

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.

Université Abderahmane Mira de Béjaïa
Faculté des Sciences Exactes
Département de Recherche Opérationnelle



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de
MASTER en Recherche Opérationnelle

Option : Modélisation mathématique et Évaluation des Performances des Réseaux

Thème



Ordonnancement du projet de rénovation de la base de vie de la station de pompage SP3-OB1 (W. M'Sila)

Présentée par : DERADRA Nesrine & KEDJAR Nawal

Devant le jury composé de :

Président	Mr BRAHMI Belkacem	M.C.A.	Univ. de Béjaïa
Rapporteurs	Mme IAMOUCHENE-LEKADIR ouiza	M.C.A.	Univ. de Béjaïa
	Mr KHIMOUM Nouredine	M.A.A.	Univ. de Béjaïa
Examinatrice	Melle GHELLAB Fouzia	Doctorante	Univ. de Béjaïa
Examinatrice	LAKAOUR Lamia	Doctorante	Univ. de Béjaïa
Invité	Mr AÏT IDIR Habib	Ingénieur planing	RTC. SONATRACH de Béjaïa.

Béjaïa, 2016/2017.



Remerciements

Nous remercions DIEU le tout puissant, maître des cieux et de la terre, qui nous a éclairé le chemin et permis de mener à bien ce travail.

Tout d'abord nous tenons surtout à adresser nos plus vifs remerciements à Mr H.AIT IDIR, pour avoir accepté de nous proposer le sujet de ce mémoire, nous tenons à lui exprimer nos plus profonds respects pour sa patience et tout le temps précieux qu'il nous a consacré pour la réalisation de ce travail. Nous ne saurons jamais oublier ses conseils judicieux; ainsi pour tout le personnel du département TNF de la RTC pour leurs accueils pendant la période du stage.

Nous remercions vivement Mme Ouiza LEKADIR et Mr Nouredine KHIMOUM, les deux rapporteurs de ce mémoire, pour avoir accepté d'apporter leurs avis éclairés sur notre travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les membres du jury: Mr: Belkacem BRAHMI, Melle:Fouzia GHELLAB et Melle: Lamia LAKAOUR pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à mon père qui était toujours là pour moi tout au long de mes études.

A ma mère, avec tous mes sentiments de respect, d'amour et de reconnaissance pour tous les sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleures conditions.

A mes soeurs, mes frères, ma grand mère, mes oncles, mes tantes et tous mes cousins et cousines.

A mes chères amies Rima, Katia, Samia, Fatiha, Sonia.....

Et enfin à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Nesrine

Dédicaces

Je dédie ce travail à ceux qui sont dans mon cœur, qui ont veillé pour notre confort et sacrifié beaucoup pour notre réussite, Ma chère mère (que Dieu me la garde).

A celui qui m'a toujours appris comment réfléchir avant d'agir, à celui qui m'a soutenu tout au long de ma vie scolaire, à celui qui n'a jamais épargné un effort pour mon bien, Mon cher père (Que Dieu me le garde).

A mes chers frères, mes chères soeurs, à toute ma famille, mes chères amis. Et à tous ceux qui me connaissent.

Nawal

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	i
Liste des tableaux	v
Liste des abréviations	i
Introduction générale	1
1 Présentation générale de la RTC SONATRACH de Béjaia	3
1.1 Présentation de sonatrach	3
1.2 Activités principales de Sonatrach en partenariat	4
1.2.1 Activité en Amont	4
1.2.2 Activité en Aval	4
1.2.3 Commercialisation	4
1.2.4 Transport par Canalisation (TRC)	4
1.3 Régions de transport par canalisation et Stations de pompage	4
1.4 Présentation des différentes Structures de RTC	6
1.4.1 Sous direction exploitation :	7
1.4.2 Sous direction administration :	7
1.4.3 Sous direction finance et juridique :	7
1.4.4 Sous direction technique :	8
1.5 Position du problème	9
1.6 Conclusion	9
2 Gestion de projets et le problème d’ordonnancement	10
2.1 Introduction	10
2.1.1 Définition d’un projet	10
2.1.2 Objectifs d’un projet	10
2.1.3 Management du projet	11
2.1.4 Phases du projet :	11
2.2 Problème d’ordonnancement	12
2.2.1 Ressources	12

