier naval et n’est pas spécifiquement liée à un projet. Cependant c’est un aspect important à traiter.

Tableau E.3 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase d’estimation de coût d’un projet

Activités processus AACE	Activités processus unifié	Commentaires
3.1 Plan for Estimating and Budgeting	1.7 Identify estimator in charge of preliminary estimates	En début de projet, le planificateur désigne une équipe responsable des estimations
3.2 Quantify the Scope Content (take-off)	2 Work package workload, cost and long lead-time item estimation + 1.26 Evaluate And update change request	Les estimations de charges de travail ainsi que les équipements spéciaux nécessaires à l’exécution sont définis au cours de la planification agrégée. Dans le cas d’imprévus, une évaluation de la portée du changement est réalisée.
3.3 Cost Scope Content	6 Estimation of resources and materials required for each activity + 1.27 Propose technical solutions	Le nombre de ressources et de matériels nécessaires à chaque activité est estimé au cours de la planification détaillée. Dans le cas d’imprévus, une estimation de ressources est réalisée lors du développement des propositions de solutions.
3.4 Price the Cost Estimate	2 Work package workload, cost and long lead-time item estimation + 3 Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions + 1.29 Estimate the cost generated by technical solutions to execute the new work	L’estimation budgétaire est définie pour la première fois au cours de l’estimation des charges de travail et du matériel requis. Celle-ci est affinée avec les choix de sous-traitance décidés lors du développement du plan de projet agrégé. Dans le cas d’imprévus, une estimation budgétaire est menée pour chaque proposition de solutions techniques.

Tableau E.3 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase d'estimation de coût d'un projet (suite et fin)

3.5 Simulate and Optimize the Costs	4 Project risk assessment	L'estimation de coût est optimisée au cours de l'analyse des risques en étudiant les possibles perturbations pouvant intervenir.
3.6 Budget Costs	1.11 Calculate project cost	Au cours du calcul du coût, l'estimation du budget est éclatée en fonction des composantes du projet. Cette séparation permet un meilleur suivi de projet.
3.7 Analyze Cash Flow	9 Project control	L'analyse entre les coûts réels et les coûts estimés est effectuée cours des activités de contrôle de projet.
3.8 Review and Document the Cost Estimate	1.12 Modify WBS, cost estimate and project plan according to risk mitigation decisions	Les coûts estimés sont mis à jour suite à l'analyse des risques.
3.9 Bid the Cost Estimates	1.13 Make Proposal of workperiod and budget with a commercial point of view	Une proposition de délai et de budget est envoyée au client en fonction des spécifications demandées.
3.10 Develop and Maintain Methods and Tools	2 Work package workload, cost and long lead-time item estimation	Cette activité fait partie de la stratégie globale d'un chantier naval et n'est pas spécifiquement liée à un projet. Cependant c'est un aspect important à traiter.

Tableau E.4 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de planification des ressources d’un projet

Activités processus AACE	Activités processus unifié	Commentaires
4.1 Plan for Resource Planning	Aucune activité, mais les entités à impliquer dans le processus sont détaillées dans le BPMN	Afin de réaliser ces activités, le planificateur et l’équipe d’estimation sont conviés
4.2 Identify Key or Driving Resources and Priorities	3 Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions + 1.24 Schedule project activities	Au cours des étapes de planification, les ressources critiques sont identifiées.
4.3 Study Resource Availability	1.8 Evaluate available capacity of the dock, dry-dock and human resources during the workperiod project + 1.21 Check materials in stock	L’évaluation des capacités d’équipements et de ressources humaines disponibles pour les périodes concernées est menée au cours de la planification agrégée. L’inventaire des matériaux en stock et quant à lui effectué au cours de la planification détaillée.
4.4 Identify Resource Limits and Constraints	2 Work package workload, cost and long lead-time item estimation + 1.4 Convert work specifications into work packages	Les délais d’approvisionnement sont étudiés par l’équipe responsable des estimations. Les contraintes limitant le nombre de ressources pouvant être déployées simultanément dans une partie d’un bateau sont spécifiées en début de projet lors de l’étude des spécifications à réaliser.

