

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université M'hamed Bougara de Boumerdes**  
**Faculté des Sciences**



**Mémoire de fin d'étude**  
**Présenté Pour L'Obtention Du Diplome De Master**  
**En : Recherche Opérationnelle, Optimisation et Management Stratégique**  
**Sujet**

Planification et Ordonnancement d'un projet avec ressources  
limités au sein de GCB  
« Travaux de Canalisation et Raccordement de 14 Puits de  
Gaz à In-Aminas »

**Réalisé par : Djellali Abdelhak**

Soutenu le 27/09/2022 devant le jury composé de :

<b>Mr F. Cheurfa</b>	<b>MCB</b>	<b>UMBB</b>	<b>Président</b>
<b>Mr S. Tahrbouchet</b>	<b>MCB</b>	<b>UMBB</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mme S. Ouatiki</b>	<b>MCA</b>	<b>UMBB</b>	<b>Promotrice</b>

**Année Universitaire : 2021/2022**

# *Remerciements*

Tout d'abord, nous remercions, **ALLAH**, le tout puissant et  
miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage  
d'accomplir ce modeste travail.

Je voudrais aussi remercier ma promotrice **Mme Ouatiki**  
pour sa patience, sa disponibilité et ses judicieux conseils.

Merci aux membres du jury **Mr Tahrbouchet** et **Mr**  
**Cheurfa** pour le grand honneur qu'ils me font en acceptant  
de juger ce travail, j'ai remercié de votre enseignement et je  
suis très reconnaissant de bien vouloir porter intérêt à ce  
travail.

Nous remercions la société national de génie civil et bâtiment  
(GCB) pour avoir eu foi en moi et ma avoir fait confiance  
pour ce travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants du  
Département des Mathématiques et spécialement la spécialité  
Recherche Opérationnelle.

# *Dédicaces*

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à tous ceux qui quelques soit les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour le plus sincère.

À ma très chers mère **Djamila**, qui m'a soutenu et encouragé

durant toute ces années d'études, à mon cher frère

**Mohammed** , qui a partagé avec moi tous les moments

d'émotion lors de la réalisation de ce travail.

À tous mes amis **Cilya, Chemseddine, Omar, Yacine** et

**Zaki**,

À toutes les personnes de ma grande famille, **Ayoub, Ishak**,

**Naima** et **Mahdi**.

À ma **petite chatte** pour toutes les nuits blanches passées à mes cotés durant ce travail.

À tous ceux que j'aime et qui sont ma source du bonheur et de motivation.

*Abdelhak*

# Table des matières

<b>Table des figures</b>	<b>v</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>vi</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>I Présentation de l'organisme d'accueil</b>	<b>3</b>
I.1 Présentation . . . . .	3
I.2 Organisation . . . . .	3
I.3 Ressources . . . . .	4
I.3.1 Ressources Humaines . . . . .	4
I.3.2 Ressources Matérielles . . . . .	5
I.4 Infrastructures . . . . .	6
I.5 Activités de GCB . . . . .	6
I.6 Les partenaires de GCB . . . . .	7
I.7 Analyse SWOT . . . . .	8
I.7.1 Forces . . . . .	9
I.7.2 Faiblesse . . . . .	9
I.7.3 Opportunités . . . . .	9
I.7.4 Menaces . . . . .	9
<b>II Généralité sur la gestion de projet</b>	<b>10</b>
II.1 Introduction . . . . .	10
II.2 Le management de projet . . . . .	10
II.2.1 Définition d'un Projet . . . . .	11
II.2.2 Le chef de Projet . . . . .	11
II.2.3 Cycle de vie d'un projet . . . . .	11
II.2.4 La planification d'un projet . . . . .	13
II.2.5 Le triangle de la triple contrainte . . . . .	16

II.3	Problème d'ordonnancement de projet . . . . .	17
II.3.1	Définition d'ordonnancement . . . . .	17
II.3.1.1	Les tâches . . . . .	17
II.3.1.2	Les ressources . . . . .	18
II.3.1.3	Les contraintes . . . . .	18
II.3.2	Domaines d'application d'ordonnancement . . . . .	19
II.3.3	Les objectifs d'ordonnancement . . . . .	20
II.3.4	Le problème d'ordonnancement de projets sous contraintes de ressources (RCPSP) . . . . .	20
II.3.5	Problème de minimisation des coût du projet (RACP) . . . . .	22
II.3.6	Notion de complexité des problèmes . . . . .	22
II.3.6.1	La classe P . . . . .	23
II.3.7	Notations de la théorie des graphes . . . . .	24
II.4	Conclusion . . . . .	26
<b>III</b>	<b>Méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement</b>	<b>27</b>
III.1	Introduction . . . . .	27
III.2	Outils de planification des tâches d'un Projet . . . . .	27
III.2.1	La méthode MPM . . . . .	27
III.2.2	La méthode PERT . . . . .	31
III.2.3	Le diagramme de GANTT . . . . .	34
III.2.4	Les logiciels . . . . .	36
III.2.4.1	Microsoft Project . . . . .	36
III.2.4.2	Primavera Project Management . . . . .	38
III.3	Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation . . . . .	38
III.3.1	Les méthodes exactes . . . . .	39
III.3.1.1	La méthode de séparation et évaluation . . . . .	39
III.3.1.2	La programmation dynamique . . . . .	40
III.3.1.3	La programmation linéaire . . . . .	41
III.3.2	Les méthodes approchées . . . . .	41
III.3.2.1	Les heuristiques . . . . .	41
III.3.2.2	Les métaheuristiques . . . . .	42
III.3.2.2.1	La recherche Locale . . . . .	42
III.3.2.2.2	La recherche Tabou . . . . .	43

III.3.2.2.3	Le recuit simulé . . . . .	46
III.3.2.2.4	Les algorithmes génétiques . . . . .	47
III.4	Conclusion . . . . .	48
<b>IV</b>	<b>Problématique, Modélisation et résolution du problème</b>	<b>49</b>
IV.1	Introduction . . . . .	49
IV.2	Problématique . . . . .	49
IV.3	Modélisation de la première partie . . . . .	51
IV.3.1	Description des travaux . . . . .	52
IV.3.2	Ressources mises en oeuvre . . . . .	52
IV.3.2.1	Les ressources matérielles . . . . .	53
IV.3.2.2	Les ressources personnelles . . . . .	54
IV.3.3	Délai de réalisation . . . . .	55
IV.3.4	Budget de réalisation . . . . .	55
IV.3.5	Élaboration du programme des travaux . . . . .	55
IV.4	Résolution de la première partie . . . . .	58
IV.4.1	Application de la méthode MPM . . . . .	58
IV.4.2	Diagramme de Gantt . . . . .	61
IV.5	Modélisation de la deuxième partie . . . . .	63
IV.6	Conclusion . . . . .	66
<b>V</b>	<b>Implémentation</b>	<b>67</b>
V.1	Introduction . . . . .	67
V.2	Application de l'algorithme Tabou . . . . .	67
V.2.1	Présentation de logiciel MATLAB . . . . .	68
V.2.2	Exécution de l'algorithme Tabou (RT) . . . . .	68
V.3	Interprétation des résultats . . . . .	71
V.4	Comparaison des résultats . . . . .	72
V.5	Conclusion . . . . .	72
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>73</b>
	<b>Annexes</b>	<b>74</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>77</b>

# Table des figures

I.1	Organigramme de l'entreprise GCB. . . . .	4
I.2	Tableau représentant l'effectif de la GCB en 2021. . . . .	4
I.3	Image représentant des camions de GCB. . . . .	5
I.4	Image représentant des sideboom de GCB. . . . .	5
I.5	Image représente la direction générale de la GCB. . . . .	6
I.6	Représentation graphique des activités de GCB en 2021. . . . .	7
I.7	Image représente les partenaires de la société « GCB ». . . . .	8
I.8	Tableau représentant la forme d'analyse SWOT. . . . .	8
II.1	La courbe de cycle de vie d'un projet. . . . .	13
II.2	Le triangle magique de la gestion de projet. . . . .	16
II.3	les caractéristiques d'une tâche. . . . .	18
II.4	Un réseau d'un problème de RCPSP. . . . .	22
II.5	Le diagramme de Venn pour les classes de complexité. . . . .	24
III.1	Date de début au plus tôt. . . . .	28
III.2	Date de début au plus tard. . . . .	29
III.3	Réseau de la méthode MPM. . . . .	31
III.4	Une tâche de réseau PERT. . . . .	32
III.5	Une étape de réseau PERT. . . . .	32
III.6	Une tâche fictive de réseau PERT. . . . .	32
III.7	Réseau de la méthode PERT. . . . .	33
III.8	La représentation de lien fin-début. . . . .	34
III.9	La représentation de lien fin-fin. . . . .	34
III.10	La représentation de lien début-début. . . . .	35
III.11	La représentation de lien début-fin. . . . .	35
III.12	une représentation de diagramme de ganntt. . . . .	36
III.13	Interface de logiciel Microsoft Project 2019. . . . .	37
III.14	Interface de logiciel Primavera Project Management P6. . . . .	38

III.15	L'arbre de recherche de la méthode Branch and Bound. . . . .	40
III.16	Division en sous-problèmes. . . . .	40
III.17	Exploration de l'espace de recherche dans la recherche locale. . . . .	43
III.18	L'organigramme de la méthode de recherche Tabou. . . . .	45
IV.1	Organigramme des responsables de projet. . . . .	51
IV.2	La zone de projet. . . . .	51
IV.3	Plan du projet. . . . .	52
IV.4	Réseau du projet par la méthode MPM. . . . .	59
IV.5	Diagramme de Gantt du projet. . . . .	61
IV.6	Diagramme de Gantt du projet. . . . .	62
V.1	Insertion des données sous MATLAB. . . . .	69
V.2	Les 3 premiers itérations d'exécution de (RT) via MATLAB. . . . .	69
V.3	Solution optimale de (RT) via MATLAB. . . . .	70
V.4	Le résultat et fin d'exécution de (RT) via MATLAB. . . . .	70
V.5	Réseau MPM après l'accélération du projet. . . . .	74
V.6	Diagramme de gantt du projet après l'accélération du projet. . . . .	75
V.7	Diagramme de gantt du projet après l'accélération du projet. . . . .	76

# Liste des tableaux

III.1	Tableau d'ordonnancement du réseau MPM. . . . .	31
III.2	Tableau d'ordonnancement du réseau PERT. . . . .	33
IV.1	Tableau des ressources matérielles du projet. . . . .	53
IV.2	Tableau des ressources personnelles du projet. . . . .	54
IV.3	Tableau des tâches d'installation de tube 6". . . . .	56
IV.4	Tableau des tâches d'installation des tubes 12" et 20". . . . .	57
IV.5	Tableau des tâches d'installation de puits et manifolds. . . . .	58
IV.6	Tableau associé à la méthode MPM. . . . .	59
IV.7	Tableau associé à la méthode MPM. . . . .	60
IV.8	Tableau associé à la méthode MPM. . . . .	61
V.1	Tableau des tâches qui peuvent être accélérer. . . . .	67
V.2	Tableau des résultats obtenus par MPM. . . . .	71
V.3	Tableau des résultats obtenus par la Recherche Tabou. . . . .	71
V.4	Tableau des tâches accélérers. . . . .	71
V.5	Tableau de comparaison des résultats. . . . .	72

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

La recherche opérationnelle (RO) est la discipline des méthodes scientifiques utilisables pour prendre de meilleures décisions. Elle permet de rationaliser, de simuler et d'optimiser l'architecture et le fonctionnement des systèmes de production ou d'organisation. C'est une discipline de mathématiques appliquées qui s'intéresse à l'application des connaissances mathématiques aux autres domaines[20].

La gestion de projet est un domaine multidisciplinaire et est une partie très importante de la communauté de recherche opérationnelle basée sur l'idée que la gestion de projets est différente de la gestion d'autres types d'activités, une distinction souvent présentée comme la différence entre des projets temporaires qui produisent des résultats uniques et les opérations répétitives et continues. C'est un domaine très vaste qui a connu une forte croissance depuis le milieu des années 1990. La gestion de projet est une branche très appliquée dans laquelle les associations ont historiquement joué et continuent de jouer un rôle très important. À l'origine, le domaine s'est intéressé surtout aux techniques de planification de projets, avec peu de recherches dans le domaine de la recherche opérationnelle.

La théorie de l'ordonnancement de projet est une branche de la recherche opérationnelle qui consiste en la programmation de ses tâches et des ressources nécessaires à leurs exécutions, qui respecte les différentes contraintes techniques du projet et les disponibilités des ressources utilisées.

La société GCB (société nationale de génie civil et bâtiment) s'occupe de la réalisation de projets de génie civil et détient actuellement à son compte un très grand nombre de réalisations dans divers domaines, comme toute autre société, GCB est confrontée à un problème très important qui est l'optimisation de la planification des projets.

La GCB de Boumerdes nous a confié de prendre en charge l'un de ses projets de la direction des travaux de canalisation (DTC), qui concerne en l'occurrence le "développement des champs de TINRHERT, travaux de Raccordement de quatorze (14) puits à Ohanet, région de In-Aménas".

Pour réaliser une bonne planification de ce projet, on fait appel à des méthodes de recherche opérationnelle et de gestion de projet pour atteindre les objectifs de la société.

Ce mémoire est constitué de cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de la société nationale de génie civil et bâtiment (GCB).

Dans le deuxième chapitre, nous donnerons quelques rappels sur la gestion de projets, des notions de base de l'ordonnancement et un aperçu sur le problème d'ordonnancement avec contraintes de ressources RCPSP.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les outils de planification de projets et les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation.

Le quatrième chapitre sera consacré à la description de notre problématique et à la représentation du modèle mathématique qui y est associé. nous traitons la résolution du problème, en appliquant des méthodes de résolution présentées dans le troisième chapitre.

Dans le dernier chapitre, on optimise la solution trouvée en quatrième chapitre et nous ferons une comparaison entre les résultats obtenus et ceux prévus de l'entreprise. Enfin, nous terminerons par une conclusion générale qui synthétise nos résultats.

# CHAPITRE I

## PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCEUIL

### I.1 Présentation

La société nationale génie civil et bâtiment par abréviation GCB est une société issue de restructuration de Sonatrach créée par décret présidentiel n° 81-173 du 1er Aout 1981 portant création de l'entreprise nationale de génie civil et bâtiment.

GCB est érigée en société par actions le 21 juillet 1998 avec un capital social de 2.000.000.000 DA entièrement détenu par le groupe Sonatrach. Le capital de la société a dépassé 8.160.000.000 DA après l'approbation de l'assemblée générale extraordinaire du 27 décembre 2018 [25].

GCB capitalise une longue expérience dans les différents domaines de la construction, une existence couronnée de succès qui lui a valu une maîtrise sereine de ses activités.

### I.2 Organisation

La société est organisée en structures régionales polyvalentes dont chacune dispose des capacités matérielles et managériales pour répondre aux besoins des clients de GCB dans sa région.

Ces structures régionales ont l'appui des structures support en matière de matériel de transport, moyens généraux, techniques et financiers en fonction des besoins tout en jouant un rôle régulateur pour optimiser les moyens de la société.

GCB dispose d'une direction d'engineering, d'architecture & topographie et d'une Direction de réalisation d'ouvrages métalliques. Avec une expérience avérée de plus de 41 années dans les différents domaines de la construction, GCB répond aux cahiers

des charges des clients les plus exigeants.

L'organigramme de l'entreprise GCB qui décrit ses différentes directions se présente dans la figure qui suit :

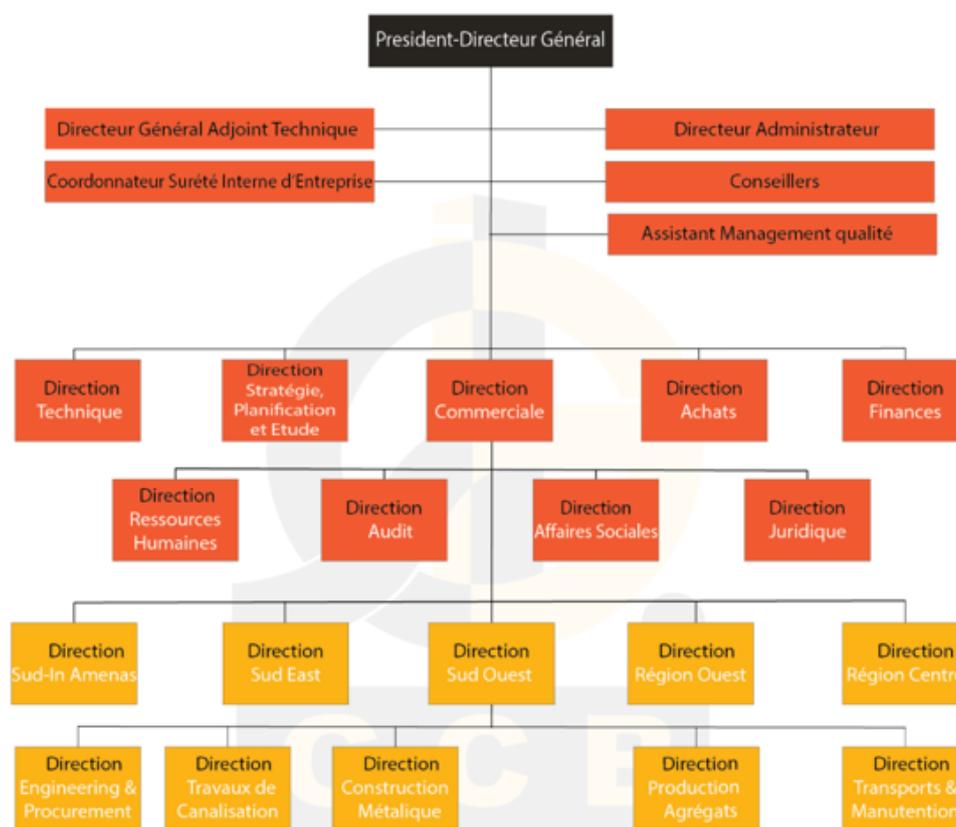


FIGURE I.1 – Organigramme de l'entreprise GCB.

## I.3 Ressources

### I.3.1 Ressources Humaines

GCB emploie 16 000 travailleurs dont 90% contractuels, la plupart spécialisé dans le domaine des grands travaux de construction et se répartissent par catégorie socioprofessionnelle comme suit :

Effectif total GCB	16 000
Cadres	1 805 soit 11%
Maîtrise	4 772 soit 30%
Exécution	9 423 soit 59%

FIGURE I.2 – Tableau représentant l'effectif de la GCB en 2021.

GCB consacre une moyenne de 40 millions de dinars pour le volet formation et perfectionnement au profit de son personnel, notamment dans les différents métiers de base de la société.

### I.3.2 Ressources Matérielles

GCB dispose de moyens matériels et infrastructurels qui lui permettent d'être extrêmement performante et autonome dans son domaine d'activité. GCB met en œuvre un parc matériel de plus de 4900 articles dont 3500 engins et équipements lourds.



FIGURE I.3 – Image représentant des camions de GCB.



FIGURE I.4 – Image représentant des sideboom de GCB.

## I.4 Infrastructures

GCB dispose d'infrastructures fixes, à vocations industrielles, administratives et socioprofessionnelles et sont notamment implantées à :

- Alger (Zones industrielles d'El-Harrach, et d'Oued-Smar),
- Boumerdes (Boumerdes et Boudouaou),
- Arzew (Zone industrielle d'Arzew),
- Hassi-Messaoud- RhourdNouss – Nezla,
- Hassi-R'mel – Insalah – Adrar,
- In-Amenas – Illizi -Tin FouyéTabenkort – Alrar.

GCB dispose d'infrastructures et de bases de vie sur ses différents chantiers avec une capacité d'accueil pour la prise en charge de plus de 6 500 agents sur les différents sites des projets (studios, cabines d'hébergement, chalets, cantines, etc..).



FIGURE I.5 – Image représente la direction générale de la GCB.

## I.5 Activités de GCB

Les activités de GCB sont diversifiées ces dernières années et sont :

- Terrassements en grande masse,

- Engineering & procurement,
- Travaux de canalisation,
- Construction métallique et chaudronnerie,
- Montage mécanique et maintenance industrielle,
- Génie civil hydraulique,
- Génie civil bâtiment ferroviaire,
- Génie civil industriel parapétrolier,
- La réalisation de pistes d'atterrissage et aéroports,
- La réalisation des Routes et autoroutes,
- Production agrégats.