2.2.2	Tâches	13
2.2.3	Contraintes	14
2.3	Définition d'ordonnancement	14
2.3.1	L'objectif de l'ordonnancement	14
2.3.2	Le problème d'ordonnancement de projets sous contraintes de ressources	15
2.4	Quelques éléments de la théorie des graphes	17
2.4.1	Définition d'un graphe	17
2.4.2	Date au plus tôt	18
2.4.3	Date au plus tard	18
2.4.4	Tâche critique	19
2.4.5	Chemin critique	19
2.4.6	Une marge	19
2.5	Conclusion	19
3	Méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement	20
3.1	Introduction	20
3.2	Modèles de planification de tâches d'un projet	20
3.2.1	Le diagramme Gantt	20
3.2.2	La méthode MPM	21
3.2.3	La méthode PDM	22
3.2.4	Méthode PERT	24
3.2.5	La méthode CPM	24
3.3	Méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement	24
3.3.1	Les méthodes de résolution exactes	25
3.3.2	Les méthodes approchées	25
3.4	Conclusion	31
4	Application : Modélisation et résolution du problème d'ordonnancement du projet de la station de pompage SP3-OB1 (W. M'sila)	32
4.1	Introduction	32
4.2	Formulation du problème	32
4.3	Description des Travaux	34
4.4	Ressources mises en œuvre	34
4.5	Modélisation du problème sans contraintes de ressources avec la méthode MPM	38
4.6	Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités	40
4.6.1	Application de la méthode de Burgess-Killebrew	44
4.6.2	Interprétation des résultats	55
4.7	Conclusion	56
	Conclusion générale	57

Table des matières

iii

Bibliographie

57

Table des figures

1.1	Organigramme de la RTC Béjaïa.	6
2.1	Chevauchement des tâches.	15
2.2	Date au plus tôt.	18
2.3	Date au plus tard.	18
3.1	Tâches dans le réseau MPM associé au projet.	22
3.2	Le lien Début-Début.	22
3.3	Le lien Début-Fin.	23
3.4	Le lien Fin-Début.	23
3.5	Le lien fin-fin.	23
3.6	Représentation des activités et des ressources sur le diagramme de Gantt. .	27
3.7	Premier déplacement de l'activité N°5.	28
3.8	Le second déplacement de l'activité N°5.	29
3.9	Déplacement de l'activité N°2.	29
4.1	Le réseau MPM associé au projet.	40
4.2	Diagramme de GANTT.	41
4.3	Affectation des ressources sur le diagramme de GANTT.	43
4.4	Représentation des activités et des ressources après le premier déplacement.	45
4.5	Représentation des activités et les ressources après le deuxième décalage. .	46
4.6	Représentation des activités et les ressources après le troisième décalage de l'activité 21.	47
4.7	Représentation des activités et les ressources après décalage de l'activité 21.	49
4.8	Représentation des activités et les ressources après le septième de l'activité 19.	51
4.9	Représentation des activités et les ressources après le premier décalage de l'activité 6.	53
4.10	Représentation des activités et ressources après le second décalage de l'ac- tivité 6.	54

Liste des tableaux

3.1	Tableau des activités du projet.	21
3.2	Dates 'au plus tôt' et 'au plus tard' des tâches du projet.	22
3.3	Tableau des Besoins de chaque activité.	27
4.1	Tableau des activités du projet.	35
4.2	Tableau des disponibilités des ressources.	36
4.3	Matrices des besoins en ressources.	37
4.4	Tableau des différentes dates au plus tôt et au plus tard des activités.	39
4.5	Tableau des différentes dates au plus tôt et au plus tard.	42

Liste des abréviations

CPM : Critical Path Method

ENEP : Entreprise Nationale d'Engineering Pétrolière.

ENGTP :Entreprise Nationale des Grand Travaux Pétroliers.

GPL :Gaz de Pétrole Liquéfié.

HSE : Hygiène, Sécurité et Environnement.

LPT :Longest processing Time

MPM : Méthode des Potentiels Metra

NAFTAL : Société Nationale de Commercialisation et des Produits Pétroliers.