Tableau E.4 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de planification des ressources d’un projet (suite et fin)

4.5 Optimize Resources	3 Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions + 1.24 Schedule project activities	La gestion de l’utilisation des différentes ressources est effectuée au cours des étapes d’élaboration de plan de projet agrégé et détaillé.
4.6 Review and Document Resource Plan	3 Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions + 1.24 Schedule project activities	Les profils d’utilisation des différents types de ressources internes, externes et matérielles sont générés au cours des étapes de planification
4.7 Develop and Maintain Methods and Tools	Aucune activité	Cette activité fait partie de la stratégie globale d’un chantier naval et n’est pas spécifiquement liée à un projet. Cependant c’est un aspect important à traiter.

Tableau E.5 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de l’analyse de la valeur d’un projet

Activités processus AACE	Activités processus unifié	Commentaires
5.1 Plan and Initiate the VA/VE Study	Aucune activité, mais les entités à impliquer dans le processus sont détaillées dans le BPMN	Afin de réaliser ces activités, le planificateur, le comité de gestion et des contremaîtres des risques sont conviés
5.2 Perform Function Analysis (Value Measurement)	1.4 Convert work specifications into work packages + 1.26 Evaluate And update change request	Au cours de l’étude des spécifications, celles-ci sont priorisées en fonction de leur importance. Dans le cas d’imprévus, chaque demande de changement est également analysée.
5.3 Apply Creativity	3 Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions + 1.27 Propose technical solutions	Afin d’exécuter un maximum de lots de travaux importants, le planificateur utilise des outils performants lors du développement de plans de projet. Dans le cas d’imprévus, des solutions sont également proposées.
5.4 Evaluate Ideas (Value Screening)	3 Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions + 1.29 Estimate the cost generated by technical solutions to execute the new work	Les plans sont évalués à l’aide de mesure de robustesse. Dans le cas d’imprévus, les solutions techniques sont évaluées en fonction de leur estimation de temps et de budget.

Tableau E.5 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de l’analyse de la valeur d’un projet (suite et fin)

5.5 Develop and Document Alternatives	4 Project risk assessment + 1.29 Estimate the cost generated by technical solutions to execute the new work	<p>Dans le cas où plusieurs plans de projets sont établis par le planificateur, les alternatives sont analysées au cours de l’analyse des risques.</p> <p>Dans le cas d’imprévus, les solutions techniques envisageables sont détaillées afin d’être communiquées au client.</p>
5.6 Develop and Maintain Methods and Tools	Aucune	<p>Cette activité fait partie de la stratégie globale d’un chantier naval et n’est pas spécifiquement liée à un projet. Cependant c’est un aspect important à traiter.</p>

Tableau E.6 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de gestion des risques d’un projet

Activités processus AACE	Activités processus unifié	Commentaires
6.1 Establish Risk Management Objectives	Aucune activité, mais les entités à impliquer dans le processus sont détaillées dans le BPMN	Afin de réaliser ces activités, le planificateur, le comité de gestion et des contremaîtres des risques sont conviés
6.2 Risk Identification		
6.3 Quanlitative Risk Analysis		
6.4 Quantitative Risk Analysis		Au cours de l’analyse des risques, le comité identifie et analyse les risques à l’aide d’une approche qualitative et quantitative.
6.5 Other Risk Assessment Challenges	4 Project risk assessment	Une mesure de contingence est ensuite ajoutée aux estimations afin de prendre en compte les possibles perturbations. Des plans d’action sont développés afin de traiter rapidement et efficacement des évènements imprévus.
6.6 Analyze Contingency		
6.7 Develop Strategic Risk responses		
6.8 Risk Monitoring and Communication	9 Project control	Une analyse des risques est effectuée périodiquement au cours des activités de contrôle de projet

Tableau E.6 Retranscription des activités recommandées par l’AACE dans le processus unifié pour la phase de gestion des risques d’un projet (suite et fin)

6.9 Update Project Plans	1.12 Modify WBS, cost estimate and project plan according to risk mitigation decisions	Une fois l’analyse des risques effectuée, le WBS, le plan de projet et les estimations sont revus si besoin
6.10 Develop and Maintain Methods and Tools	Aucune activité	Cette activité fait partie de la stratégie globale d’un chantier naval et n’est pas spécifiquement liée à un projet. Cependant c’est un aspect important à traiter.