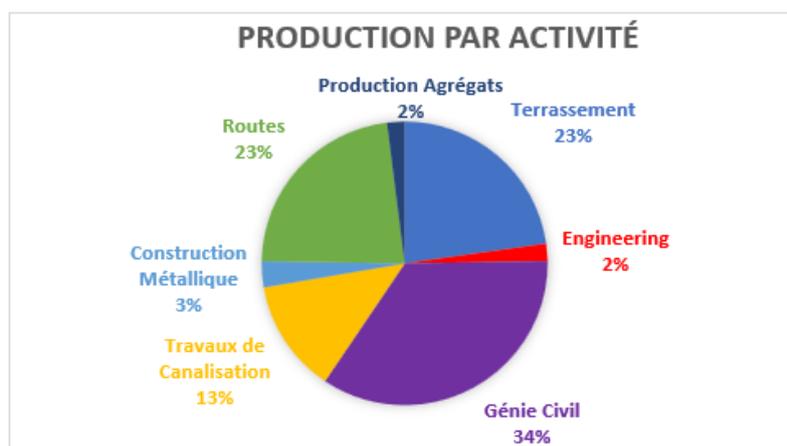


FIGURE I.6 – Représentation graphique des activités de GCB en 2021.

## I.6 Les partenaires de GCB

Le partenariat de qualité de GCB lui permet une meilleure adaptation à son environnement. Par sa présence sur les principaux pôles économiques, GCB entend construire des relations étroites et permanentes avec ses clients, avec pour seul objectif de réaliser leurs ouvrages au meilleur prix, dans les délais requis et selon les exigences de la profession. Cela lui a valu de compter dans son portefeuille les clients de grandes sociétés nationales et internationales telles :

- Sonatrach et ces filiales comme : NAFTAL.
- Les associés de Sonatrach comme : GROUPEMENT BRS, GROUPEMENT TFT, GROUPEMENT TIM, GROUPEMENT REGGANE, SH/BP/STATOIL, SH/AAC.

- L'administration comme : DTP Algérie, ANA, ANBT, ANESRIF, ONA.
- Les grandes firmes comme : PETROFAC, AGIP(Italie), REPSOL(Espagne), BHP(Australie), KBR, ABB (Pays bas) ... etc.



FIGURE I.7 – Image représente les partenaires de la société « GCB ».

## I.7 Analyse SWOT

(Strengths = Forces, Weaknesses = Faiblesses, Opportunities = Opportunités, Threats = Menaces) est un outil courant de planification utilisé pour analyser les forces et les faiblesses au sein d'une organisation(entreprise), et les opportunités et menaces à l'extérieur de celle-ci [2].

Une analyse SWOT peut combiner tous ces éléments dans un tableau simple qui contient le formulaire suivant :



FIGURE I.8 – Tableau représentant la forme d'analyse SWOT.

Nous pouvons résumer l'analyse SWOT de la GCB comme suite :

### **I.7.1 Forces**

- GCB a plus de 42 ans d'expérience dans son domaine, et 16 000 employés qualifiés.
- GCB a des activités couvrant une grande partie du territoire nationale, notamment dans le grand sahara.
- GCB dispose de moyens matériels et infrastructurels qui lui permettant d'être extrêmement performante et autonome dans son domaine d'activité.
- GCB dispose d'infrastructures et de bases de vie sur ses différents chantiers avec une capacité d'accueil pour la prise en charge de plus de 6 500 agents sur les différents sites des projets.

### **I.7.2 Faiblesse**

- GCB a un nombre des pannes de matériels très élevés, et la maintenance de la société n'est pas suffisante pour les réparations.
- La GCB fait toujours appelle à la location des matérielles pour couvrir ses besoins. Malgré que la société possède un grand parc de matériels.

### **I.7.3 Opportunités**

- GCB évolue dans un environnement caractérisé par marché à la recherche d'Entreprise clé en main offrant des opportunités intéressantes compte tenu des nouvelles orientations politiques favorisant les moyens nationaux.
- Partenariat avec plusieurs entreprises nationales et internationales telles que Sonatrach, ce qui lui donne la priorité dans la prise de projets.
- La création d'une structure production des agrégats.
- - Le développement de l'activité travaux de canalisation petit diamètre.
- L'environnement politique favorise la production nationale.

### **I.7.4 Menaces**

- La grande concurrence des entreprises dans le domaine de Génie civil comme la GTP, COSIDER... etc.

## CHAPITRE II

# GÉNÉRALITÉ SUR LA GESTION DE PROJET

### II.1 Introduction

La gestion de projet est le processus de la coordination et de l'intégration des activités de manière efficace et effective de l'utilisation des ressources limitées. Il consiste à lier les ressources à leurs réalisations respectives et les assembler dans l'ensemble du projet [14].

Les techniques d'ordonnancement dans le cadre de la gestion d'un projet ont pour objectif de répondre au mieux aux besoins exprimés par un client, au meilleur coût et dans les meilleurs délais, en tenant compte des différentes contraintes.

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques généralités sur la gestion de projet, les problèmes d'ordonnancement et les bases de planification.

### II.2 Le management de projet

Le management de projet est l'application de connaissances, de compétences, d'outils et de techniques aux activités du projet afin d'en satisfaire les exigences[15]. Le management de projet est accompli par l'application et l'intégration des processus de management de projet groupés en [17] :

- démarrage,
- planification,
- exécution,
- surveillance,
- clôture.

Le management de projet comprend les points suivants :

- déterminer les exigences,
- définir des objectifs clairs et réalisables,
- équilibrer les exigences concurrentes de qualité, de contenu, de délai et de coût,
- adapter les cahiers des charges, les plans et l’approche aux différentes préoccupations et attentes des diverses parties prenantes.

### **II.2.1 Définition d’un Projet**

Un projet est un ensemble cohérent d’objectifs atteints à un moment donné en mobilisant des ressources pour répondre à des besoins stratégiques plutôt qu’en répondant simplement à des problèmes actuels.

Le projet est également un processus unique consistant en un ensemble d’activités coordonnés et contrôlés avec des dates de début et de fin conçues pour atteindre des objectifs basés sur des exigences spécifiques, incluant les contraintes de délais, de coûts et de ressources [18].

### **II.2.2 Le chef de Projet**

Le chef de projet ou chargé de projet est la personne chargée de mener un projet et de contrôler son bon déroulement. De manière générale, il dirige ou anime une équipe pendant la durée du ou des divers projets dont il a la charge. Ce rôle fait appel à des compétences de gestion de projet, de bonnes capacités relationnelles, ainsi que des connaissances techniques dans les domaines concernés.

Le terme s’applique dans divers secteurs, tels que le BTP, l’ingénierie industrielle, logicielle, le marketing et la communication, pour la conception ou la modification de produits, de services, de systèmes, ou bien la mise en place de nouveaux procédés ou démarches comme par exemple la démarche qualité, l’amélioration de la productivité, ou la gestion de la relation client[9].

### **II.2.3 Cycle de vie d’un projet**

Un projet passe par une série de phases successives entre lesquelles il n’existe pas réellement de démarcation, elles sont toutes particulièrement importantes et déterminantes pour la réussite du projet. Le nombre de phases du cycle de vie d’un

projet n'est pas constant, il dépend du type de projet ainsi que des acteurs en présence.

### **La définition du projet**

La définition du projet a recours à l'analyse de l'environnement du projet, de façon à élaborer une stratégie de gestion des parties prenantes du projet, à une méthode de formulation du projet permettant d'intégrer dans la conception du projet des préoccupations d'évaluation et à des études spécifiques permettant de statuer sur la faisabilité du projet, en général la définition du projet revient à :

- déterminer le but du projet,
- estimer les ressources, les coûts et les délais,
- définir le type d'organisation,
- choisir le chef de projet,
- estimation des risques.

### **La Planification : planifier la réalisation**

- construire le diagramme de réseau de projet,
- définition des responsabilités (ressources humaines et personnelles),
- définition du détail des coûts et délais,
- estimation de la rentabilité,
- engagement des hommes clés.

### **L'Exécution : réaliser la planification**

C'est la phase qui Génère le plus de coûts

- exécution du travail,
- pilotage coûts, délais, spécification,
- suivre le progrès du projet par rapport au plan,
- résolution des problèmes.

## La Clôture : préparer les futures planifications

- l'Analyse des écarts entre ce qui est planifié et réalisé.
- l'évaluation du projet : elle consiste à mesurer les effets réels du projet. Son but est d'apprendre du projet évalué, afin de mieux le comprendre pour mieux agir.

Évaluer c'est :

- décrire le déroulement d'un projet et de ses activités.
- constater les progrès réalisés et les résultats obtenus par la mise en œuvre d'un projet, au moyen de données appropriées et de leur analyse complète et systématique.

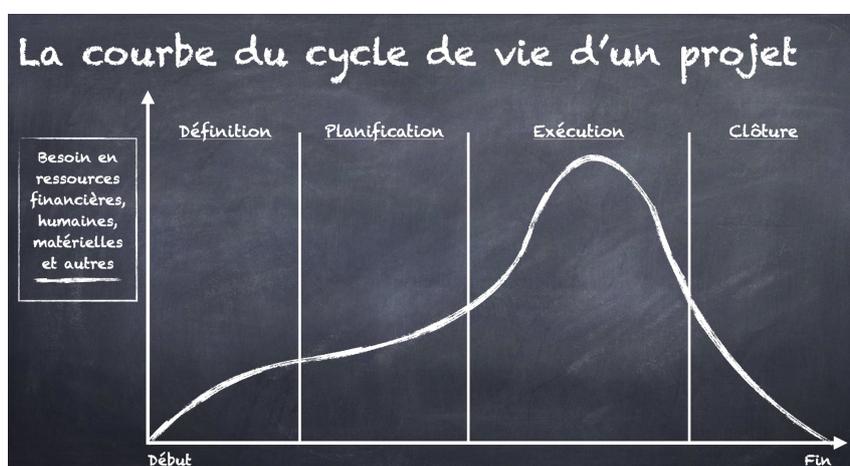


FIGURE II.1 – La courbe de cycle de vie d'un projet.

### II.2.4 La planification d'un projet

La planification de projet est un processus dynamique basé sur une évaluation continue. Cela inclut également la répartition des actions dans le temps pour atteindre les objectifs. Le secret d'une planification réussie consiste à définir : ce qui doit être fait, qui doit le faire et quand. Les objectifs principaux de la planification de projet sont les suivants :

- minimiser la durée d'exécution totale du projet,
- minimiser le coût total du projet,
- gestion optimale des ressources.

## **La construction du planning**

Le planning se matérialise par un document avec une échelle de temps ainsi que la durée de chaque tâche à effectuer sur l'échelle de temps.

Le planning est un outil de communication, utilisé par les membres d'une équipe de projet pour l'analyse et la prise de décision. c'est pour cela des précautions supplémentaires doivent être prises lors de la construction.

Le planning se construit selon un processus en 9 étapes :

### **Étape 1 : analyser le projet**

Cette étape consiste à bien comprendre quels sont les objectifs du projet à travers les documents disponibles (contrats, cahier des charges, lettre de mission) et à commencer à élaborer une stratégie pour atteindre les résultats souhaités.

### **Étape 2 : lister les tâches**

C'est sans doute l'étape la plus difficile. Il s'agit de lister de manière exhaustive toutes les actions à entreprendre, y compris celles que l'on devra subir, qui ne font pas partie du projet mais qui auront un impact sur le délai.

### **Étape 3 : définir les contraintes d'enchaînement**

Il s'agit pour chacune des tâches de préciser la ou les tâches « immédiatement antérieures » qui doivent être terminées pour commencer la tâche considérée, et les tâches « immédiatement successives » qui peuvent être commencées dès que ladite tâche est terminée.

### **Étape 4 : tracer le réseau**

Une fois toutes les contraintes de séquence déterminées, nous traçons un réseau logique entre les tâches en donnant la durée, la date de début et la date de fin de la tâche.

### **Étape 5 : déterminer la durée des activités**

La durée d'une tâche doit être déterminée par le responsable du travail. Il est le mieux placé pour savoir combien de ressources il sera capable de gérer. Il sera

responsable du respect de son planning.

### **Étape 6 : calculer les dates**

Le calcul des dates est l'étape la plus importante dans la construction d'un calendrier. Quatre dates sont calculées pour chaque activité :

- date de début au plus tôt,
- date de début au plus tard,
- date de fin au plus tôt,
- date de fin au plus tard,

### **Étape 7 : identifier le chemin critique**

Un réseau logique est composé de chemins du début à la fin d'un projet. Le chemin critique commande la durée du projet, c'est le chemin qui contient la plus longue somme de durées de tâches du début à la fin du projet. C'est donc sur le chemin critique que se trouvent les solutions pour réduire la durée du projet si cela est nécessaire.

### **Étape 8 : ajuster les délais prévisionnels**

Si la date de fin de projet précédemment calculée est trop tardive par rapport à ce qui est souhaité, le délai doit être réduit en utilisant deux solutions possibles pour réduire la durée des tâches du projet :

- Si possible, réduisez la durée des tâches du chemin critique en faisant des heures supplémentaires ou en injectant plus de ressources. Cela entraîne une augmentation des coûts du projet
- Changer l'enchaînement des tâches, en anticipant le début d'une tâche en utilisant uniquement une partie de la tâche précédente.

### **Étape 9 : établir le planning à barres (Planning de GANTT)**

C'est un planning de progression pour visualiser et gérer les délais du projet. À partir du réseau optimisé à l'étape 8, on représente la durée de chaque tâche ainsi que leurs marges sur l'échelle de temps. Cela permet à toutes les parties prenantes du projet d'avoir la même représentation dans le temps de ce que l'on va faire pour atteindre les objectifs du projet.

## II.2.5 Le triangle de la triple contrainte

Le triangle de la triple contrainte, aussi appelé triangle de la performance, est souvent utilisé pour illustrer l'interdépendance des variables du projet. En effet, dans un projet, une modification apportée à l'une des variables aura des effets irréversibles sur les autres, autrement dit, privilégier une contrainte se fait généralement au détriment des autres. Ainsi, pour un projet donné, si l'on décide de réduire :

- **Le temps** : Afin de maintenir le niveau de qualité convenu, il faut augmenter le budget, par exemple en allouant plus de ressources, si non en acceptant de diminuer les attentes au plan de la qualité.
- **Le budget** : il faudra augmenter le temps de développement accordé pour maintenir le niveau de qualité prévu, sinon, accepter là aussi d'en diminuer les attentes sur le plan de la qualité.
- **La qualité** : il sera évidemment possible soit d'en réduire les coûts, soit d'en réduire le temps de développement ou encore de répartir l'économie à la fois sur les coûts et le temps de développement.

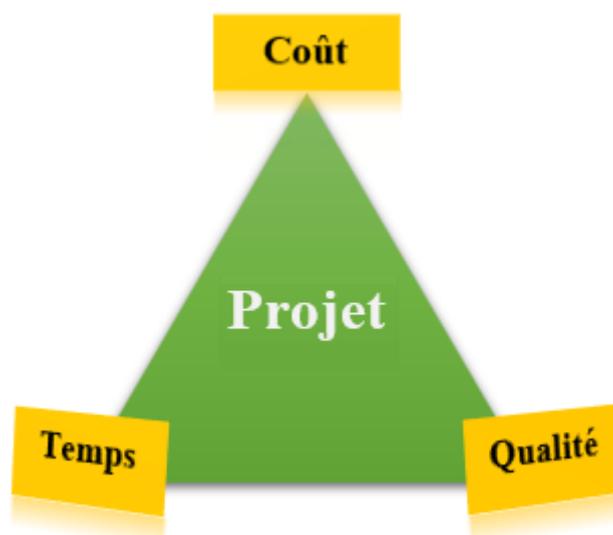


FIGURE II.2 – Le triangle magique de la gestion de projet.

## II.3 Problème d'ordonnement de projet

L'ordonnement est une branche de la recherche opérationnelle et de la gestion de projet qui vise à améliorer la performance d'une entreprise en termes de coûts de production et de délais.

### II.3.1 Définition d'ordonnement

L'ordonnement est l'élaboration d'un plan d'action permettant de déterminer les séquencements ou au contraire les parallélismes possibles entre l'exécution des tâches précédemment identifiées cette dernière est une étape cruciale et non négligeable dans la gestion de projet.

Pour procéder à l'ordonnement des tâches, il faut, pour chaque tâche élémentaire, lister les tâches antérieures, au vu des informations collectées sur le terrain et sélectionner les seules tâches immédiatement antérieures. le planning doit permettre l'identification de l'ordonnement des tâches du projet.

Ordonner un ensemble de tâches, c'est programmer leur exécution en leur allouant les ressources requises et en fixant leurs dates de début.

Les différentes données d'un problème d'ordonnement sont les tâches, les ressources, et les contraintes.

#### II.3.1.1 Les tâches

Une tâche  $i$  est une entité élémentaire organisée dans le temps, par une date de début  $t_i$  et de fin  $f_i$  dont la réalisation nécessite une durée  $d_i$  telle que [21] :

$$d_i = f_i - t_i$$

Elle est constituée d'un ensemble d'opérations qui requiert, pour son exécution, certaines ressources et qu'il est nécessaire de programmer de façon à optimiser un certain objectif. Généralement une tâche est caractérisée par les paramètres suivants (qui sont bien définis à au pages 26, 27) :

- $t_i$  : la date de début au plus tôt de la tâche  $i$ ,
- $T_i$  : la date de début au plus tard de la tâche  $i$ ,
- $f_i$  : la date de fin au plus tôt de la tâche  $i$ ,

- $F_i$  : la date de fin au plus tard de la tâche  $i$ ,
- $d_i$  : la durée d'exécution de la tâche  $i$ .

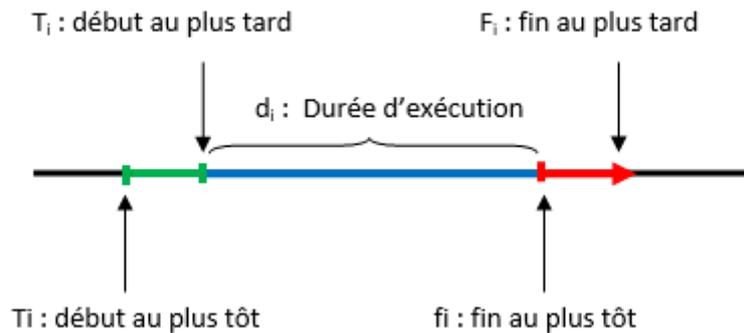


FIGURE II.3 – les caractéristiques d'une tâche.

Lorsqu'on connaît à l'avance l'ensemble des tâches à exécuter et à partir de quelle date, on dit qu'on est devant un problème statique, et lorsque l'ensemble des tâches évolue avec le temps de façon indéterministe on dit qu'on a un problème dynamique.

### II.3.1.2 Les ressources

Une ressource  $k$  est un moyen technique ou humain utilisé pour réaliser une tâche. elle est disponible pour une quantité limitée.

La disponibilité est généralement exprimée par une capacité propre à chaque ressource  $k$  notée  $R_k \geq 1$ .

On trouve deux types de ressources :

- **Les ressources consommables** : ce sont des ressources, après avoir été allouées à une tâche, elles deviennent indisponibles pour les tâches suivantes, comme l'argent, les matières premières, etc.
- **Les ressources renouvelables** : ce sont des ressources, après avoir été allouées à une tâche, elles redeviennent disponibles après la fin de cette tâche pour les tâches suivantes, comme les machines, le personnel, les fichiers, ect.

### II.3.1.3 Les contraintes

Une contrainte exprime des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre simultanément les variables représentant les relations reliant les tâches, le temps et les ressources. Plus les contraintes sont nombreuses, plus le problème d'ordonnement devient plus difficile [12].

On distingue deux types de contraintes, les contraintes temporelles et les contraintes de ressources.

### **Les contraintes temporelles :**

Les contraintes temporelles concernent les délais de fabrication imposés. Ces contraintes peuvent être :

- Des contraintes de dates butoirs : certaines tâches doivent être achevées avant une date imposée.
- Des contraintes de précédence : une tâche  $j$  ne peut commencer avant qu'une tâche  $i$  ne soit terminée.
- Des contraintes de dates de début au plus tôt : liées à l'indisponibilité de certains facteurs nécessaires pour commencer l'exécution des tâches.

### **Les contraintes de ressources :**

Ces contraintes concernent la limitation de la quantité de ressources de chaque type. Dans ce cadre, deux types de contraintes de ressources sont distinguées :

- Les contraintes disjonctives : Une contrainte disjonctive impose la non-réalisation simultanée de deux tâches A et B. On trouve de telles contraintes dans le cas d'utilisation d'une ressource présente en un seul exemplaire (une grue, une équipe, etc.) ou pour formuler des interdictions de réalisation simultanée pour des raisons de sécurité ou des problèmes de place[11].
- Les contraintes cumulatives : on parle de contraintes cumulatives lorsque les tâches demandent une partie d'une ou plusieurs ressources présentes en quantité limitée.