Tableau E.7 Retranscription des activités recommandées par l'AACE dans le processus unifié pour la phase d'approvisionnement d'un projet

Activités processus AACE	Activités processus unifié	Commentaires
7.1 Plan for procurement Planning	Aucune activité, mais les entités à impliquer dans le processus sont détaillées dans le BPMN	Afin de réaliser ces activités, le planificateur et le comité de gestion des risques sont conviés
7.2 Identify Project Control Requirements, Capabilities and Priorities	3 Plan project according to available shipyard capacities, supply delays and subcontracting decisions	Au cours de la planification tactique, des exigences sont définies pour permettre de sélectionner les sous-traitants et les fournisseurs
7.3 Evaluate Procurement Approaches and Constraints	4 Project risk assessment	Au cours de l'analyse de risques, une étude évalue plusieurs approches d'approvisionnement afin de décider quelle stratégie adopter.
7.4 Review and establish Procurement Requirements	1.23 Establish supply plan	Un plan d'approvisionnement est rédigé en spécifiant les choix de fournisseurs
7.5 Develop and Maintain Procurement Planning Tools	Aucune activité	Cette activité fait partie de la stratégie globale d'un chantier naval et n'est pas spécifiquement liée à un projet. Cependant c'est un aspect important à traiter.

## ANNEXE F CODE DU MODÉLE DE CALCUL ET EXEMPLE PROBLÉME

```

set I; #set of WP
set T; #set of time unit
set P; #set of period
set Predec within I cross I;#set of predecessors
set P1; #set of period-1
set PCmax; #set of period up to Cmax
set R; #set of resource

param Horizon; #Planning Horizon
param Periode(P); #durée période p
param Chargespe(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 Debutlot(I); # Date à partir de laquelle le lot i peut être exécuté
param Livr(I); # Delais d'approvisionnement pour le lot i
param Priorite(I); #Priorité des lots
param Cmax; #Date de fin du projet
param CoefCharge; #Coefficient pour l'objectif de planification des grosses charges de travail au plus tôt
param CoefPrior; #Coefficient pour l'objectif de priorité
param CoefMakespan; #Coefficient pour l'objectif de makespan
param Coefcout; #Coefficient pour l'objectif de coût
param Coefniv; #Coefficient pour l'objectif de nivellation
param Debut; #Date début de projet
param Capa_int_RP(R,P); #Capacité interne de la ressource R au cours de la période P
param Capa_ext_RP(R,P); # Capacité externe de la ressource R au cours de la période P
param CoutRP(R,P); #Cout de l'utilisation de la ressource externe r au cours de la période p

var ts(i in I)>=0;
var tf(i in I)>=0;
var wf(i in I, t in T), binary;
var zs(i in I, p in P), binary;
var zf(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 yint(r in R, p in P)>=0;
var yext(r in R, p in P)>=0;
var cout >=0;

#Fonction objectif
maximize objective: (sum(i in I, t in Debut..Cmax) wf[i,t]*((1+CoefCharge*Charge[i]^1.1)/(Priorite[i]^CoefPrior))*(10-)
CoefMakespan*(t^(4))/(Cmax^(4)))-Coefcout*cout;

#Contraintes déterminant les dates de début et de fin des lots dans les périodes
const1(i in I, p in P): ts[i]>= sum(k in 1..p) Periode[k]*(1-zs[i,p]);
const2(i in I, p in P): ts[i]<= (sum(k in 1..p) Periode[k])+(Horizon-(sum(k in 1..p) Periode[k]))*(1-zs[i,p]);
const3(i in I, p in P1):zs[i,p+1]>=zs[i,p];
const4(i in I, p in P): tf[i]>= sum(k in 1..p) Periode[k]*(1-zf[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-zf[i,p]);
const6(i in I, p in P1):zf[i,p+1]>=zf[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]*(zs[i,p+1]-zf[i,p]);
const8(i in I, p in P1): d[i,p+1]>=Periode[p+1]*(zs[i,p]-zf[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]*zs[i,p]-Horizon*(1-zf[i,p+1]);
const10(i in I, p in P1): d[i,p+1]>= (sum(k in 1..p+1) Periode[k])*(1-zs[i,p])-ts[i]-Periode[p+1]*zf[i,p+1];
const11(i in I): (sum(p in P) d[i,p])=tf[i]-zs[i];

#Contraintes de temps et de relations de précédence
const12(i in I): ts[i]>=Debutlot[i];#ok
const13(i in I): ts[i]>=Debut;#ok
const14((i,j) in Predec): ts[j]>=tf[i];#Moyen
const15(i in I): (sum(t in T) wf[i,t])<=1;#ok
const30(i in I): sum(t in T) wf[i,t]*t>=tf[i];
const31(i in I): sum(t in T) wf[i,t]*t<=tf[i]+0.9999999;
const16(i in I): tf[i]<=Horizon;#ok

#contraintes de capacité
const17(i in I, p in P):intens[i,p]*(sum(r in R) Chargespe[r,i])<= Chargemax[i]*d[i,p];
const18(i in I, p in P): intens[i,p]*(sum(r in R) Chargespe[r,i])>=Chargemin[i]*d[i,p];
const19(i in I): sum(p in P) intens[i,p]=1;#OK
const20(r in R, p in P): yint[r,p]+yext[r,p]=sum(i in I) intens[i,p]*Chargespe[r,i];
const21(r in R, p in P): yint[r,p]<=Capa_int_RP[r,p];
const22(r in R, p in P): yext[r,p]<=Capa_ext_RP[r,p];
const23: cout=sum(r in R, p in PCmax) CoutRP[r,p]*yext[r,p];

solve;
display tf,ts;
end;