## **II.3.2 Domaines d'application d'ordonnancement**

L'ordonnancement est lié aux plusieurs secteurs de recherche et d'activités :

- En informatique, le choix de tâches à envoyés au processeur est considéré comme un problème d'ordonnancement.
- En production, l'ordonnancement consiste à déterminé les séquences d'opérations à réaliser sur les différentes machines de l'atelier.
- En gestion de projets, ordonnancer, c'est déterminer les dates d'exécution des tâches de projet ainsi que les ressources matérielles et personnel.

- En administration, l'ordonnancement est présenté dans gestion des ressources humaines, l'emploi du temps, etc.

### II.3.3 Les objectifs d'ordonnancement

Les objectifs dits aussi les critères d'évaluation sont les indicateurs de performance sur lesquels se base le choix d'un ordonnancement satisfaisant. En ordonnancement, les critères à optimiser consistent à minimiser ou maximiser une fonction objectif. Cette fonction objectif est généralement liée aux temps, aux ressources ou bien aux coûts[12].

- **Les objectifs liés au temps :** On trouve par exemple la minimisation du temps total d'exécution, du temps moyen d'achèvement, des durées totales de réglage ou des retards par rapport aux dates de livraison.
- **Les objectifs liés aux ressources :** maximiser la charge d'une ressource ou minimiser le nombre de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches sont des objectifs de ce type.
- **Les objectifs liés au coût :** ces objectifs sont généralement de minimiser les coûts de lancement, de production, de stockage, de transport, etc.

La satisfaction de tous les critères à la fois est souvent délicate, car elle conduit souvent à des situations contradictoires et à la recherche de solutions à des problèmes complexes d'optimisation .

### II.3.4 Le problème d'ordonnancement de projets sous contraintes de ressources (RCPSP)

Le problème d'ordonnancement de projet sous contraintes de ressources (RCPSP) est un problème d'optimisation combinatoire formalisé pour la première fois en 1969 par Pritsker et al [24]. ce problème est défini par  $(U, d, E, R, B, b)$ , où :

$U$  : est un ensemble d'activités.

$d$  : est un vecteur de durées d'exécution.

$E$  : est un ensemble de relations de précédences.

$R$  : est un ensemble de ressources.

$B$  : est un vecteur de capacités (disponibilités des ressources).

$b$  : est une matrice de demandes (consommations de ressource).

Dans ce problème on cherche à trouver un ordonnancement, de durée minimale, des activités d'un projet entrant en compétition sur l'usage de ressources renouvelables, cumulatives et disponibles en quantité limitée. C'est l'un des problèmes les plus étudiés en ordonnancement car il couvre un grand nombre des problèmes théoriques d'ordonnancement et on lui trouve un très grand nombre d'applications dans l'industrie. Les instances de tailles réelles qu'on trouve dans le domaine de gestion de production ne sont pas encore résolues d'une manière optimale.

### Description du RCPSP

Soit  $n$  le nombre d'activités (tâches) à ordonnancer, et  $m$  le nombre de ressources disponibles. Les activités constituant le projet sont identifiées par un ensemble  $U = \{0, \dots, n+1\}$ . L'activité 0 représente par convention le début de l'ordonnancement (début du projet), et l'activité  $n+1$  représente symétriquement la fin de l'ordonnancement (fin du projet). Toutes les deux sont des activités fictives. L'ensemble des activités non-fictives est noté  $A = \{1, \dots, n\}$ .

Les durées d'exécution sont représentées par un vecteur  $d$  de  $\mathbb{N}^{n+2}$ , où la  $i^{\text{ème}}$  composante  $d_i$ , est la durée d'exécution de l'activité  $i$ , avec les valeurs spéciales  $d_0 = d_{n+1} = 0$ , caractéristiques des deux activités fictives.

Les relations de précédences (représentées par exemple sur un graphe potentiels tâches) sont données par un ensemble  $E$  de paires d'indices d'activités telles que  $(i, j) \in E$  signifie que l'activité  $i$  précède l'activité  $j$ .

le RCPSP met en jeu des ressources renouvelables formalisées par l'ensemble  $R = \{1, \dots, m\}$ . Les disponibilités des ressources renouvelables sont représentées par un vecteur  $B$  de  $\mathbb{N}^m$  tel que  $B_k$  indique la capacité de la ressource renouvelable  $k$ . Les consommations des activités pour les ressources renouvelables figurent dans la matrice  $b$ , de taille  $(n+2) \times m$ , dont la composante  $b_{ik}$  représente la quantité de ressource renouvelable  $k$  utilisée par l'activité  $i$  sur toute sa durée d'exécution.

Un ordonnancement est un point  $t$  de  $\mathbb{R}^{n+2}$  tel que sa  $i^{\text{ème}}$  composante,  $t_i$  représente la date de début de l'activité  $i$ . La date de début de projet est  $t_0 = 0$ . La durée totale d'un ordonnancement est égal à  $t_{n+1}$  la date de début de l'activité de fin de projet.

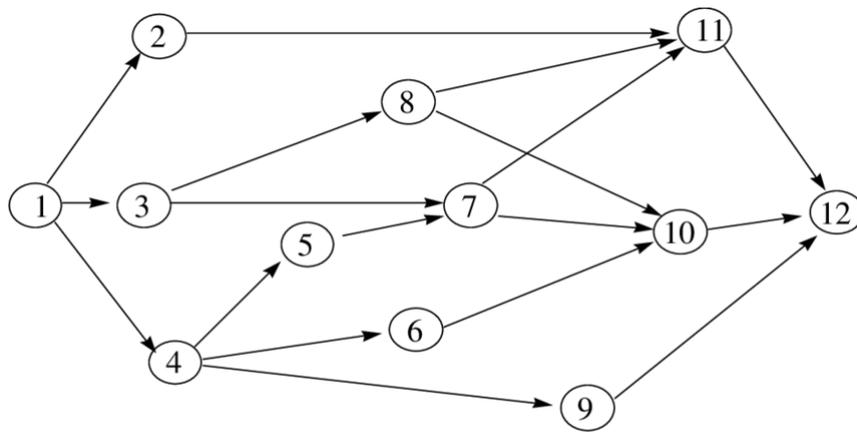


FIGURE II.4 – Un réseau d'un problème de RCPSP.

### II.3.5 Problème de minimisation des coût du projet (RACP)

Le RACP (Resource availability cost problem) peut être considéré comme un cas particulier des problèmes compromis cout-temps discrets, Ces derniers sont des problèmes dans lesquels il est possible d'introduire une fonction cout-temps discrète qui traduit plus exactement la durée de chaque activité plutôt qu'une simple approximation linéaire. La littérature sur les méthodes de solution des problèmes où les relations cout-temps sont définies par des valeurs discrètes entiers est beaucoup plus rare et éparse. Il a été démontré par De et al. (1992) que ces problèmes sont NP-difficiles [19].

C'est le problème discret qui a d'abord motivé le développement du cadre d'analyse des réseaux de projet. Crowston et Thomson (1967) sont les premiers à élaborer le modèle discret, que l'on désigne par modèle « Decision-CPM », en utilisant la programmation linéaire en nombres entiers mixte. Ce type de modèle ne peut cependant s'appliquer qu'à des problèmes de taille limitée en raison du temps de calcul exigé pour résoudre les problèmes rencontrés dans la pratique.

### II.3.6 Notion de complexité des problèmes

La théorie de la complexité a pour but d'apporter des informations sur la difficulté théorique d'un problème à résoudre. Elle permet de classer "du point de vue mathématique" les problèmes selon leur difficulté, et analyse le temps nécessaire pour obtenir une solution.

A première vue, comment définir un algorithme efficace ? Pour un problème donné,

chercher un algorithme efficace, veut dire trouver un algorithme où le temps nécessaire à son exécution ne soit pas trop important. Un problème est dit facile si on peut le résoudre facilement, c'est-à-dire s'il ne fait pas trop de temps pour arriver à la solution. Donc, s'il existe un algorithme efficace pour un problème donné, alors ce dernier est dit facile. Un problème pour lequel on ne connaît pas d'algorithme efficace, alors ce dernier est dit difficile.

Pour résoudre un problème d'ordonnancement, il ne suffit pas de prouver l'existence d'une solution, il faut également la construire, il est clair que construire la solution est plus difficile que de prouver son existence ce qui nous conduit donc à classer les problèmes comme étant difficiles ou faciles.

### **La classe NP**

La classe NP (Non déterministe Polynomial) est celle des problèmes d'existence dont une proposition de solution est Oui et qui est vérifiable polynomialement. Parmi les problèmes décidables, les plus simples à résoudre sont regroupés dans la classe NP.

#### **II.3.6.1 La classe P**

Un problème est dit polynomial s'il existe un algorithme de complexité polynomiale permettant de répondre à la question posée dans ce problème, quelle que soit la donnée de celui-ci.

La classe P est l'ensemble de tous les problèmes polynomiaux. Les problèmes dans P sont considérés comme « faisables », faciles à résoudre, dans le sens où on peut le faire relativement rapidement. La classe P est incluse dans la classe NP.

### **La classe NP-Complet**

La classe NP-Complet regroupe les problèmes les plus difficiles de la classe NP. dans le sens où, si elle était un algorithme capable de résoudre « plus vite » tout problème NP-complet, alors vous pouvez l'utiliser pour résoudre rapidement chaque problème dans NP.

Un problème est NP-complet s'il est à la fois dans NP et NP-difficile.

### La classe NP-Difficile

La classe NP-Difficile regroupe des problèmes NP-difficiles qui ne sont pas forcément dans la classe NP.

Un problème est dit NP-difficile si un algorithme pour le résoudre peut être traduit en un algorithme pour résoudre tout autre problème NP. Il est beaucoup plus facile de montrer qu'un problème est NP que de montrer que c'est NP-difficile.

la plupart des problèmes d'ordonnancement sont des problèmes de classe NP-difficiles. Le RCPSP est l'un des problèmes les plus difficiles à résoudre. La démonstration de sa NP-difficulté au sens fort est donnée par Blazewicz et al. [13].

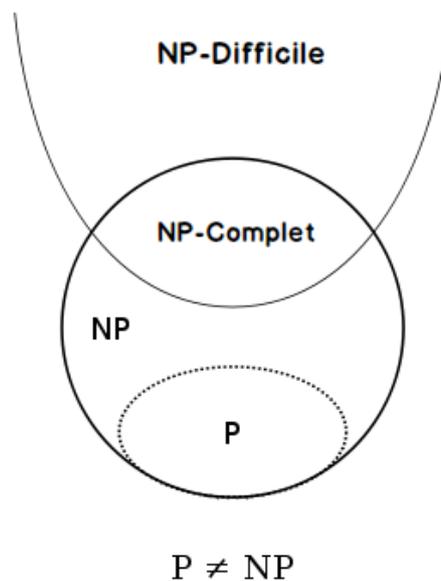


FIGURE II.5 – Le diagramme de Venn pour les classes de complexité.

### II.3.7 Notations de la théorie des graphes

Dans cette section nous présentons quelques éléments de la théorie des graphes qui nous seront nécessaires dans la suite de ce mémoire.

#### Un graphe

Un graphe orienté  $G$  est constitué de deux ensembles :

1. Un ensemble  $X$  d'éléments appelé sommets matérialisés par des points.

$$X = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$$

2. Un ensemble  $U$  de lignes (arcs) reliant chacune, deux sommets.

$$U = \{ u_1, u_2, \dots, u_n \}$$

Un graphe est noté donc par :  $G = (X, U)$ . Si les lignes  $U$  sont orientées, on les appelle des arcs et  $G$  prend le nom de " graphe orienté". Par contre, si elles ne sont pas orientées, on obtient des arêtes et  $G$  devient " un graphe non orienté ".

- Un **graphe** est dit **simple** s'il ne comporte pas de boucle, et s'il ne comporte jamais plus d'une arête (arcs) entre deux sommets.
- Un **graphe pondéré** (ou valué)  $G = (X, U, P)$  est un graphe  $(X, U)$  muni d'une application  $P : U \rightarrow \mathbb{N}$ . L'application  $P$  est appelée valuation du graphe.

L'arc  $u_i = (x_i, x_j)$  est dit sortant en  $x_i$  et incident en  $x_j$ , et  $x_j$  est un successeur de  $x_i$ , tandis que  $x_i$  est un prédécesseur de  $x_j$ .

- L'ensemble des **successeurs** d'un sommet  $x_i \in X$  est :  $\gamma^+(i) = \{\text{successeurs}(i)\}$ .
- L'ensemble des **prédécesseurs** d'un sommet  $x_i \in X$  est :  $\gamma^-(i) = \{\text{prédécesseurs}(i)\}$ .

### Un chemin

Dans un graphe, on appelle chemin une suite d'arcs dont l'extrémité terminale de chacun est l'extrémité initiale de l'arc suivant, sauf pour le dernier.

- Un chemin qui se renferme sur lui-même est dit circuit.
- Un chemin est simple s'il ne passe qu'une seule fois par chacun de ses arcs.
- Un chemin est dit élémentaire s'il ne passe pas plus d'une fois par chacun de ses sommets.
- La longueur d'un chemin est le nombre totale des arcs le composent.

### Un Réseau

Un réseau  $R = (X, U, c)$  est défini par : un graphe orienté fortement connexe  $G = (X, U)$ . avec deux sommets disjoints  $s$  (sommet entrées) et  $p$  (sommet sortie).

- Un réseau est un graphe simple sans circuit.
- dans les problèmes d'ordonnancement on travail avec des graphes simple sans circuit.

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes généralités sur la gestion de projets et les problèmes d'ordonnancement, la complexité algorithmique des différentes classes de problèmes d'optimisation et des notions de base de la théorie des graphes. Pour résoudre ce genre de problèmes de nombreuses méthodes ont été développées, ces dernières seront présentées brièvement dans le prochain chapitre.

## CHAPITRE III

# MÉTHODES DE RÉOLUTION DES PROBLÈMES

## D'ORDONNANCEMENT

### III.1 Introduction

La résolution d'un problème d'ordonnancement consiste à donner l'ordre dans lequel devront être exécutées les différentes tâches de manière à optimiser une certaine fonction objectif, par exemple, rendre la durée d'exécution totale d'un projet aussi petite que possible. Il existe beaucoup de méthodes permettant de résoudre ce problème, nous nous limiterons dans le cadre de ce travail à présenter quelques unes d'entre elles, après avoir donné les outils de modélisation des différentes tâches d'un projet.

### III.2 Outils de planification des tâches d'un Projet

Parmi les principaux outils de planification de tâches d'un projet on peut citer celles qui seront définies dans les sous sections suivantes.

#### III.2.1 La méthode MPM

La Méthode des Potentiels et antécédents Métra (MPM) est une technique d'ordonnancement basée sur la théorie des graphes, visant à optimiser la planification des tâches d'un projet. Elle aurait été mise au point en France en 1958 par Bernard Roy, au sein de la société de conseil Métra, dans le cadre du projet de construction du paquebot "France".

Dans la méthode des potentiels-métra, le problème est représenté sous forme d'un

graphe tel que les tâches sont représentées par des sommets et les contraintes de succession par des arcs. Chaque sommet est associé par une date de début au plus tôt et une date de début au plus tard, et chaque arc est associé avec un délai d'attente entre les tâches[3].

Cette méthode permet de déterminer la durée de réalisation d'un projet ainsi que la date de début et de fin de chaque tâche mais elle est incapable de résoudre des problèmes qui prennent en compte plus de contraintes telles que l'incertitude et les coûts d'exécution des tâches.

### a- Les éléments de base de la méthode MPM :

#### Date de début au plus tôt

On appelle date de début au plus tôt d'une tâche  $j$ , notée par  $t_j$  la date la plus hâtive à laquelle une activité peut commencer. Il s'agit de l'achèvement au plus tôt le plus tardif de toutes les activités qui la précèdent immédiatement.

$$\left\{ \begin{array}{l} t_0 = t(x_0) = 0; \text{ telque } x_0 : \text{ le sommet fictif initial;} \\ t_j = \max_i(t_i + d_{ij}) \text{ telque } i \neq j, j \in \gamma^+(i); \\ d_{ij} \text{ la durée de l'activité } (i,j) \end{array} \right.$$

Les dates au plus tôt des différentes tâches s'obtiennent comme suit :

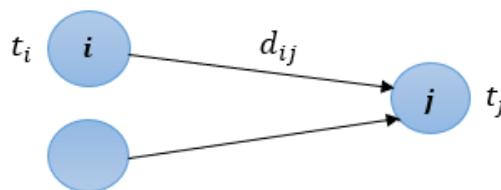


FIGURE III.1 – Date de début au plus tôt.

#### Date de début au plus tard

On appelle date de début au plus tard d'une tâche  $i$ , notée  $T_i$  par l'ultime date à laquelle toutes les activités antérieures à  $i$  doivent être réalisées de manière à ne pas retarder le projet.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{n+1} = t(x_{n+1}); \text{ telque } x_{n+1} : \text{ le sommet fictif terminal;} \\ T_i = \min_j (T_j - d_{ij}) \text{ telque } i \neq j, j \in \gamma^+(i); \\ d_{ij} \text{ la durée de l'activité } (i,j) \end{array} \right.$$

Les dates au plus tard des différentes tâches s'obtiennent comme suit :

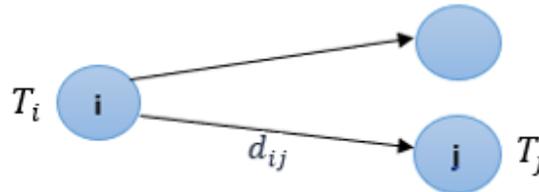


FIGURE III.2 – Date de début au plus tard.

**Date de fin au plus tôt**

le calcul de la date de fin au plus tôt d'une tâche  $i$ , notée  $f_i$ , elle s'obtient clairement en ajoutant la durée d'exécution de la tâche  $i$  à sa date de début au plus tôt :

$$f_i = t_i + d_{ij};$$

**Date de fin au plus tard**

La date de fin au plus tard de la tâche  $i$  notée  $F_i$ , s'obtient en ajoutant sa durée d'exécution à sa date de début au plus tard :

$$F_i = T_i + d_{ij};$$

**Marge totale**

La marge totale d'une tâche est égale à la différence entre la date de début au plus tard et la date de début au plus tôt d'une même tâche.

Elle indique le retard maximum que pourrait prendre la tâche sans retarder la fin de projet.

$$MT(i) = T_i - t_i$$

$t_i$  : la date de début au plus tôt de la tâche  $i$ .

$T_i$  : la date de début au plus tard de la tâche  $i$ .

### Marge libre

La marge libre est égale à la différence entre la plus petite des dates de début au plus tôt des tâches immédiatement suivantes et la date de fin au plus tôt de la tâche considérée.

$$ML(i) = \min_{j \in \gamma^+(i)} (t_j) - t_i - d_{ij}$$

$t_i$  : la date de début au plus tôt de la tâche  $i$ .

$t_j$  : la date de début au plus tôt de la tâche  $j$ .

$d_{ij}$  : la durée d'exécution de la tâche  $i$ .

La marge libre correspond au retard que peut prendre la tâche sans affecter la date de début au plus tôt de l'une quelconque de ses tâches immédiatement suivantes. La marge libre ne peut être qu'inférieure ou égale à la marge totale.

### Une tâche critique

une tâche est dite critique si la date au plus tôt et la date au plus tard de cette tâche sont égaux, (la marge totale d'une tâche critique est nulle).  
tout retard dans l'exécution d'une tâche critique se répercute automatiquement dans la durée de réalisation du projet.

### Un chemin critique

Un chemin critique est le chemin qui relie les tâches dont les dates au plus tôt sont égales aux dates au plus tard. Il est défini comme l'ensemble des tâches dont la marge totale et la marge libre sont nulles.

### b- la construction du graphe MPM

La méthode MPM suit une démarche logique qui impose de satisfaire les étapes suivantes :

1. Etablir une liste des tâches à réaliser et déterminer la durée de chaque tâche.
2. Pour chacune des tâches, déterminer les tâches précédentes.
3. Elaboration du calendrier des tâches immédiatement suivantes.
4. Elaboration du réseau MPM associé.

5. Calculer les dates de début au plus tôt et les dates début au plus tard de chaque tâche, ainsi que les marges.
6. Déterminer le chemin critique et la durée minimale du projet.

Voici un exemple de tableau d'ordonnancement et le réseau MPM correspondant[8] :

N°	Tâche	Durée	Prédécesseurs
A	Achat et installation d'un logiciel de création de pages HTML	2j	-
B	Formation d'un employé d'ÉCOLO'TRI à un logiciel de création de pages HTML	4j	A
C	Construction de la maquette du site	6j	B
D	Création des pages HTML du site	5j	C
E	Étude et mise à jour de la structure de la base de données d'ÉCOLO'TRI	4j	-
F	Développement de fonctionnalités nouvelles dans le SGBD d'ÉCOLO'TRI	15j	E
G	Implantation du site sur le serveur de la mairie	3j	D et F

TABLE III.1 – Tableau d'ordonnancement du réseau MPM.

Le graphe MPM associé au tableau ci-dessus :

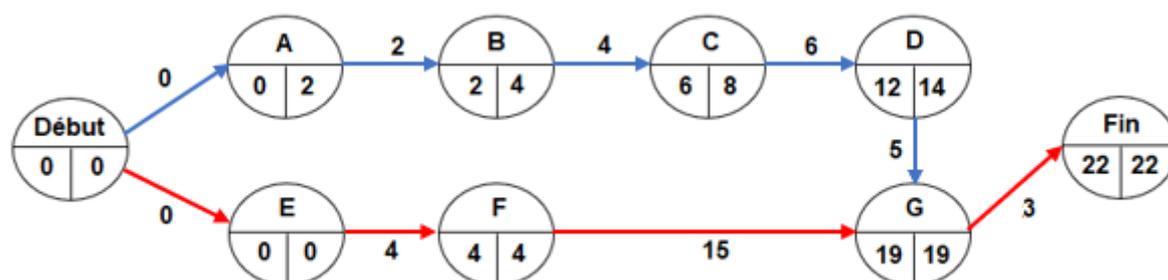


FIGURE III.3 – Réseau de la méthode MPM.

### III.2.2 La méthode PERT

La méthode PERT « Program Evaluation and Review Technique » est une technique permettant de gérer l'ordonnancement dans un projet. Elle consiste à représenter sous forme de graphe, un réseau de tâches dont l'enchaînement permet de visualiser les dépendances entre les tâches et de déterminer la durée minimale du projet.

Cette méthode a été mise en œuvre aux Etats-Unis en 1958 pour la planification de la construction des sous-marins Polaris. Elle se distingue de la méthode MPM par le fait que les tâches ne sont plus associées aux sommets mais aux arcs du réseau.

La méthode PERT utilise trois concepts de base :

**La tâche (activité) :** figurée par un arc, On associe à l'arc de la tâche sa durée.

Exemple : une tâche A de durée de 45 jours.

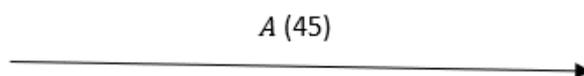


FIGURE III.4 – Une tâche de réseau PERT.

**Les étapes :** elles marquent le début et la fin d'une tâche. L'étape de fin est en même temps l'étape de début des tâches suivantes. L'étape n'a pas de durée. Selon les conventions adoptées, elle peut être représentée par un carré, un rectangle ou plus couramment un cercle ou un ovale.

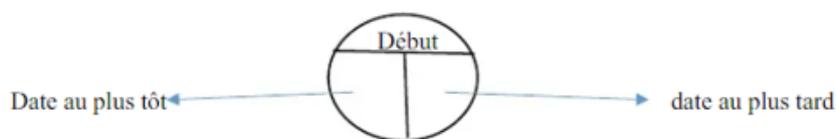


FIGURE III.5 – Une étape de réseau PERT.

**Les tâches fictives :** représentées par une flèche en pointillés, elles servent à matérialiser des contraintes d'enchaînement.



FIGURE III.6 – Une tâche fictive de réseau PERT.

### Construction du graphe PERT

La méthode commence par la construction d'un graphe, appelé graphe PERT, à partir de l'échéancier. Ce graphe sera un graphe (pondéré) valué dont les arcs seront les tâches, les valeurs des arcs étant leur durée et les sommets représenteront des étapes d'avancement du projet, numérotés de 1 à n.

Le diagramme de PERT se construit en 6 étapes distinctes :

1. Lister les tâches, estimer leurs durées et leurs antécédents,

2. Tracer le réseau à l'aide de flèches représentant les tâches et de cercles qui représentent les étapes,
3. Définir les dates de début au plus tôt,
4. Définir les dates de début au plus tard,
5. Calculer les marges des tâches,
6. Définir le chemin critique.

Voici un exemple de tableau d'ordonnancement et le réseau PERT correspondant :

N°	Tâche	Durée	Prédécesseurs
A	Déblai en terrain meuble	15j	-
B	Fraisage de la chouche de roulement existante	10j	-
C	Remblai et pose de tuf	8j	A
D	Colmatage des fissures après fraisage	4j	B
E	Couche de fondation en grave concassée 0/31,5	5j	C
F	Couche d'accrochage en emulsion cationique	5j	D et E
G	Fourniture et mise en place BB 0/14 EP : 16cm	7j	F
H	Peinture de signalisation	3j	G

TABLE III.2 – Tableau d'ordonnancement du réseau PERT.

Le réseau PERT associé au tableau ci-dessus :

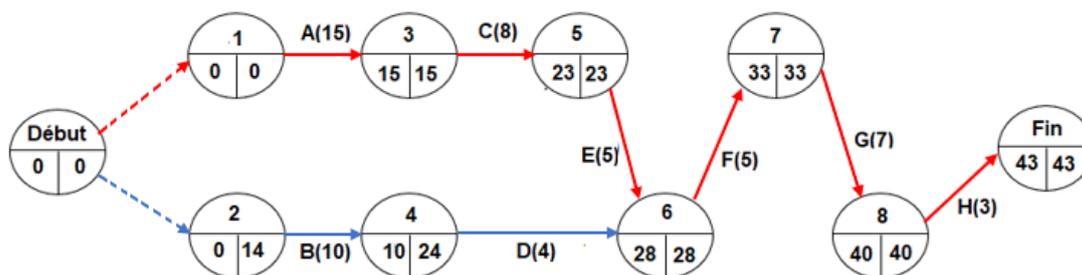


FIGURE III.7 – Réseau de la méthode PERT.

### III.2.3 Le diagramme de GANTT

Parmi les méthodes de planification, le diagramme de GANTT est un outil inventé en 1917 par Henry Laurence Gantt alors qu'il travaillait au Frankford Arsenal, une usine américaine de fabrication de munitions pour les forces armées américaines. Le diagramme de GANTT permet de modéliser la planification des tâches d'un projet.

Le diagramme de Gantt est probablement la forme de représentation graphique qui vient la plus naturellement à l'esprit. La plupart des plannings muraux utilisés pour le contrôle de production, la gestion d'équipements ou l'affectation de personnel représente ainsi sous forme de barres la répartition temporelle de l'activité[9].

Dans un diagramme de GANTT les tâches sont représentées par des lignes étalées sur l'axe horizontal alors que les colonnes ou l'axe vertical représente soit les jours, soit les semaines ou soit les mois du calendrier. Le temps estimé pour une tâche se modélise par une barre horizontale dont l'extrémité gauche est positionnée sur la date prévue de démarrage et l'extrémité droite sur la date prévue de fin de réalisation. Il existe quatre types de liens entre les tâches :

- **Le lien Fin-Début** : la tâche (B) commence après la fin de la tâche (A), la tâche (B) est successeur de la tâche (A).

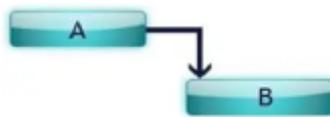


FIGURE III.8 – La représentation de lien fin-début.

- **Le lien Fin-Fin** : les tâches (A) et (B) doivent se terminer en même temps, mais la fin de la tâche (A) commande la fin de la tâche (B).



FIGURE III.9 – La représentation de lien fin-fin.

- **Le lien Début-Début** : signifie que la tâche (B) est dépendante de la tâche (A), ne peut pas commencer la tâche (B) tant que la tâche (A) n'ait commencée.



FIGURE III.10 – La représentation de lien début-début.

- **Le lien Début-Fin** : signifie que la fin de la tâche (B) est liée au début de la tâche (A), c'est-à-dire la tâche dépendante (B) ne peut pas se terminer tant que la tâche (A) n'a pas commencée.



FIGURE III.11 – La représentation de lien début-fin.

Le principal avantage du GANTT est d'offrir une vision directe de la durée et des dates réelles de réalisation des tâches. Il est ainsi possible du premier coup d'œil d'estimer la répartition de la charge, et par conséquent, de chercher à réduire les délais en optimisant l'utilisation des ressources. Le diagramme de GANTT présentait l'inconvénient majeur de ne pas matérialiser les contraintes d'antériorité. Il était de ce fait difficile d'évaluer l'incidence de la variation de durée d'une activité sur l'ensemble du projet. De plus, toute mise à jour des délais entraîne une modification du diagramme et la méthode s'avère de ce fait difficile à mettre en œuvre manuellement. Pour ces raisons, elle était peu utilisée en phase de préparation et on la réservait au suivi d'activité. L'évolution rapide des micro-ordinateurs et surtout l'extension de leurs capacités de représentation graphique a favorisé le développement de logiciels de gestion de projet. Ceux-ci supportent la méthode et enrichissent le diagramme d'une symbologie multiple qui étend ses possibilités. L'utilisation de couleurs améliore la lisibilité. La facilité de mise à jour offerte par l'informatique permet d'utiliser le GANTT dans toutes les phases du projet, en faisant ainsi une méthode à part entière qui tend à supplanter les réseaux.

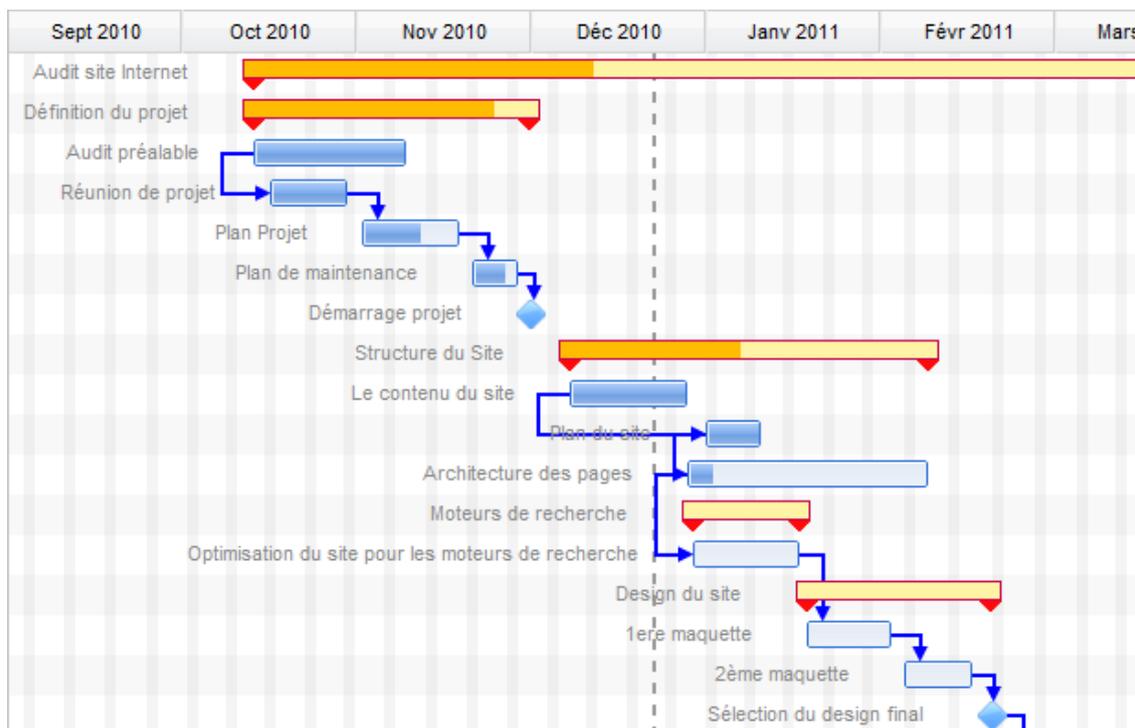


FIGURE III.12 – une représentation de diagramme de gantt.

### III.2.4 Les logiciels

Il existe une multitude de logiciels de gestion de projets. de nombreux logiciels gratuits sont téléchargeables sur les sites de téléchargement.

Il n'est pas possible d'en faire une liste exhaustive. Nous avons décidé d'en décrire deux parmi les plus connus à partir du site Internet [www.gestiondeprojet.com](http://www.gestiondeprojet.com). Ce site dédié à la gestion de projet possède une liste non-exhaustive d'une quinzaine de logiciels de gestion de projets qui sont payants et dédiés aux professionnels.

#### III.2.4.1 Microsoft Project

Microsoft Project (MS Project) est un logiciel créé en 1984 pour planifier les projets internes de Microsoft, Aujourd'hui, MS Project est le premier outil de planification des projets, utilisé par les chefs de projet dans le monde.

Il permet aux planificateurs et aux chefs de projets d'organiser et de piloter des projets, de gérer les ressources, le budget, les délais. etc Il est possible à tout moment créer des tâches, définir les liens entre chaque tâche, MS Project est également capable d'estimer la durée et la charge de travail nécessaire pour accomplir une tâche définie. Microsoft Project permet aussi la création de modèles permettant aux utilisateurs de suivre n'importe quelle méthode ou processus.

Les projets peuvent être représentés graphiquement de différentes manières : diagrammes de Gantt, réseaux de tâches, chronologie, graphe de ressources...

La gestion de projet peut se faire de plusieurs manières, comme la définition d'un plan initial, la saisie de l'avancement des tâches ou la replanification.

Il est possible de mettre à jour l'avancement du projet de différentes façons :

- avec la saisie d'un pourcentage d'avancement,
- avec la mise à jour de la durée réelle et de la durée restante,
- avec la mise à jour de la quantité de travail effective (qui a été réalisée) et restante.

### Fonctionnalités principales de MS Project :

- élaboration de diagramme de Pert,
- élaboration de diagramme de Gantt,
- affectation des équipes,
- gestion des pics de charge,
- gestion des jours fériés,
- génération automatique de documentation au format word, pdf et HTML,
- élaboration des rapports instantanés de la situation du projet.

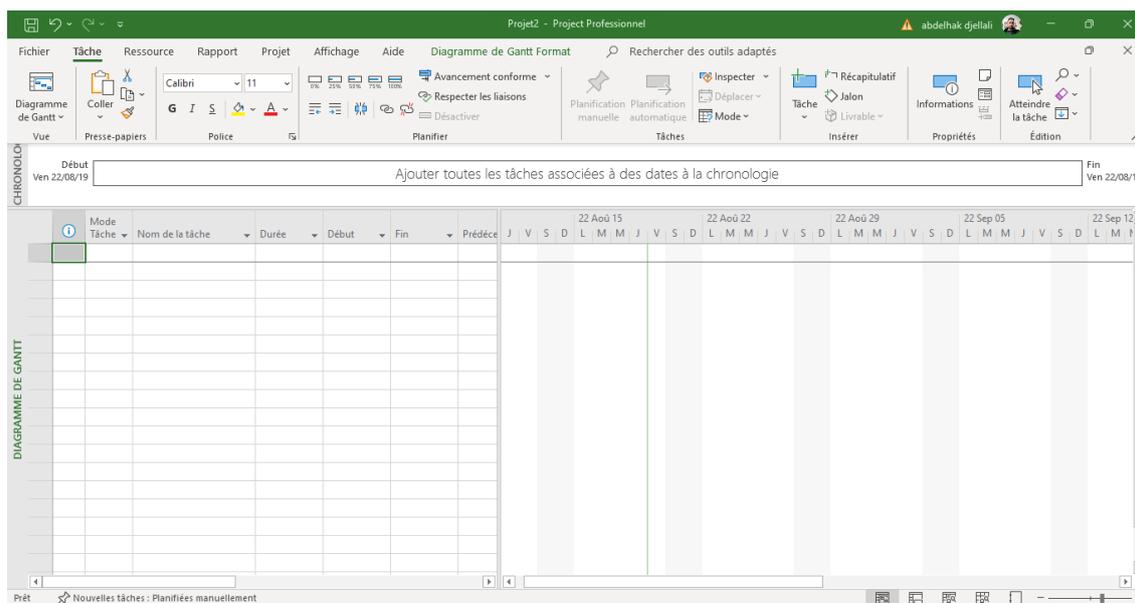


FIGURE III.13 – Interface de logiciel Microsoft Project 2019.

### III.2.4.2 Primavera Project Management

Primavera Project Management est un logiciel de planification et de contrôle multi-projets utilisant les bases de données relationnelles Oracle et Microsoft SQL Server, il permet de gérer les projets et les ressources et adapté à la modularité de la gestion de projets à l'échelle d'une entreprise [7].

Les premières versions du logiciel datent des années 1980 et furent éditées par la société Primavera Inc. D'abord un outil de planification et de Gestion de Projet, avec Primavera P3 (ou Primavera Project Planner), cette solution a connu successivement plusieurs versions : P5, puis P6.

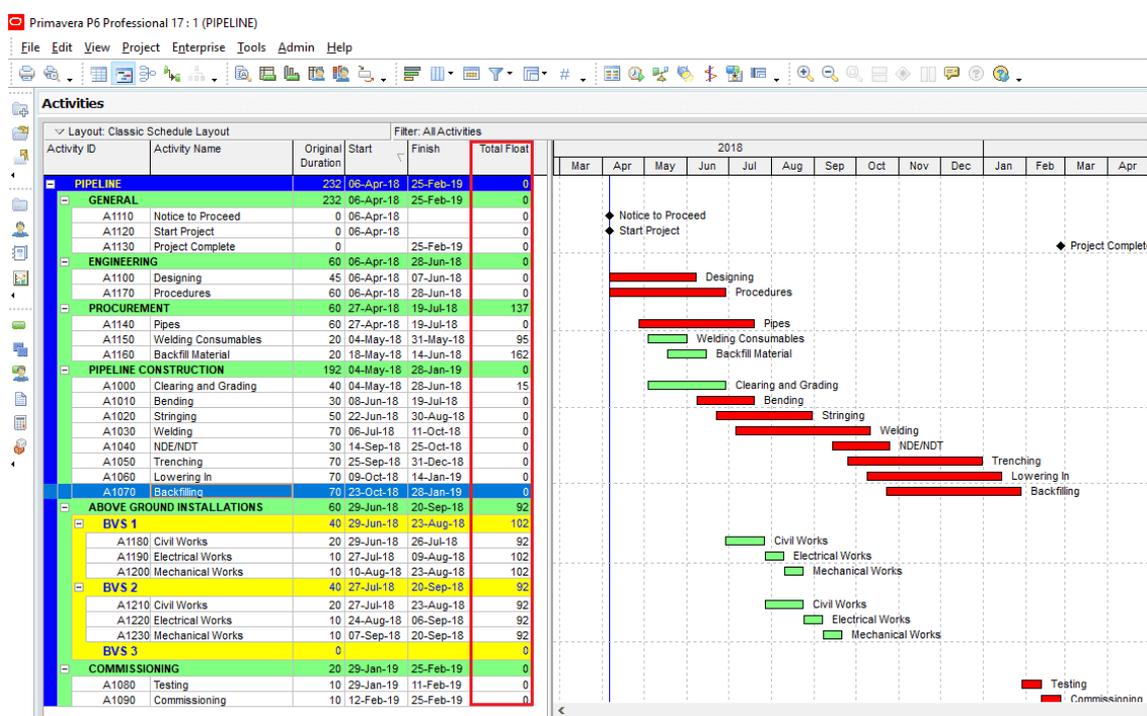


FIGURE III.14 – Interface de logiciel Primavera Project Management P6.

## III.3 Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation

Etant donné un ensemble de tâches et un ensemble de ressources, il est nécessaire de planifier les tâches et d'affecter les ressources de manière à optimiser un ou plusieurs objectifs en respectant un ensemble de contraintes.

En présence d'un problème d'optimisation, la principale difficulté rencontrée par les décideurs est de choisir une méthode efficace capable de produire une solution optimale en un temps de calcul raisonnable.

On distingue deux types de méthodes pour la résolution des problèmes : les méthodes exactes et les méthodes approchées.

### III.3.1 Les méthodes exactes

On peut définir une méthode exacte comme étant une méthode qui fournit une solution optimale pour un problème d'optimisation et garantissent la complétude de la résolution.

Les méthodes exactes examinent d'une manière implicite la totalité de l'espace de recherche pour produire la solution optimale. On peut cependant chercher des solutions de bonne qualité, sans garantie d'optimalité, au profit d'un temps de calcul plus réduit.