```

Figure F.1 Modèle de calcul

```

set I := 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10; #numéro de WP
set T := 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33
 $\vdots$  ; #Discrétisation du temps
set P := 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10; #Nombre des périodes
set Pl := 1 2 3 4 5 6 7 8 9; #Nombre des périodes-1
set PCmax := 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10; #Nombre des périodes-1
set R := 1 2 3; #Nombre des ressources

param Horizon := 40; #Planning Horizon
param Coefcharge := 0;
param Coefprior := 0;
param Coefmakespan := 6;
param Coefcout := 0;
param Coefniv := 0;
param Periode:=
1 4
2 4
3 4
4 4
5 4
6 4
7 4
8 4
9 4
10 4; #durée période p

param Priorite:=
10 1
3 1
8 2
7 2
1 2
4 3
6 3
9 3
5 3
2 3; #Priorité du lot I

param Chargespe: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10:=
1 0 10 40 76 16 48 0 100 54 70
2 5 45 10 0 12 9 60 7 10 3
3 95 36 36 0 3 0 24 16 0 15; #Charge de travail requise du type de ressource R pour executer le lot I

param Charge:=
1 100
2 91
3 86
4 76
5 31
6 57
7 84
8 123
9 64
10 88; #Charge de travail totale requise pour executer le lot I

param Chargemax:=
1 24
2 23
3 25
4 19
5 15
6 15
7 24
8 43
9 28
10 20; #Charge de travail max associé à un lot i durant une période

param Chargemin:=
1 0
2 0
3 0
4 0
5 0
6 0
7 0
8 0
9 0
10 0; #Charge de travail min associé à un lot i durant une période

param Debutlot:=
1 0
2 0
3 0
4 0
5 0
6 0
7 0
8 0
9 0
10 0; #Date à partir de laquelle le lot i peut être exécuté

param Debut:=1; #Date début de projet
param Cmax:=30; #Date fin de projet

param Capa_int_RP: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10:=
1 98.0 98.0 98.0 98.0 98.0 98.0 98.0 98.0 98.0 98.0
2 34.0 34.0 34.0 34.0 34.0 34.0 34.0 34.0 34.0 34.0
3 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0 50.0; #Capacité interne de la ressource R au cours de la période P

param Capa_ext_RP: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10:=
1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0; #Capacité externe de la ressource R au cours de la période P

param CoutRP: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10:=
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
2 1 1 1 1 1 1 1 1 1
3 1 1 1 1 1 1 1 1 1; #Cout de la ressource externe R au cours de la période P

```

Figure F.2 Exemple données d'entrées modèle

	ts	tf	:=
1	1	12	
2	14	18	
3	1	5	
4	1	8	
5	1	4	
6	1	5	
7	1	8	
8	11	18	
9	9	14	
10	1	8	
			;
			yint [*,*] (tr)
:	1	2	3
1	98	34	50
2	98	34	50
3	82	34	49
4	81	33	50
5	55	26	26
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
			;