L'utilisation de ce type de méthodes s'avère particulièrement intéressante dans les cas des problèmes de petites tailles.

Parmi les méthodes exactes on trouve :

#### III.3.1.1 La méthode de séparation et évaluation

La méthode par séparation et évaluation, également appelé branch and bound, est une méthode générique de résolution de problèmes d'optimisation, et plus particulièrement d'optimisation combinatoire ou discrète.

L'algorithme Branch and Bound consiste à placer progressivement les tâches sur les ressources en explorant un arbre de recherche décrivant toutes les combinaisons possibles. Il s'agit de trouver la meilleure configuration donnée de manière à couper les branches de l'arbre qui conduisent à de mauvaises solutions.

Cette méthode effectue une recherche complète de l'espace des solutions d'un problème donné, pour trouver la meilleure solution possible.

La démarche de l'algorithme Branch and Bound consiste à [29] :

- Diviser l'espace de recherche en sous espaces,
- Trouver une borne minimale en terme de fonction objectif associée à chaque sous espace de recherche,
- Éliminer les mauvais sous-espaces,
- Répéter les étapes précédentes jusqu'à l'obtention de l'optimum globale.

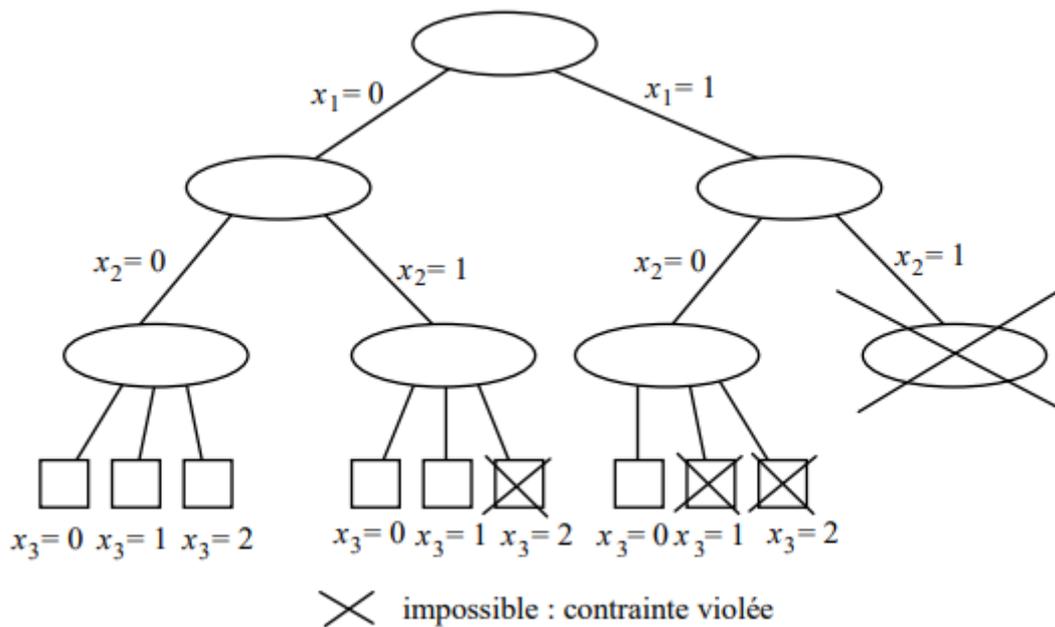


FIGURE III.15 – L'arbre de recherche de la méthode Branch and Bound.

### III.3.1.2 La programmation dynamique

Cette méthode se base sur le principe de Bellman [26] : « Si C est un point qui appartient au chemin optimal entre A et B, alors la portion de ce même chemin allant de A à C est le chemin optimal entre A et C ». C'est une méthode qui consiste à résoudre un problème en le décomposant en sous-problèmes, puis à résoudre les sous-problèmes, des plus petits aux plus grands en stockant les résultats intermédiaires.

Elle est destinée à résoudre des problèmes d'optimisation plus généraux que la méthode de séparation et d'évaluation sans permettre la résolution des problèmes de tailles importantes.

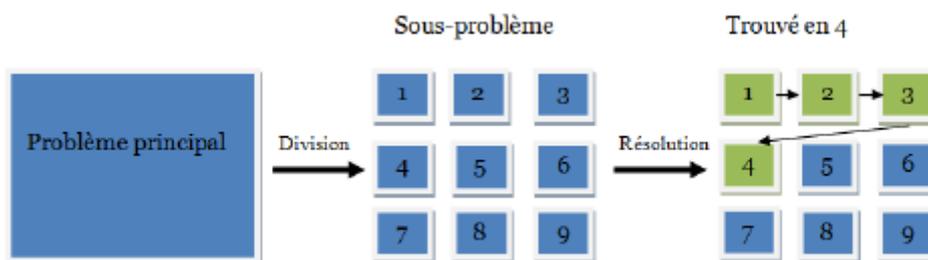


FIGURE III.16 – Division en sous-problèmes.

### III.3.1.3 La programmation linéaire

Cette méthode est de méthode d'optimisation permet de modéliser des problèmes dont la fonction objectif et les contraintes sont toutes linéaires.

C'est l'une des techniques classiques de recherche opérationnelle. Elle repose sur la méthode du simplexe et les algorithmes de points intérieurs.

### III.3.2 Les méthodes approchées

Ces méthodes sacrifient le caractère optimal de la solution pour obtenir, en un temps de calcul raisonnable, des solutions sous-optimales de bonne qualité. Ces méthodes reposent généralement sur un mécanisme de déplacement (aléatoire ou non) dans l'espace des solutions. Elles ne sont pas exactes, mais permettent en général d'obtenir des solutions proches de l'optimum.

L'avantage principal de ces méthodes est qu'elles peuvent s'appliquer à n'importe quelle classe de problèmes, faciles ou très difficiles. En effet, les algorithmes d'optimisation tels que les algorithmes de recuit simulé, les algorithmes tabous et les algorithmes génétiques ont démontré leur robustesse et efficacités face à plusieurs problèmes d'optimisation combinatoires [6].

#### III.3.2.1 Les heuristiques

Le mot heuristique est dérivé de la langue grec qui signifie le verbe trouver. Une heuristique est une méthode qui permet de trouver et d'obtenir efficacement des bonnes solutions approchées dans l'espace de solutions, pour un problème donné mais sans garantir l'optimalité [23].

Le principe général de cette catégorie de méthodes est d'intégrer des stratégies de décision pour se déplacer intelligemment dans l'espace des solutions, afin d'obtenir une solution approchée, la meilleure possible, dans un délai de temps raisonnable[10].

Parmi ces stratégies, nous distinguons :

- FIFO (First In First Out) où la première tâche arrivée est la première à être ordonnancée,
- SPT (Shortest Processing Time) où la tâche ayant le temps opératoire le plus court est traitée en premier,
- LPT (Longest Processing Time) où la tâche ayant le temps opératoire le plus

important est traitée en premier,

- EDD (Earliest Due Date) où la tâche ayant la date due la plus petite est la plus prioritaire, ...

### III.3.2.2 Les métaheuristiques

Le mot méta-heuristique est composé de deux mots grec méta et heuristique. Méta est un suffixe signifiant au delà c'est à dire plus haut niveau [23].

Face aux difficultés rencontrées par les heuristiques pour avoir une solution réalisable de bonne qualité pour des problèmes d'optimisation difficiles, les métaheuristiques ont fait leur apparition. Ces algorithmes sont plus complets et complexes qu'une simple heuristique, et permettent généralement d'obtenir une solution de très bonne qualité pour des problèmes difficiles, Elles ne sont pas exactes mais permettent en général d'obtenir des solutions proches de l'optimum [1].

La plupart des spécialistes de l'optimisation combinatoire ont orienté leurs recherches vers le développement des métaheuristiques. C'est une nouvelle génération de méthodes approchées puissantes.

Les principales métaheuristiques sont celles basées sur la recherche locale, telles que le recuit simulé et la recherche Tabou, et celles basées sur les algorithmes évolutionnistes telles que les algorithmes génétiques ainsi que les algorithmes basés sur la recherche globale tels que les algorithmes de colonies de fourmis.

#### III.3.2.2.1 La recherche Locale

La recherche locale est un processus de recherche itératif qui commence par une solution réalisable initiale et l'améliore progressivement en appliquant une série de mouvements locaux, comme montré dans la figure III.17. Il faut pour cela introduire une structure de voisinage qui consiste à spécifier un voisinage pour chaque solution. Ainsi, à chaque itération, la recherche s'oriente vers une nouvelle solution réalisable légèrement différente de la solution courante, en remplaçant celle-ci par une meilleure solution située dans son voisinage. La recherche se termine si un optimum local est trouvé.

L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'à moins d'être extrêmement chanceux, cet optimum local est généralement une solution assez médiocre. Dans la recherche locale, la qualité des solutions obtenues dépend fortement de la richesse de

l'ensemble des transformations (mouvements) considérées à chaque itération. Pour faire face à cette limitation, des méthodes de recherche locale plus sophistiquées ont été développées au cours de ces vingt dernières années. Ces méthodes acceptent des solutions voisines moins bonnes que la solution courante afin d'échapper aux minima locaux. En règle générale, seule une portion du voisinage courant est explorée à chaque étape [22]. Les méthodes les plus connues sont le recuit simulé et la recherche tabou.

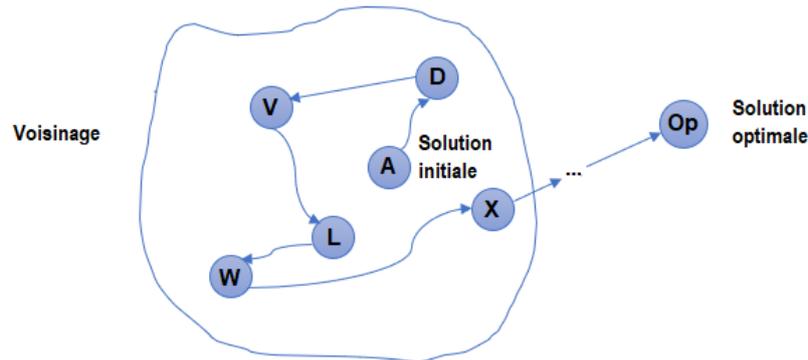


FIGURE III.17 – Exploration de l'espace de recherche dans la recherche locale.

---

#### Algorithm 1 Recherche locale

---

**Data :**  $s$

**Result :**  $s$

**while** la condition d'arrêt n'est pas vérifiée **do**

$V(s) \leftarrow$  Générer des solutions voisins de  $s$ ;

$s_1 \leftarrow$  Stratégie Choisie ( $f, V(s)$ );

**if**  $f(s_1) \leq f(s)$  **then**

$s \leftarrow s_1$ ;

**else**

        Terminer

**end**

**end**

---

#### III.3.2.2 La recherche Tabou

La recherche tabou est une méthode basée sur la recherche locale développée par Fred Glover en 1977 [27], pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoires, la plupart NP-difficiles, elle tente d'améliorer l'inconvénient majeur d'une méthode de descente de resté bloqué dans un optimum locale par l'utilisation d'une mémoire.

**Principe de la méthode :**

La méthode tabou est une procédure itérative qui, partant d'une solution initiale, tente de converger vers la solution optimale en exécutant, à chaque pas, un mouvement dans l'espace de recherche. Chaque pas consiste d'abord à engendrer un ensemble de solutions voisines de la solution courante pour ensuite en choisir la meilleure, même si ce choix entraîne une augmentation de la fonction objective à minimiser. En acceptant de détériorer la valeur de la solution courante, le minimum local peut être évité mais, en contrepartie, des parcours répétitifs sont déplorés. Aussi, pour palier à l'inconvénient majeur des méthodes de recherche locale, la recherche tabou a pour but d'améliorer à chaque étape, la valeur de la fonction objectif, en utilisant une mémoire afin de conserver les informations sur les solutions déjà visitées. Cette mémoire constitue la liste Tabou qui va servir à interdire l'accès aux dernières solutions visitées. Lorsqu'un optimum local est atteint, il y a interdiction de revenir sur le même chemin. Un critère d'aspiration, est également utilisé pour lever l'interdiction d'utilisation d'un mouvement si ce dernier conduit à une meilleure solution. Plusieurs stratégies ont été proposées récemment afin d'améliorer l'efficacité de la méthode tabou. L'intensification et la diversification de la recherche constituent deux d'entre elles.

- L'intensification : consiste à explorer en détails une région de l'espace de recherche jugée prometteuse. Sa mise en œuvre consiste, le plus souvent, en un élargissement temporaire du voisinage de la solution courante dans le but de visiter un ensemble de solutions partageant certaines propriétés.
- La diversification : a pour objectif de diriger la procédure de recherche vers des régions inexplorées de l'espace de recherche. La stratégie de diversification la plus simple consiste à redémarrer périodiquement le processus de recherche à partir d'une solution, générée aléatoirement ou choisie judicieusement, dans une région non encore visitée de l'ensemble des solutions admissibles.

Les domaines d'application de la recherche tabou sont vastes et variés, ils passent de l'ordonnancement à la robotique, au problème du voyageur de commerce, à l'électronique ... En tenant compte des notations suivantes, les étapes d'évolution de l'algorithme sont présentées dans la figure III.18.

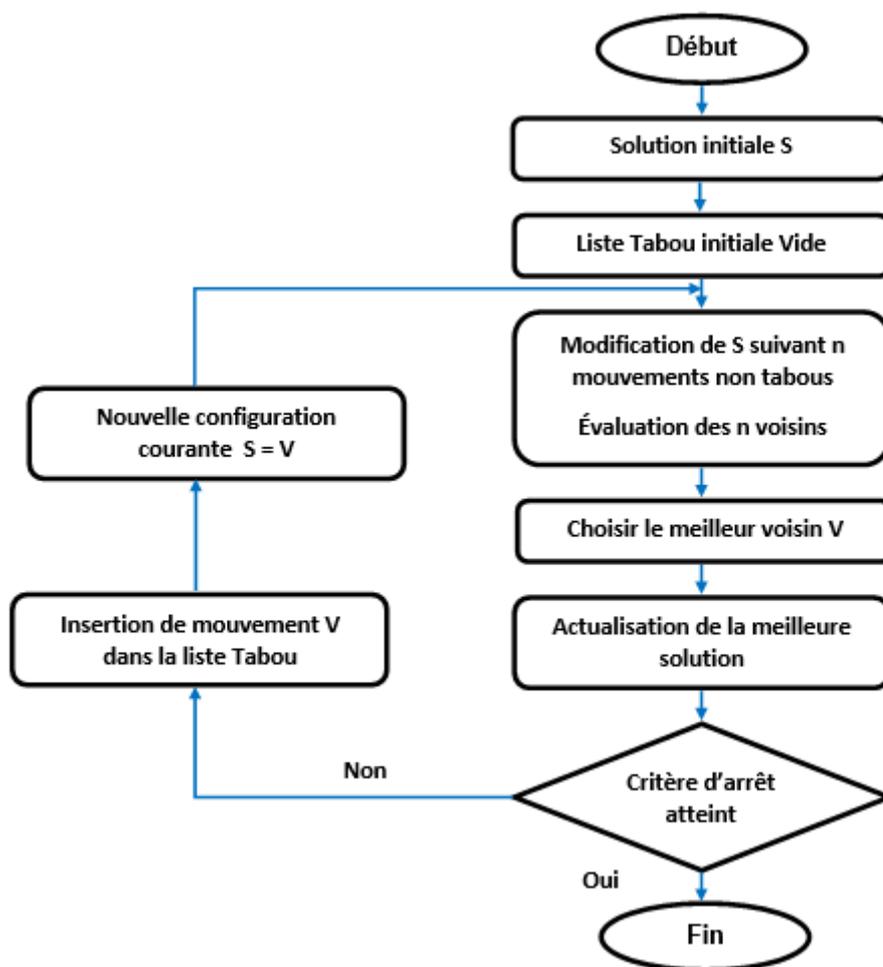


FIGURE III.18 – L'organigramme de la méthode de recherche Tabou.

Voici l'algorithme de recherche tabou :

---

**Algorithm 2** Recherche Tabou
 

---

**Data :**  $s, T$

/\*  $s$  : solution initiale \*/

/\*  $T$  : liste Tabou \*/

**Result :**  $s^*$

$s^* \leftarrow s$ ;

**while** la condition d'arrêt n'est pas vérifiée **do**

$V(s) \leftarrow$  Générer des solutions voisins de  $s$ ;

$s' \leftarrow$  StratégieChoisie ( $f, V(s), T$ );

**if**  $f(s') \leq f(s^*)$  **then**

$s^* \leftarrow s'$ ;

**end**

$s \leftarrow s'$ ;

    Mise à jour de la liste Tabou  $T$ ;

**end**

---

### III.3.2.2.3 Le recuit simulé

Le recuit simulé a été introduit par Kirkpatrick en 1982 [16], et Gerny en 1985 [4].

L'algorithme recuit simulé (RS) est une méthode de recherche locale inspirée de thermodynamique, les origines de cette méthode remontent aux expériences de Metropolis en 1953. Leurs travaux consistaient à étudier la stabilité thermique d'un système physique.

Le recuit consiste à faire refroidir un métal le plus lentement possible pour qu'il obtienne une structure moléculaire optimale.

Cette méthode de recherche utilise une analogie avec le processus de recuit d'un matériau : par refroidissement lent après une élévation de température, on peut obtenir à la fin du processus un état d'énergie minimal.

**Principe de la méthode :** L'idée principale est d'accepter des déplacements dans le voisinage d'une solution en dépit du fait qu'ils dégradent le coût de la solution et cela suivant une probabilité calculée à partir d'une température  $T$  du système à moment donné.

Le recuit simulé démarre par une solution initiale admissible  $s$  et continue l'exploration de l'espace d'état en effectuant des modifications à la solution courante [29]. Si la solution voisine  $s'$  obtenue améliore le critère cherché alors elle est retenue. Cette nouvelle solution  $s'$  est acceptée comme solution courante si son coût est inférieur à celui de la solution courante  $f(s') < f(s)$  dans le cas d'un problème de minimisation. Sinon, l'acceptation de la solution dépend d'une probabilité calculée à partir de la température  $T$  et de la différence de coût  $f(s') - f(s)$ . La température est un paramètre fixé au début de l'algorithme et diminue graduellement tout au long de l'exécution de l'algorithme. Plus la valeur  $T$  est élevée, la solution considérée a de la chance d'être acceptée. Plus  $T$  s'approche de 0, moins une solution de mauvaise qualité a de chance d'être acceptée. À chaque degré de température, un nombre prédéfini de solutions voisines est visité. Une fois cette quantité atteinte, la température est diminuée.

Un algorithme d'optimisation par recuit simulé se décompose selon es étapes suivantes [5] :

- choix d'une fonction à optimiser,
- adoption d'un schéma de recuit dans lequel sont précisés la température initiale, le nombre de configurations générées à chaque température et le schéma de décroissance du critère,
- génération de configurations voisines, correspondant aux transitions,
- choix d'un critère d'acceptation.

---

**Algorithm 3** Recuit Simulé
 

---

**Data :**  $s, T, L$ ;

**Result :**  $s^*, F^*$ ;

$s^* \leftarrow s$ ;

$F^* \leftarrow F(s)$ ;

**while** la condition d'arrêt n'est pas vérifiée **do**

$i \leftarrow 1$ ;

**while**  $i \leq L$  **do**

$V(s) \leftarrow$  Générer des solutions voisins de  $s$ ;

$s' \leftarrow$  StratégieChoisie ( $f, V(s)$ );

$DF \leftarrow f(s') - f(s)$ ;

**if**  $DF \leq 0$  **then**

$s \leftarrow s'$ ;

**if**  $F(s') \leq F^*$  **then**

$s^* \leftarrow s'$

$F^* \leftarrow F(s')$

**end**

**else**

      Générer  $u \sim U(0,1)$  ;

**if**  $u \leq \exp(-DF/T)$  **then**

$s \leftarrow s'$ ;

**end**

**end**

$i \leftarrow i + 1$ ;

**end**

$T \leftarrow a \times T$ ;

**end**

---

### III.3.2.2.4 Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques font partie des algorithmes évolutionnistes qui doivent leur nom à l'analogie avec les mécanismes d'évolution des espèces vivantes. Un algorithme évolutionniste typique est composé de trois éléments essentiels : une population constituée de plusieurs individus représentant des solutions potentielles

(configurations) du problème donné, un mécanisme d'évaluation de l'adaptation de chaque individu de la population à l'égard de son environnement extérieur et un mécanisme d'évolution composé d'opérateurs permettant d'éliminer certains individus et de produire de nouveaux individus à partir des individus sélectionnés.

Les Algorithmes Génétiques (A.G.) sont des algorithmes itératifs dont le but est d'optimiser une fonction prédéfinie, appelée fitness.

Pour réaliser cet objectif, l'algorithme travaille sur un ensemble de points, appelés population d'individus. Chaque individu ou chromosome (chaîne binaire de longueur finie dans les premières définitions) représente une solution possible du problème donné. Il est constitué d'éléments, appelés gènes, dont les valeurs sont appelées allèles.

L'utilisation d'un algorithme génétique nécessite la définition, au préalable, d'un espace de recherche dont les éléments de base sont les chromosomes et d'une fonction définie sur cet espace (fonction fitness) dont la valeur optimale est évaluée en rapport avec les opérateurs de croisement et de mutation choisis [28].

## III.4 Conclusion

Après la présentation des problèmes d'ordonnancement et de leurs principales caractérisations, différentes méthodes, exactes et approchées, pouvant être utilisées pour la résolution de ces problèmes sont introduites dans ce chapitre.

Parmi les méthodes exactes, nous avons distingué la programmation linéaire, la programmation dynamique et la méthode branch and bound. Parmi les méthodes approchées ou métaheuristiques, nous avons présenté les méthodes de recherche locale telles que le recuit simulé et la méthode de recherche tabou, et les algorithmes génétiques.

## CHAPITRE IV

# PROBLÉMATIQUE, MODÉLISATION ET RÉOLUTION DU PROBLÈME

### IV.1 Introduction

La conception et la gestion de projets complexes composés de plusieurs activités élémentaires posent des problèmes délicats tels que la planification (prévision du déroulement des tâches, établissement d'un calendrier).

La but de planification est d'élaborer un calendrier des travaux. Nous fixons des dates de début et de fin de chaque tâche et nous veillons sur le fait que le matériel nécessaire pour l'exécution soit disponible au temps demandé.

Les techniques d'ordonnancement ont pour objet d'aider à la résolution de ce type de problèmes en établissant un ordre d'exécution des tâches du projet.

### IV.2 Problématique

La société nationale génie civil et bâtiment (GCB) en tant qu'une entité économique doit être en permanence en performance. Pour cela GCB doit assurer une bonne planification pour la réalisation de ses projets avec les contrats qui la lient aux clients en tenant en compte les contraintes de budget, de délais et des critères définies.

Pour cela, l'entreprise est tenue de mettre en œuvre tous les outils et méthodes qui permettent d'assurer la satisfaction des clients en respectant le cahier des charges, les délais, et les coûts.

La planification du projet est initialisée au début d'un projet et mise à jour pendant toute sa durée de réalisation. Un même projet peut faire l'objet de plusieurs plan-

nings, un planning global et un seul planning ou bien plusieurs plannings détaillés. L'ensemble de ces plannings permet de gérer les principales tâches du projet.

La GCB s'engage à réaliser pour le compte du Maître de l'Ouvrage (SONATRACH, ENC), les travaux de canalisation et raccordement de Quatorze (14) Puits à Ohanet (Tinrherh Lot 4), d'une longueur totale de 67km.

La réalisation de ce projet a coûté à l'entreprise de GCB un budget d'environ 4,6 milliards dinars sur une période de 20 mois, Pour faire une étude comparative des résultats obtenus, l'entreprise nous a suggéré de recommencer à planifier le projet avec le même budget initial (avec les mêmes ressources), puis si nous obtenons les mêmes résultats précédents, elle nous fournit un budget supplémentaire estimé à 50 millions de dinars au maximum pour accélérer le projet d'une manière intelligente avec le moindre coût possible, en injectant des ressources matérielles et humaines aux tâches critiques qui affectent la durée totale du projet.

Donc notre travail est divisé en deux partie :

**La première partie :** consiste à retrouver la durée minimum du projet (calculé par l'entreprise) quand le premier budget est alloué (travail demandé par la GCB).

**La deuxième partie :** est consacrée à l'optimisation du budget supplémentaire afin de minimiser la temps trouvé dans le première partie.

Pour réaliser ce projet dans un délai meilleur que le précédent réalisé par l'entreprise, nous allons appliquer le chevauchement et l'accélération de certaines activités importantes, cette technique permet d'accélérer la mise en œuvre du projet, mais elle comprend une augmentation du budget total du projet. Alors, comment atteindre une durée minimale du projet avec le budget le plus bas possible ?

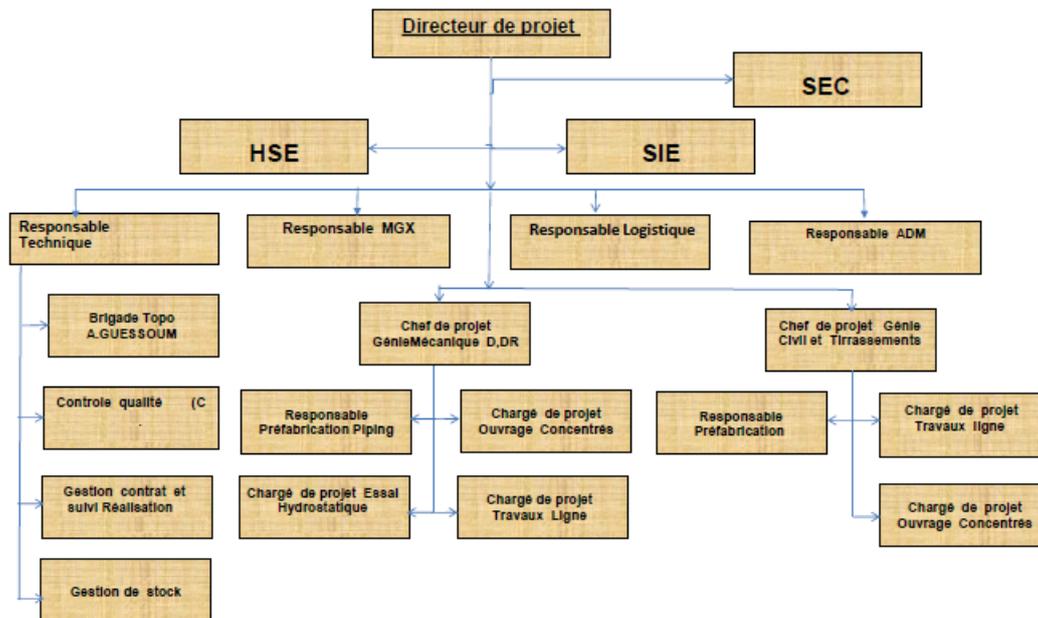


FIGURE IV.1 – Organigramme des responsables de projet.



FIGURE IV.2 – La zone de projet.

### IV.3 Modélisation de la première partie

Étant donné que le projet traite 49 tâches, l'obtention d'une solution initiale est important, de sorte que la solution devrait être mise en œuvre par une méthode exacte (la méthode MPM) et vérifier par logiciel Ms Project adapté à cette exigence.

### IV.3.1 Description des travaux

Les opérations s’effectuant dans le cadre du développement des champs gaziers de Tinnerhurt ” travaux de connexion pour quatorze puits de gaz ” sont principalement les suivantes :

- (14) Préparation et construction de puits de gaz, l’installation d’équipements d’extraction et les panneaux solaires.
- (03) Construction de manifolds avec fosse de brulage pour assurer la protection et le bon contrôle des puits.
- (14) Ouverture de tranchée et l’installation des tuyaux de 6 pouces, qui transportent le gaz de puits aux manifolds.
- (02) Ouverture de tranchée et l’installation des tuyaux de 12 pouces, qui transportent le gaz entre les manifolds.
- Ouverture de tranchée et l’installation des tuyaux de 20 pouces, de manifold MIKNO2 au point de raccordement TMO1.

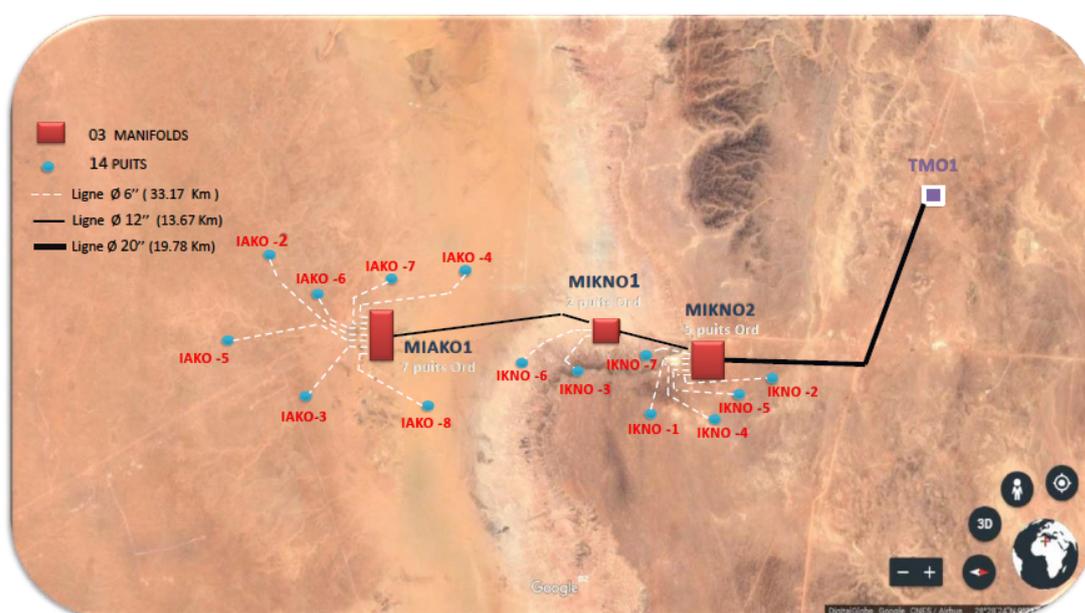


FIGURE IV.3 – Plan du projet.

### IV.3.2 Ressources mises en oeuvre

Pour l’exécution des activités du projet, la GCB a déployé des ressources humains et matériels importants qui devraient être disponibles en quantité. Leurs quantités sont mentionnées dans les tableaux suivants :

## IV.3.2.1 Les ressources matérielles

N°	Ressource	Quantité
R1	Grue mobile	02
R2	Station topographique	02
R3	Trancheuse	02
R4	Side-bom	09
R5	Pelle mécanique	10
R6	Pelle Brise roche	05
R7	Bulldozer	04
R8	Niveleuse	03
R9	Chargeur	03
R10	Camion citerne	03
R11	Camion à bene	08
R12	Camion plateau	03
R13	Semi remorque	05
R14	Retro chargeur	02
R15	Compacteur GM	03
R16	Compacteur SP 24	03
R17	Tracteur agricole	21
R18	remorque agricole	21
R19	Cintreuse 6-20	02
R20	Auto bétonnière	03
R21	Groupe de soudure autonome	28
R22	Bac de remplissage	01
R23	Sableuse	03
R24	Balai électrique	04
R25	Compresseur 7 bar	05
R26	Compresseur 20 bar	03
R27	Clamps 6", 12", 20"	14
R28	Diabolot 6",12",20"	08
R29	Citerne 24 m3 (Eau industrielle)	05

TABLE IV.1 – Tableau des ressources matérielles du projet.

## IV.3.2.2 Les ressources personnelles

N°	Ressource	Quantité
R30	Ingénieur suivi réalisation-chargé de projet	02
R31	Ingénieur soudage	03
R32	Ingénieur piping	04
R33	Ingénieur mécanique	02
R34	Ingénieur génie civil	02
R35	Ingénieur instrumentation	03
R36	Topographe	04
R37	Conducteur d'engin	40
R38	Conducteur sidboom	08
R39	Mainoeuvre	58
R40	Cintreur	04
R41	Chef d'équipe bardage	04
R42	Chef d'équipe bardage	04
R43	Soudeur pipe	50
R44	Soudeur TIG	04
R45	Contrôleur de soudage (visuel)	04
R46	Clampseur	06
R47	Meuleur	25
R48	Sableur	04
R49	Chef d'équipe d'enrobage	02
R50	Enrobeur	10
R51	Opérateur essais hydrostatique	10
R52	Chef d'équipe essais hydrostatique	02
R53	Conducteur de travaux Tuyautrie	02
R54	Tuyauteur	04
R55	Maçon	08
R56	Coffreur	20
R57	Ferailleur	15
R58	Chaudronnier	02

TABLE IV.2 – Tableau des ressources personnelles du projet.

### IV.3.3 Délai de réalisation

Le planning prévisionnel de l'entreprise GCB indique que la durée de réalisation de ces travaux est fixée à vingt (20) mois.

### IV.3.4 Budget de réalisation

Pour réaliser ce projet, le bureau d'études de la société a prévu un budget initial de 4 593 443 033,00 DA (environs quatre milliards et six cent millions de dinars).

### IV.3.5 Élaboration du programme des travaux

Ce projet est composé de trois sections principales qui commencent simultanément avec le début du projet, chaque section est constitué des tâches dont les durées et les précédences sont résumés dans les tableaux suivants :

description des relations de précedence utilisés dans les tableaux :

**dd(i)+p** : signifié que la tâche courante se débute au début de la tâche ( $i$ ) +  $p$  jours, (début de tâche courante = début de tâche ( $i$ ) +  $p$  jours).

**fd(i)+p** : signifié que la tâche courante se débute à la fin de la tâche ( $i$ ) +  $p$  jours, (début de tâche courante = fin de tâche ( $i$ ) +  $p$  jours).

**ff(i)+p** : signifié que la tâche courante se termine à la fin de la tâche ( $i$ ) +  $p$  jours, (fin de tâche courante = fin de tâche ( $i$ ) +  $p$  jours).

#### Section 01 : Lignes de transport de tube Ø 6" :

La première section représente l'installation de tube de 16" (pouces), qui transportent le gaz de puits aux manifolds, d'une longueur de 36260 mètres linéaires.

N°	Tâche	Durée	Prédécesseurs	QT	U
01	Ouverture de piste de travail	60j	-	36260	ML
02	Ouverture de tranchée en terrain rocheux Ø 6"	135j	dd01+7j	36260	ML
03	Transport du pipe depuis l'aire de stockage du maitre de l'ouvrage jusqu'au site Ø 6"	50j	dd01+7j	36260	ML
04	Bardage et prealignement Ø 6"	45j	fd03-25j	36260	ML
05	Cintrage tube Ø 6"	45j	fd04-25j	36260	ML
06	Soudage ligne Ø 6" EP 12,70mm à 15,88mm	150j	fd05-15j	36260	ML
07	Radiographie Ø 6" y compris toutes sujetions	115j	ff06+5j	3296	Joints
08	Enrobage des joints pour tube Ø 6" y compris toutes sujetions	45j	ff07+10j	3296	Joints
09	Pose lit de sable pour tube Ø 6"	40j	dd02+30j	36260	ML
10	Mise en fouille pour tube Ø 6"	45j	fd08-15j dd09+20j	36260	ML
11	Pre-remblai pour tube Ø 6"	70j	dd10+10j	36260	ML
12	Raccordement de tube Ø 6" EP 12,70mm à 15,88mm	35j	fd11-30j	60	Joints
13	Pose de fibre optique y compris chambre de tirage	40j	dd12+10j	36260	ML
14	Remblai en grande masse pour tube Ø 6"	140j	fd13-20j	190	U
15	Soufflage, Raclage et Calibrage de tube Ø 6"	45j	dd13+7j	36260	ML
16	Balisage de la ligne Ø 6"	50j	fd14-25j	36260	ML
17	Essais Hydrostatique tube Ø 6"	280j	dd15+7j	36260	ML

TABLE IV.3 – Tableau des tâches d'installation de tube 6".

**Section 02 - Lignes de transport tube Ø 12" et Ø 20" :**

La deuxième section rassemble les tâches d'installation de tubes de 12 et 20 pouces reliant les manifolds entre eux, d'une longueur de 33450 mètres linéaires.

N°	Tâche	Durée	Prédécesseurs	QT	U
18	Ouverture de piste de travail	60j	-	33450	ML
19	Ouverture de tranchée en terrain rocheux Ø 12" et Ø 20"	100j	dd18+7j	33450	ML
20	Transport du pipe depuis l'aire de stockage du maître de l'ouvrage jusqu'au site Ø 12" et Ø 25"	25j	dd18+7j	33450	ML
21	Bardage et prealignement Ø 12" et Ø 20"	35j	fd20-10j	33450	ML
22	Cintrage tube Ø 12" et Ø 20"	35j	fd21-10j	33450	ML
23	Soudage ligne Ø 12" et Ø 20" EP 12,70mm à 15,88mm	140j	fd22-15j	33450	ML
24	Radiographie Ø 12" et Ø 20" y compris toutes sujétions	100j	ff23+5j	3042	Joints
25	Enrobage des joints pour tube Ø 12" et Ø 20" y compris toutes sujétions	30j	ff24+7j	3042	Joints
26	Pose lit de sable pour tube Ø 12" et Ø 20"	30j	dd19+30j	33450	ML
27	Mise en fouille pour tube Ø 12" et Ø 20"	35j	fd25-10j dd26+10j	33450	ML
28	Pre-remblai pour tube Ø 12" et Ø 20"	55j	dd27+10j	33450	ML
29	Raccordement de tube Ø 12" et Ø 20" EP 12,70mm à 15,88mm	25j	fd28-15j	50	Joints
30	Pose de fibre optique y compris chambre de tirage	30j	dd29+10j	33450	ML
31	Remblai en grande masse pour tube Ø 12" et Ø 20"	130j	fd30-20j	33450	ML
32	Soufflage, Raclage et Calibrage de tube Ø 12" et Ø 20"	35j	fd30-10j	33450	ML
33	Balisage de la ligne Ø 12" et Ø 20"	30j	fd31-20j	115	U
34	Essais Hydrostatique	170j	fd33-15j	33450	ML

TABLE IV.4 – Tableau des tâches d'installation des tubes 12" et 20".

**Section 03 - Installation de puits et manifolds :**

La troisième section est la préparation des terrain et terrassement des puits et manifolds, l'installation des équipements d'extraction de gaz et la clôture du puits

et manifolds, dont le nombre est de 17 unités.

N°	Tâche	Durée	Prédécesseurs	QT	U
35	Routes d'accès aux puits	75j	-	700	ML
36	Massifs en béton	140j	-	720	m <sup>3</sup>
37	Préparation du terrain et terrassements	40j	dd35+4j	17	Puits
38	Blocs d'ancrages	55j	fd37 dd36+10j	17	Puits
39	Fosses de brulage	50j	fd35	17	Puits
40	Structure pour plateformes d'accès, supportage...	60j	fd38	17	Puits
41	Clôture y compris porte et portail d'accès	50j	fd40	17	Puits
42	Travaux de tuyauterie	130j	dd40	17	Puits
43	Package Electricité avec panneaux solaires	90j	dd40	17	Puits
44	Panneau de contrôle tête de puits (WHCP)	50j	fd43	17	Puits
45	Remote terminal units (RTU)	40j	fd44	17	Puits
46	Ligne de torche vers fosse de brulage avec vanne de sécurité	30j	fd39 fd40	17	Puits
47	Instrumentation	45j	fd42 fd45 fd46	17	Puits
48	Package d'inhibiteur de corrosion	30j	fd47	17	Puits
49	Tests Hydrostatiques	50j	fd48	17	Puits

TABLE IV.5 – Tableau des tâches d'installation de puits et manifolds.

## IV.4 Résolution de la première partie

Notre première tâche consiste à trouver la durée de réalisation du projet et l'ordonnancement des tâches, puis comparer notre résultat avec celle de la GCB.

### IV.4.1 Application de la méthode MPM

La solution donnée par la méthode MPM schématisée comme suit :

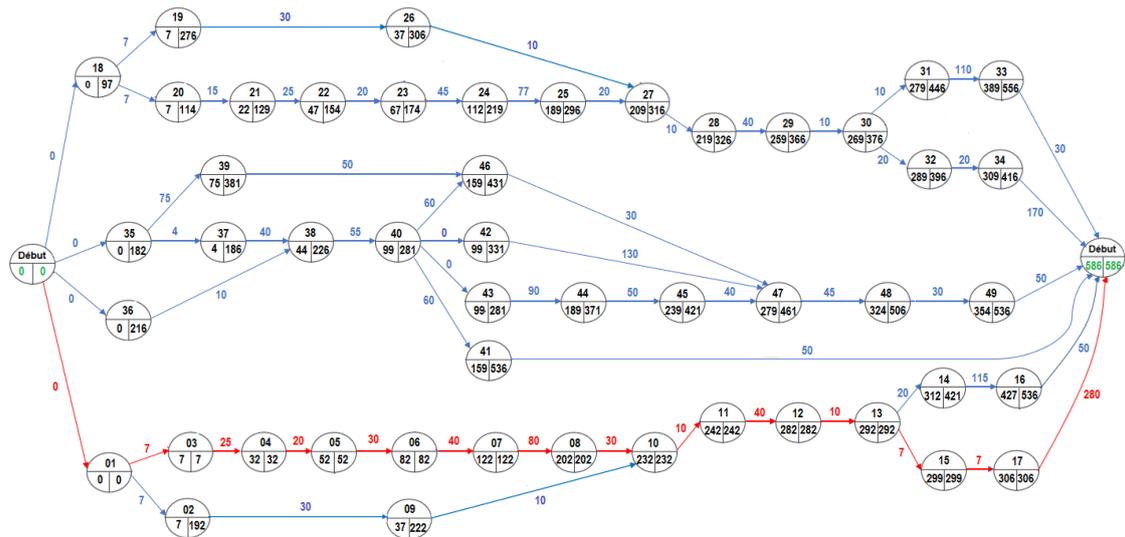


FIGURE IV.4 – Réseau du projet par la méthode MPM.