Figure F.3 Exemple solution

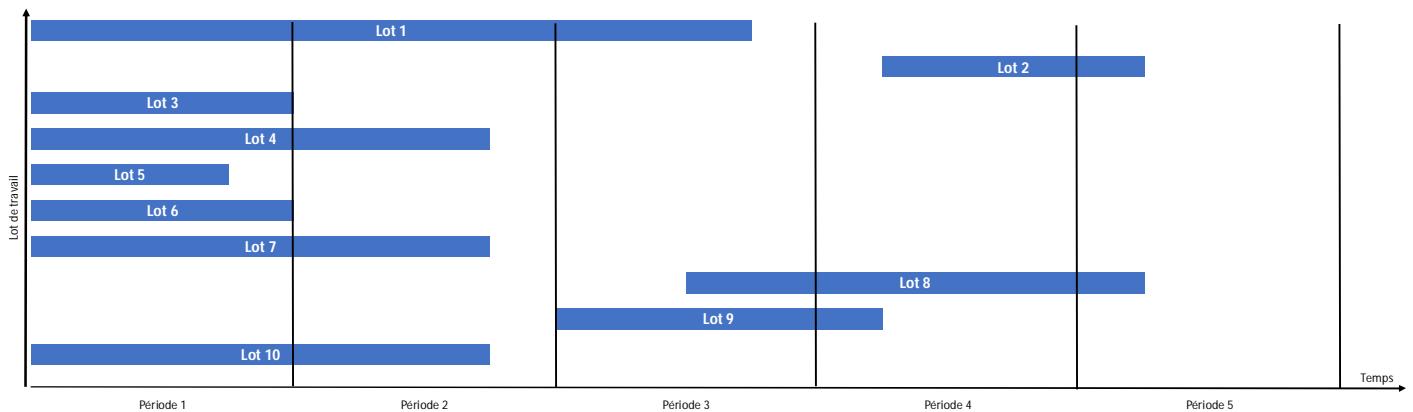


Figure F.4 Échéancier de l'exemple

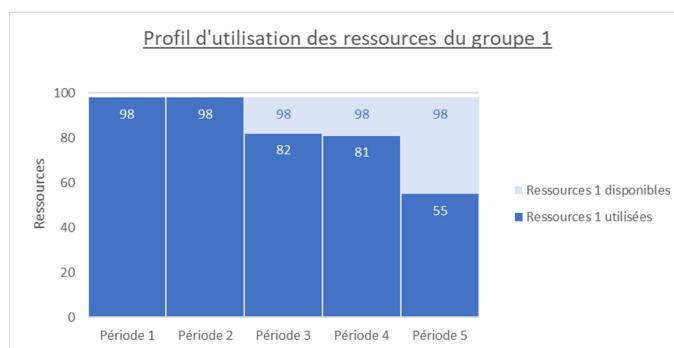


Figure F.5 Profil d'utilisation des ressources du groupe 1 de l'exemple

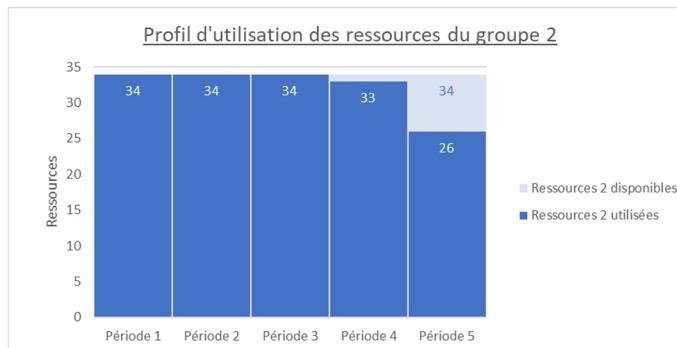


Figure F.6 Profil d'utilisation des ressources du groupe 2 de l'exemple

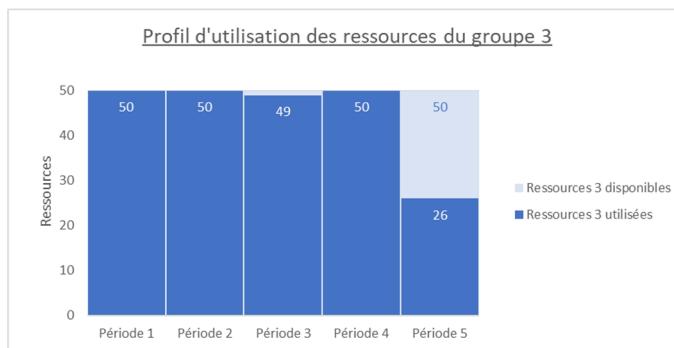


Figure F.7 Profil d'utilisation des ressources du groupe 3 de l'exemple