Les tâches critiques sont : 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 17. Le chemin critique est le chemin présenté en rouge sur le graphe de la (Figure IV.4).

Selon le chemin critique, on constate que la durée minimale de la réalisation du projet  $T_N$  est 586 jours (19 mois et 16 jours).

Le tableau suivant représente les dates de début et de fin du projet, ainsi que les marges totales et libres :

Tâche	D. au plus tot	D. au plus tard	F.au plus tot	F. au plus tard	Marge totale	Marge libre
Tâche 01	0	00	60	60	0	0
Tâche 02	7	192	142	327	185	0
Tâche 03	7	7	57	57	0	0
Tâche 04	32	32	77	77	0	0
Tâche 05	52	52	97	97	0	0
Tâche 06	82	82	232	232	0	0
Tâche 07	122	122	237	237	0	0
Tâche 08	202	202	247	247	0	0
Tâche 09	37	222	77	262	185	185
Tâche 10	232	232	277	277	0	0

TABLE IV.6 – Tableau associé à la méthode MPM.

Tâche	D. au plus tot	D. au plus tard	F.au plus tot	F. au plus tard	Marge totale	Marge libre
Tâche 11	242	242	312	312	0	0
Tâche 12	282	282	317	317	0	0
Tâche 13	292	292	332	332	0	0
Tâche 14	312	421	452	561	109	0
Tâche 15	299	299	344	344	0	0
Tâche 16	427	536	477	586	109	56
Tâche 17	306	306	586	586	0	0
Tâche 18	0	97	60	157	526	0
Tâche 19	7	276	107	376	269	0
Tâche 20	7	114	32	139	107	0
Tâche 21	22	129	57	164	107	0
Tâche 22	47	154	82	189	107	0
Tâche 23	67	174	207	314	107	0
Tâche 24	112	219	212	319	107	0
Tâche 25	189	296	219	326	107	0
Tâche 26	37	306	67	336	269	162
Tâche 27	209	316	244	351	107	0
Tâche 28	219	326	274	381	107	0
Tâche 29	259	366	284	391	107	0
Tâche 30	269	376	299	406	107	0
Tâche 31	279	446	409	576	167	0
Tâche 32	289	396	324	431	107	0
Tâche 33	389	556	419	586	167	167
Tâche 34	309	416	479	586	107	107
Tâche 35	0	182	75	257	182	0
Tâche 36	0	216	140	356	216	34
Tâche 37	4	186	44	226	182	0
Tâche 38	44	226	99	281	182	0
Tâche 39	75	381	125	431	306	34
Tâche 40	99	281	159	341	182	0
Tâche 41	159	536	209	586	377	377

TABLE IV.7 – Tableau associé à la méthode MPM.

Tâche	D. au plus tot	D. au plus tard	F. au plus tot	F. au plus tard	Marge totale	Marge libre
Tâche 42	99	331	229	461	232	50
Tâche 43	99	281	189	371	182	0
Tâche 44	189	371	239	421	182	0
Tâche 45	239	421	279	461	182	0
Tâche 46	159	431	189	461	272	90
Tâche 47	279	461	324	506	182	0
Tâche 48	324	506	354	536	182	0
Tâche 49	354	536	159	404	586	182

TABLE IV.8 – Tableau associé à la méthode MPM.

### IV.4.2 Diagramme de Gantt

Les images suivantes représente le diagramme de gantt de projet, donné par le logiciel MS Project, ce diagramme est très important pour les acteurs du projet :

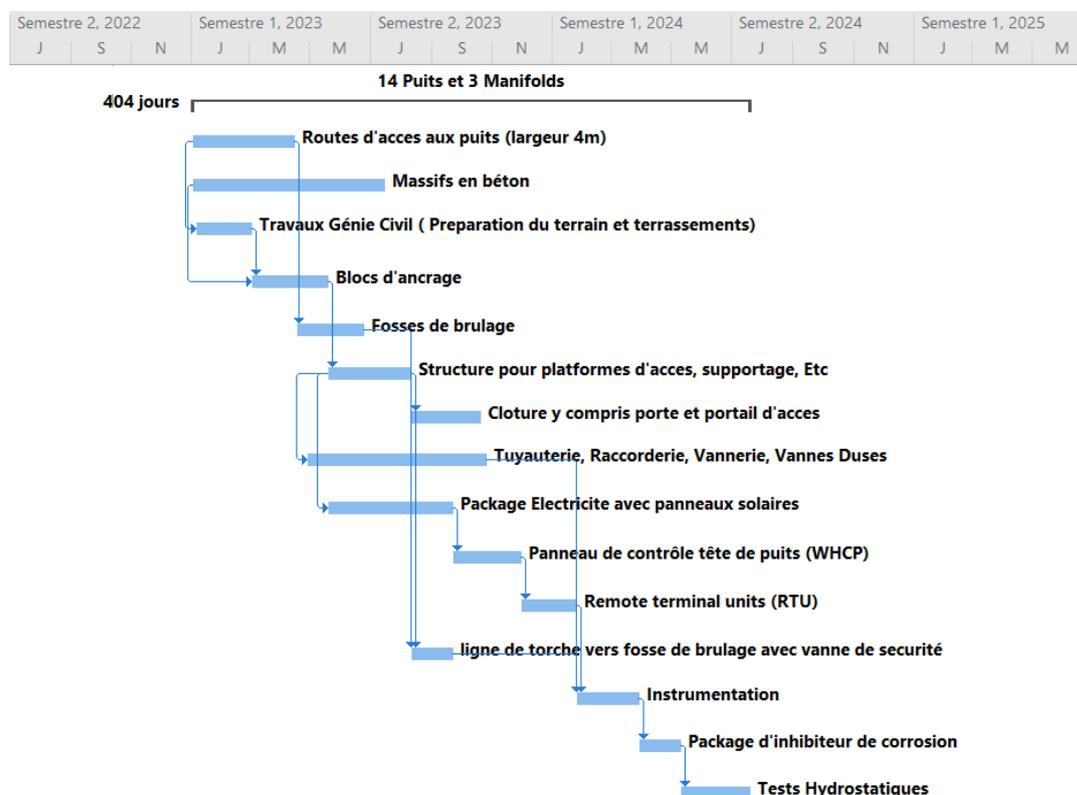


FIGURE IV.5 – Diagramme de Gantt du projet.

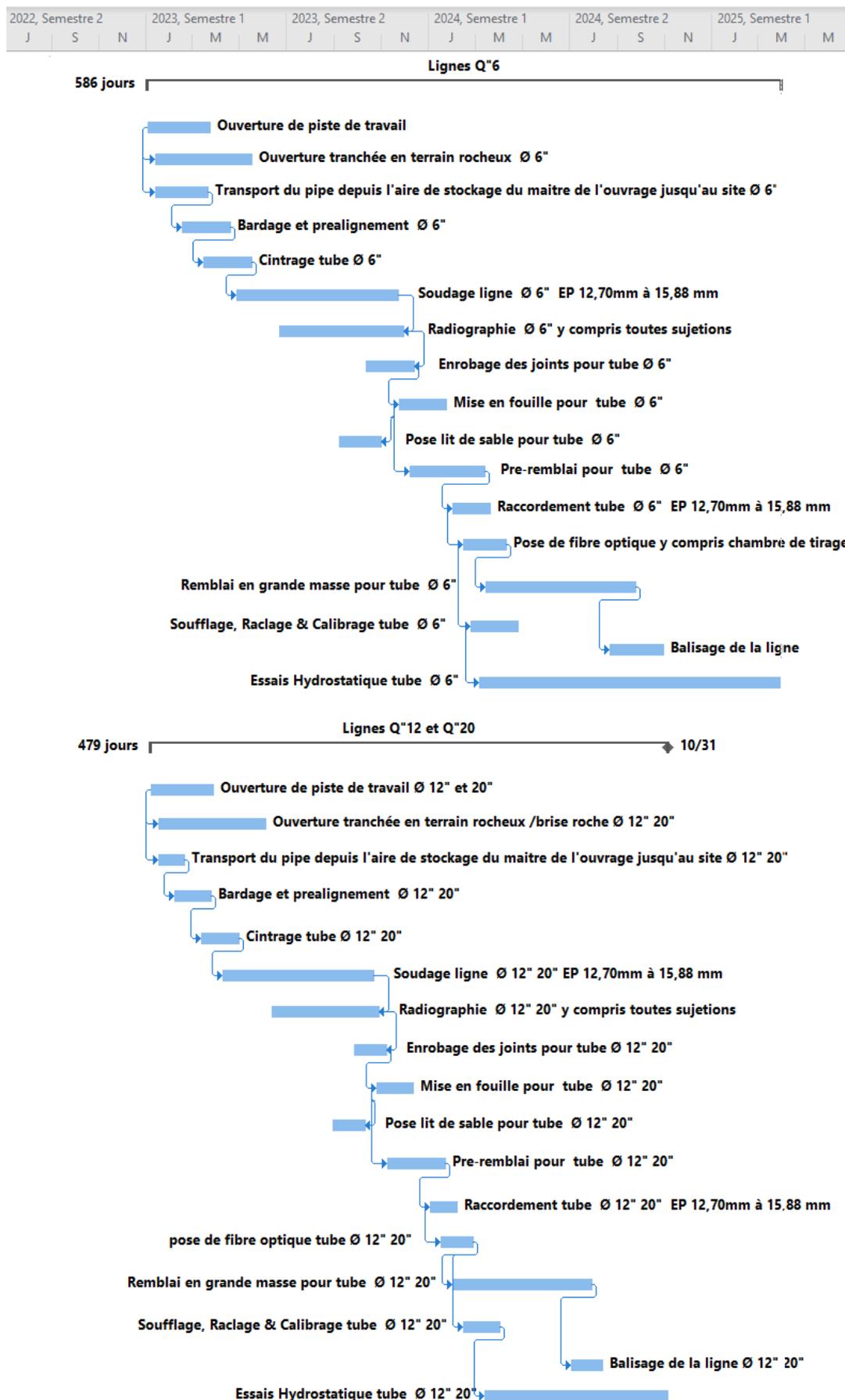


FIGURE IV.6 – Diagramme de Gantt du projet.

## IV.5 Modélisation de la deuxième partie

Maintenant, en ayant un budget supplémentaire et des ressources. La GCB nous exige de minimiser la durée du projet obtenue en première étape  $T_N$  tout en économisant le budget additionnel.

Il s'agit donc d'un problème d'ordonnancement avec contraintes de ressources dont l'objectif est de minimiser le coût et le temps de réalisation du projet. C'est un problème qui appartient à la classe RACP qui est un problème NP-difficile [19].

### Notations

$U = \{u_0, u_1, \dots, u_{n+1}\}$  : Ensemble de tâches du projet.

$u_0, u_{n+1}$  : tâches fictives.

$U' = \{u_1, \dots, u_n\}$  : tâches non fictives.

$d_i$  : durée d'exécution de la tâche  $u_i$ ,  $\forall u_i \in U$ ,  $d_i \in \mathbb{N}$  avec  $d_0 = d_{n+1} = 0$ .

$E$  : ensemble de couples des tâches liés par un relation de précédence, avec  $(u_i, u_j) \in E$  ( $u_i$  précède  $u_j$ ).

$R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$  : ensemble de  $m$  ressource renouvelables.

$A \subseteq U'$  : l'ensemble des tâches qui peuvent être accélérées c'est à dire,  $\forall u_i \in A$ ,  $u_i$  nécessite un certaine quantité de chaque ressource  $R_k$  que l'on note  $b_{ik}$ .

$B_k$  : la quantité disponible de ressource  $R_k$ ,  $k = \overline{1.m}$ .

$t_i$  : la date de début d'exécution de la tâche  $u_i$ .

$t_N$  : le temps unital d'exécution du projet obtenue dans la première étape.

$c_i^a$  : coût d'accélération de la tâche  $u_i$  par jours,  $\forall u_i \in A$ .

$t_i^m$  : le temps d'accélération maximum de le tâche  $i$  donné par l'entreprise.

### Variable de décision

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si la tâche } u_i \text{ à été accéléré.} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

### Contraintes

1. Contrainte de précédence entre les tâches  $i$  et  $j$ , indique que l'ordre d'exécution entre les tâches est toujours respecter :

$$t_j - t_i \geq d_i - t_i^a y_i, \quad \forall (i, j) \in E \quad \text{telque} \quad j \in \gamma^+(i) \quad (\text{IV.1})$$

2. Contrainte de ressource : elle assure que le nombre de ressources de type  $k$  utilisé par les tâches à l'instant  $t$  ne dépasse pas le nombre de ressource à cet instant :

$A_t$  : l'ensemble des activités non fictives en cours d'exécution à la date  $t$ .

soit :  $t \geq 0, \quad A_t = \{u_i \in A / t_i \leq t \leq t_i + d_i\}$

$$\sum_{u_i \in A_t} b_{ik} \leq B_k, \quad \forall R_k \in R, \quad \forall t \geq 0 \quad (\text{IV.2})$$

$b_{ik}$  : quantité de ressource renouvelable de type  $k$  requises lors d'exécution la tâche  $i$ .

3. Contrainte de réduction du temps : c'est la condition imposée par l'entreprise afin de réduire le temps déjà calculé  $t_N$  sous réserve de rajouter le budget supplémentaire.

$$t_{n+1} \leq t_N \quad (\text{IV.3})$$

4. Contrainte du Budget additionnel : le coût additionnel total pour accélérer le projet ne dépasse pas le budget d'accélération disponible :

$B$  : la valeur du budget additionnel donné par l'entreprise.

$$\sum_{u_i \in A} c_i^a \cdot y_i \cdot t_i^a \leq B \quad (\text{IV.4})$$

5. Contrainte d'accélération maximale : Le nombre de jours d'accélération de la tâche  $i$  doit être inférieure ou égale au nombre maximum de jours d'accélération de la tâche  $i$  :

$t_i^a$  : temps d'accélération de la tâche  $u_i$  par jours,  $\forall u_i \in A$ .

$$0 \leq t_i^a \leq t_i^m, \quad \forall u_i \in A \quad (\text{IV.5})$$

6. Contrainte de non-négativités des variables :

$$t_i \geq 0, \quad y_i \geq 0 \quad (\text{IV.6})$$

### Fonction objectif

L'objectif est de minimiser la durée de réalisation du projet tout en minimisons le Budget additionnel du projet.

Plus nous accélérions les tâches, le budget supplémentaire augmente, la durée du projet déminue. Donc nous sommes en face d'un problème bi-critère contradictoire.

$$z_1 = \min(t_{n+1}) \quad (\text{IV.7})$$

$$z_2 = \min\left(\sum_{u_i \in A} c_i^a \cdot y_i \cdot t_i^a\right) \quad (\text{IV.8})$$

### Evaluation du modèle

A cette étape de notre étude, nous avons exprimé notre problème par une formulation en un programme mathématique linéaire à variables binaires. Nous allons effectuer une brève analyse concernant la taille du modèle, en évaluant le nombre de variables et de contraintes mises en jeu.

Le but de cette évaluation est d'estimer la taille et la complexité du problème d'optimisation combinatoire en question, il suffit de décrire une expression simple pour le calcul de ces paramètres.

Rappelons :

U : ensemble des tâches,  $|U| = n + 1 = 51$  ;

R : ensemble de ressources,  $|U| = m = 58$  ;

B : ensemble de capacités de ressources,  $|U| = m = 58$  ;

#### Le nombre de variables

nombre de variable bivalent  $y_i$  :  $n$  :

#### Le nombre de contraintes

nombre de contrainte de type (1) :  $|\gamma^+|$  ;

nombre de contrainte de type (2) :  $m \times T$  ;

nombre de contrainte de type (3) : 1 ;

nombre de contrainte de type (4) :  $|A|$  ;

nombre de contrainte de type (5) :  $|A|$  ;

nombre de contrainte de type (6) :  $n + 1$  ;

Soient au total :  $2|A| + (m \times T) + n + 2 + |\gamma^+|$  contraintes de tous types confondus.

Nous remarquons que le nombre de variables et le nombre de contraintes est très grand, ce qui augmente rapidement la complexité du model. L'inconvénient de ce modèle comme tous les autres programmes linéaires à variables binaires se pose dans la résolution, lorsque le nombre de variables est des grandes instances car le problème de défini est NP-difficile. Qu'il n'existe pas actuellement un algorithme exact qui le résout en temp polynomiale. Dans le chapitre suivant nous décrirons des approches pour la résolution appropriée pour le problème posé.

## IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a réalisé la première partie du travail, nous avons planifié le projet de l'entreprise et calculé la durée totale de projet grâce à la méthode MPM (19 mois et 16 jours), ainsi que les dates de début et de fin des tâches du projet, et nous avons élaboré le diagramme de gantt du projet.

Ensuite, on a modélisé le problème d'ordonnancement de la deuxième partie.

## V.1 Introduction

Maintenant, nous allons résoudre le modèle d'optimisation bi-critère de la deuxième partie par l'algorithme de recherche tabou à l'aide de logiciel MATLAB pour optimiser la solution trouvée et répondre aux préoccupations de la GCB..

## V.2 Application de l'algorithme Tabou

Puisque les résultats obtenus sont proches des résultats de la GCB. Nous allons appliquer une métaheuristique qui est la méthode de recherche Tabou pour améliorer la première solution en accélérant certaines tâches critiques du projet.

Les tâches pouvant être accélérées (7 tâches) sont représentées dans le tableau suivant avec leurs jours d'accélération et les coûts d'accélération données par l'équipe technique de l'entreprise :

N°	Tâche	Accélération	Coût suppl
03	Transport du pipe depuis l'aire de stockage jusqu'au site Ø 6"	20 jours	140 721 000 (DA)
04	Bardage et prealignement Ø 6"	18 jours	62 718 500 (DA)
05	Cintrage tube Ø 6"	18 jours	62 300 000 (DA)
06	Soudage ligne Ø 6" EP 12,70mm	30 jours	207 080 000 (DA)
10	Mise en fouille pour tube Ø 6"	10 jours	152 805 000 (DA)
11	Pre-remblai pour tube Ø 6"	20 jours	155 644 000 (DA)
17	Essais Hydrostatique tube Ø 6"	35 jours	119 405 000 (DA)

TABLE V.1 – Tableau des tâches qui peuvent être accélérer.

Sachant qu'un problème d'optimisation multi-objectif est un problème dont la solution n'est pas unique, mais représente un ensemble de solutions appelée ensemble des solutions non dominées, nous avons, de ce fait, accordé de l'importance à la minimisation de la durée de réalisation (choix de l'entreprise) sur le coût additionnel.

Nous allons programmer un algorithme (la recherche Tabou) pour choisir les tâches que nous devons accélérer parmi les tâches précédentes, afin qu'il choisisse les tâches qui ont un temps d'accélération important (élevée) et un faible coût, c-à-dire on minimise le coût supplémentaire du projet tout en minimisons le temps d'exécution.

Pour faire cela, nous avons utilisé le logiciel MATLAB.

### **V.2.1 Présentation de logiciel MATLAB**

MATLAB est un logiciel pour le calcul scientifique développé par la société The MathWorks, orienté vers les vecteurs et les listes de données. Matlab est un langage interprété, chaque ligne d'un programme Matlab est lue, interprétée et exécutée.

MATLAB peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires.

Les utilisateurs de MATLAB sont de milieux très différents tels que l'ingénierie, les sciences, les mathématiques et l'économie, dans un contexte industriel et dans la recherche scientifique.

### **V.2.2 Exécution de l'algorithme Tabou (RT)**

Lors de lancement de notre algorithme, il demande d'introduire la liste des tâches qui peuvent être accélérées et leurs durées d'accélération et coûts d'accélération, ensuite, il demande la durée totale du projet (obtenue par la méthode MPM), le coût initial du projet, et le budget supplémentaire fourni par l'entreprise.

```
>> tabou
Entrer les taches à accélerer et leurs durées, couts :
[ 3 20 140721000;
  4 18 62718500;
  5 18 62300000;
  6 30 207080000;
 10 10 152805000;
 11 20 155644000;
 17 35 119405000;]

Entrer le la durée initiale de projet : 586
Entrer le budget initiale de projet : 4593443033
Entrer le budget supplémentaire de projet : 500000000
```

FIGURE V.1 – Insertion des données sous MATLAB.

Ensuite, l'algorithme commence le processus itératif, en évaluant toutes les solutions générés pour trouver la solution optimale.

```
itération 1 : -----
T =
   tache_3  tache_4  tache_5  tache_6  tache_10  tache_11  tache_17  Acceleration  CoutSup
   -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----
         0         0         0         0         0         0         1          35      119405000

itération 2 : -----
T =
   tache_3  tache_4  tache_5  tache_6  tache_10  tache_11  tache_17  Acceleration  CoutSup
   -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----
         0         0         0         1         0         0         1          65      326485000

itération 3 : -----
T =
   tache_3  tache_4  tache_5  tache_6  tache_10  tache_11  tache_17  Acceleration  CoutSup
   -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----
         1         0         0         1         0         0         1          85      467206000
```

FIGURE V.2 – Les 3 premiers itérations d'exécution de (RT) via MATLAB.

La solution optimale est trouvée à la vingt-quatrième itération, comme le montre la figure V.3, mais l'algorithme continue son exécution jusqu'à terminer l'évaluation de toutes les solutions possibles.

```

itération 23 : -----
T =
  tache_3  tache_4  tache_5  tache_6  tache_10  tache_11  tache_17  Acceleration  CoutSup
  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----
    0       1       1       0       0       0       1         71         244423500

itération 24 : -----
T =
  tache_3  tache_4  tache_5  tache_6  tache_10  tache_11  tache_17  Acceleration  CoutSup
  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----
    0       1       1       1       0       0       1         101         451503500

itération 25 : -----
T =
  tache_3  tache_4  tache_5  tache_6  tache_10  tache_11  tache_17  Acceleration  CoutSup
  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----
    0       0       1       1       0       0       1         83         388785000

itération 26 : -----
T =
  tache_3  tache_4  tache_5  tache_6  tache_10  tache_11  tache_17  Acceleration  CoutSup
  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----
    0       0       1       0       0       0       1         53         181705000

```

FIGURE V.3 – Solution optimale de (RT) via MATLAB.

Après l'évaluation de toutes les solutions possibles, l'algorithme arrête son exécution, et donne le résultat final.

```

itération 74 : -----
Terminer : il n'y a aucun solution réalisable.
----- Résultat -----
Les taches accélérées sont : 4 5 6 17
Le cout supplémentaire est : 451503500 DA.
Le temps d'accélération est : 3 mois et 11 jours.
Le cout totale de projet est : 5044946533 DA.
Le temps finale de projet est : 16 mois et 5 jours.

```

FIGURE V.4 – Le résultat et fin d'exécution de (RT) via MATLAB.

### V.3 Interprétation des résultats

1<sup>ère</sup> cas : résultats obtenus en première étape par la méthode MPM, on a trouvé :

Durée du projet	Budget totale
19 mois et 16 jours	4 593 443 033 (DA)

TABLE V.2 – Tableau des résultats obtenus par MPM.

2<sup>ème</sup> cas : après l'optimisation des résultats obtenus en première étape par la méthode MPM, on fait appel à l'algorithme Tabou programmé par le langage de programmation MATLAB, on obtient les solutions ci-dessous :

Durée du projet	Budget totale
16 mois et 5 jours	5 044 946 533 (DA)

TABLE V.3 – Tableau des résultats obtenus par la Recherche Tabou.

- Le réseau MPM correspondant est représenté dans l'annexe 1.
- Le diagramme de Gantt correspondant est représenté dans l'annexe 2.

Le tableau suivant donne la liste des tâches accélérers :

N°	Tâche	Accélération	Coût suppl
04	Bardage et prealignement Ø 6"	18 jours	62 718 500 (DA)
05	Cintrage tube Ø 6"	18 jours	62 300 000 (DA)
06	Soudage ligne Ø 6" EP 12,70mm	30 jours	207 080 000 (DA)
17	Essais Hydrostatique tube Ø 6"	35 jours	119 405 000 (DA)

TABLE V.4 – Tableau des tâches accélérers.

Coût additionnel =  $62718500 + 62300000 + 207080000 + 119405000 = 451503500$  (DA)

Durée minimiser =  $18 + 18 + 30 + 35 = 101$  jours

## V.4 Comparaison des résultats

Après avoir présenté les résultats obtenus, nous avons mené une étude comparative des résultats obtenus avec les prévisions de l'entreprise, comme indiqué dans le tableau suivant :

	Prévision de GCB	Notre prévision
Durée du projet	20 mois	16 mois et 5 jours ( -19.2% )
Budget totale	4 593 443 033 (DA)	5 044 946 533 (DA) ( +9.8% )

TABLE V.5 – Tableau de comparaison des résultats.

Il est clair que l'algorithme de recherche Tabou fournit un meilleur résultat que ceux obtenus par les prévisions de l'entreprise, où nous avons réussi à accélérer le projet de 3 mois et 25 jours avec un excellent coût additionnel (augmentation de 9.8% de budget initiale) par rapport au pourcentage de réduction de la durée totale du projet (19.2%).

On a minimisé le coût additionnel (451 503 500 DA) de 9.7% de budget additionnel proposé par l'entreprise (500 000 000 DA).

## V.5 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus par l'algorithme de Recherche Tabou, et à la fin on a comparé notre résultat avec celui de la GCB.

Vu que l'objectif principal fixé par la société GCB était de réaliser le projet le plus rapidement possible, alors la solution a été choisie en privilégiant la durée du projet.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le problème d'ordonnancement de projet est l'un des problèmes les plus étudiés depuis les origines de la théorie de l'ordonnancement. Malgré les nombreux progrès réalisés par la suite, ces problèmes, malgré leur simplicité apparente, posent un défi à la recherche opérationnelle actuelle.

Dans ce mémoire nous avons présenté différentes phases d'élaboration d'un projet. Nous avons étudié avec détails le problème central de l'ordonnancement sous ses différents aspects : modèles, méthodes et outils de calculs.

On a traité un problème d'ordonnancement de la société GCB, qui est le projet de travaux de canalisation « raccordement de quatorze puits de gaz, à Ohanet », dont l'objectif initial est de minimiser le temps de réalisation de projet. Par la suite, la GCB a proposé un budget additionnel et des ressources dans le but d'accélérer d'avantage le premier temps obtenu.

Pour résoudre ce problème, nous avons d'abord fait recours à la théorie des graphes, en utilisant la méthode MPM pour avoir le premier calendrier des tâches et le meilleur temps de réalisation. Nous avons également fait appel à la technique du diagramme de Gantt.

Ensuite, pour améliorer la solution trouvée, nous avons modélisé notre problème d'ordonnancement sous forme d'un programme linéaire bi-objectif que nous avons résolu avec une métaheuristique qui est la méthode de recherche tabou à l'aide du logiciel Matlab.

A la fin, nous avons comparé nos résultats et ceux prévus de la GCB. Nous avons donc pu améliorer le temps prévu de quelques jours (20 jours) dans la première étape. Une fois le budget additionnel est alloué, nous avons pu accéléré quelques tâches et obtenir -9.7% du budget additionnel, et -19.2% du durée totale du projet. Nous concluons donc que nos résultats sont nettement meilleurs que ceux de la GCB, ce qui contribue à un apport financier assez important pour l'économie nationale.

## Annexe 1

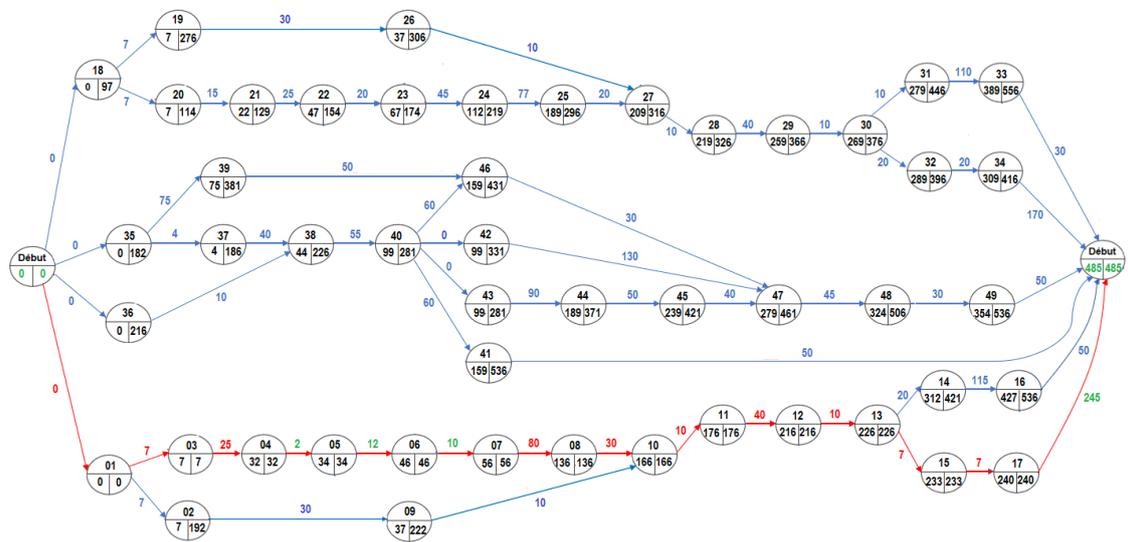


FIGURE V.5 – Réseau MPM après l'accélération du projet.

## Annexe 2

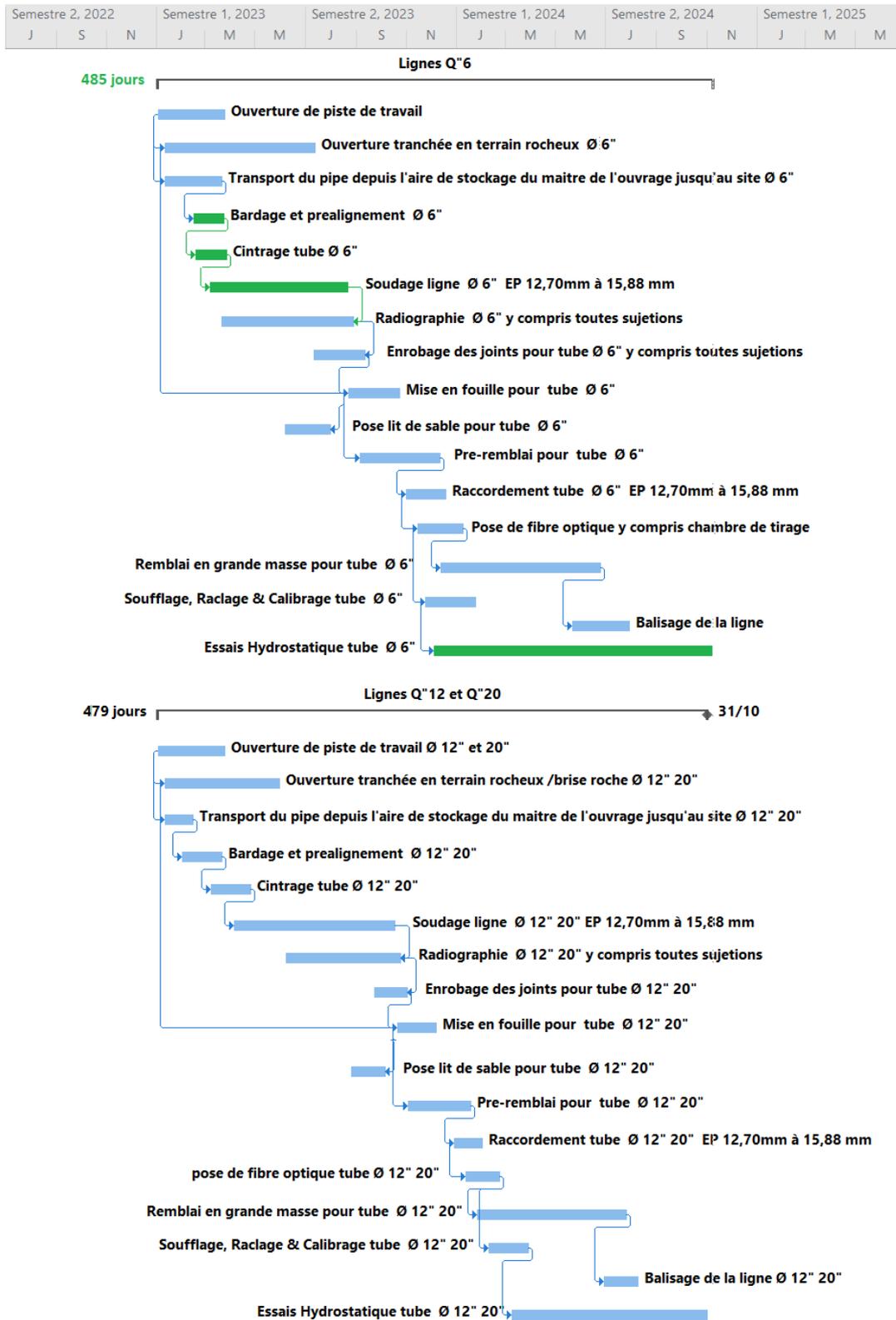


FIGURE V.6 – Diagramme de gantt du projet après l'accélération du projet.

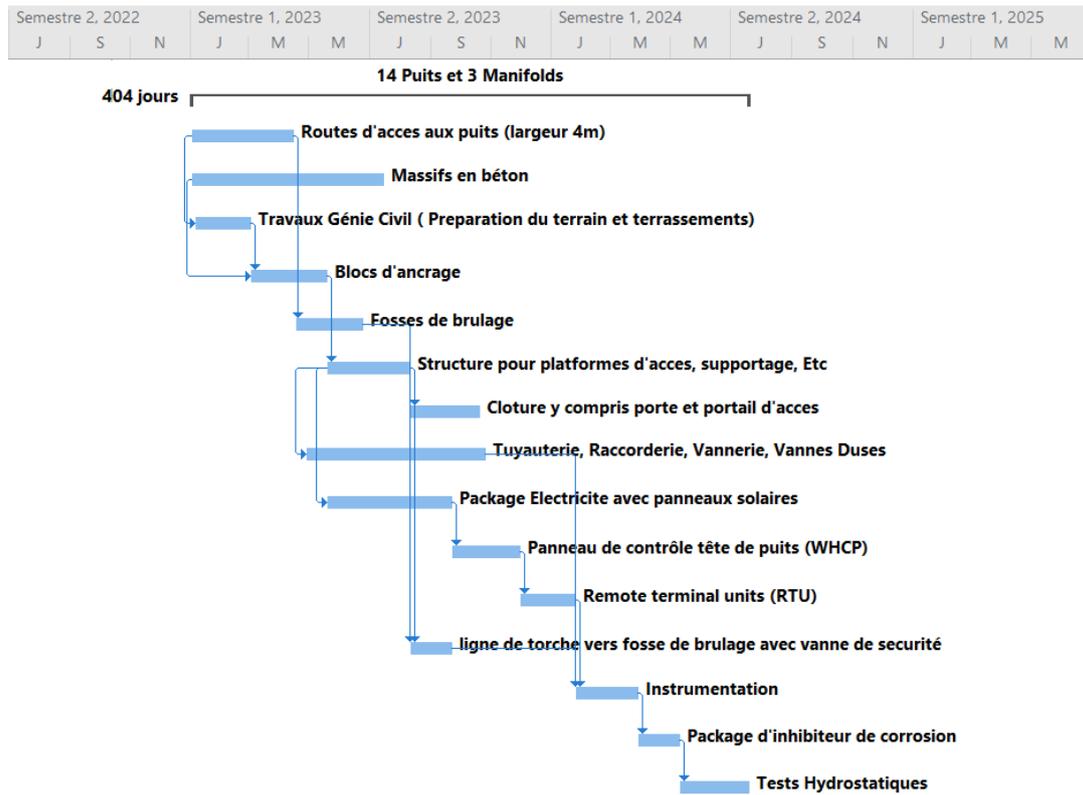


FIGURE V.7 – Diagramme de gantt du projet après l'accélération du projet.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.Burgess and J.Killebrew, Variation in activity level on a cyclic arrow diagram, Journal of Industrial Engineering 13, 1962, 76-83.
- [2] Afanvi, K. A. "Analyse SWOT pour les gestionnaires des organisations et systèmes de santé." J Rech Sci Univ Lomé 17 (2015) : 411-428.
- [3] B. Roy et M. Dibon, l'ordonnancement par la méthode des potentiels le programme CONCORD, Automatisme, pages 1-11, février 1966.
- [4] Cerny, V., Thermodynamical approach to the traveling salesman problem : an efficient simulation algorithm. J. of Optimization th. and applications. 1985
- [5] C. Laquerbe et L. Pibouleau, P , Floquet et S. Domenech, Procédures stochastiques en génie des procédés : Méthode du recuitsimulé et algorithmes génétiques, 6ème Colloque Maghrébin sur les Modèles Numériques de l'Ingénieur, C2MNI6, Tunis, 761-766, 1998.
- [6] C.Modern Heuristic : Techniques for Combinatorial Problems advances topics in computer science, Mc Graw-Hill, 1995.
- [7] Dakhli Anissa, FORMATION PRIMAVERA 6 PROJECT MANAGEMENT, Version 6-7, page 2.
- [8] Extrait de l'étude de cas Métropole 2002, Option ARLE (cas Ecolo'Tri).
- [9] François Rolly, LA GESTION DE PROJET, Smashwords, 2013, page 8.
- [10] G. Bel et J-B. Cavallé, Ordonnancement de la production, Editions Hermès, Paris, 2001.

- 
- [11] G. Fink, Recherche Opérationnelle et Réseau, L'avoriser, Paris, 2002.
- [12] H. Aboubakr et LEMMOUIS Abdelhamid « Résolution d'un problème d'ordonnancement de type job shop avec contrainte de transport, Projet de Fin d'Etudes, Université AbouBekr Belkaid Tlemcen.
- [13] J. Balzwick, Sheduling subject to resuorce constrained : Classification and complexity, Thèse de doctorat, 1983.
- [14] J. Turner, Do you manage work, deliverables or resources, International Journal of Project Management 18 (2), 2000, 83-84.
- [15] J. Turner, Towards a theory of project management, International Journal of Project Management 24 (3), 2006, 187-189.
- [16] Kirkpatrick, et al., 1983 Kirkpatrick, S., Gelatt, C. and Vecchi, M. P., Optimization by simulated annealing. Science. 1983, Vol. 220, 4598, pp. 671-680.
- [17] K. Kadiri, planification du projet partie 2, Notes de cours, ENSA Tétouan, 2012.
- [18] L'AFITEP (association francophone de management de projet) dictionnaire de management de projet, édition AFNOR.
- [19] Mohring, R. H. (1984). "Minimizing Costs of Resource Requirements in project Networks subject to a Fix Completion Time", Op Research, Vol. 32, No. 1, PP. 89-120.
- [20] M. Aidene, et B. Oukacha. Recherche opérationnelle ( Programmation linéaire), Edition Bleues. Pages 208p, 2005.
- [21] M. Nassereddine, Algorithmes de construction de graphes dans les problèmes d'ordonnancement de projet, Thèse de doctorat, Université de Farhat abbassetif ,2011.
- [22] M. Widmer et al, A new heuristic method for the flow shop sequencing problem, European Journal of Operational Research, 1989, 186-193
- [23] Optimisation Combinatoire, M1 GADM, Dr. N. KHERICI, UBMA, 2020/2021

- 
- [24] Pritsker, Watters et Wolfe : Multi-project scheduling with limited resources : a zero-one programming approach. Management Science, 1969.
- [25] Rapport annuel 2021, de la société nationale de génie civil bâtiment.
- [26] R.E. Bellman, The Bellman continuum, Editions Robert S. Roth, 1986.
- [27] Recherche Tabou J. Ayas et M.A. Viau 16 novembre 2004.
- [28] S.K. Iyer et B. Saxena, Improved genetic algorithm for the permutation flow-shop scheduling problem, Computers and Operations Research, vol 31, 2004, 593–606.
- [29] Y. Collette et P. Siarry, Optimisation Multiobjectif, Editions Eyrolles, Paris, 2002.