PDM : Processus Diagram Method

PERT : Program Evaluation and Review Techniques

RCPSP : Resource-Constrained Project Scheduling Problem

RCPSP-OM : Resource Constrained Project Scheduling Problem with Overlapping Modes

RLP : Ressource Leveling Problem

RTC : Région Transport Centre

SDD : Les tâches avec des dates au plus tard les plus courtes d'abord

SP3 : Station de Pompage à M'Sila

SPT :Shortest Processing Time

SONATRACH : Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures.

T : Tonne.

TRC : Transport par Canalisation.

VRD : Voiries Réseau Divers

Introduction générale

Un problème d'ordonnement de projets consiste à gérer et contrôler la mise en œuvre de projets comportant de nombreuses tâches dont il faut planifier l'exécution en respectant diverses contraintes[17]. Ces projets concernent par exemple la construction d'un bâtiment, d'une usine, la mise en place d'un chantier industriel, ..., etc. Ce domaine est considéré parmi l'un des premiers de la Recherche Opérationnelle. A la fin des années 50, la nécessité de développer les méthodes de résolution des problèmes d'ordonnement de projets est apparue simultanément aux états Unis et en Europe.

En effet, en 1957, des sociétés américaines mettent au point la méthode de chemin critique CPM (critical path method) et la méthode PERT (Programming Evaluation and Review Techniques). En 1958, la société française Sema-Metra introduit la méthode MPM (Méthode des Potentiels Metra). Grâce à la simplicité de ces méthodes et leurs efficacité, elles ont été appliquées dans de nombreux domaines industriels (chimie, pétrole, construction,... etc).

L'objectif de ces méthodes est de minimiser la durée d'exécution d'un projet tout en satisfaisant des contraintes temporelles entre les tâches. Cependant, ces méthodes ne prennent pas en compte la gestion des ressources, qui dans un projet réel, sont de capacités limitées. Ainsi, diverses extensions ont été proposées à ces méthodes. Ces extensions prennent en compte le fait que la réalisation des tâches nécessitent l'utilisation des ressources tout en respectant des contraintes de limitation de ces ressources. Ces nouvelles extensions ont donné lieu aux problèmes d'ordonnement de projets à moyens limités RCPSP (Resource Constrained Project Scheduling Problem). Ces problèmes 'RCPSP' consistent à ordonner un ensemble d'activités liées par des relations de précédence dans le but de minimiser la durée d'exécution de ces projets sous des contraintes de précédences et d'utilisation des ressources[20]. Depuis la fin du 20^{ème} siècle, différentes techniques ont été développées dans le but de réduire la durée d'exécution. Ces techniques incluent la compression, la substitution et le chevauchement des activités des projets.

Notre étude dans ce mémoire se base principalement sur la modélisation et la résolution d'un RCPSP avec différentes ressources et chevauchement d'activités.

Le chevauchement de ces activités consiste à les exécuter en parallèle i.e. les exécuter de manière séquentielle[25], en autorisant l'activité en aval à débuter avant la fin de l'activité en amont à partir des informations préliminaires. Cela consiste en l'allocation des ressources financières, humaines et matérielles, de manière à atteindre des objectifs bien précis. Cependant le chevauchement des activités induit la surcharge des ressources et pour

remédier à cette surcharge il faut faire appel au lissage de ces ressources. Ainsi, dans ce mémoire on a implémenté l'heuristique de lissage 'Burgess Killebrew'.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à la présentation structurelle et fonctionnelle de l'entreprise RTC-Sonatrach, plus particulièrement, le département des travaux neufs ou nous avons effectué notre stage. Le deuxième chapitre est consacré au problème de gestion de projets et le problème d'ordonnancement. Dans le troisième chapitre seront présentées les différentes méthodes de résolution d'un problème d'ordonnancement. Le quatrième chapitre, traitera la modélisation du problème d'ordonnancement 'RCPSP' posé qui est la rénovation de la base de vie W.M'sila. Le dernier chapitre est consacré à la résolution de ce problème. enfin, notre travail s'achèvera par une conclusion générale et une brève bibliographie.

Chapitre 1

Présentation générale de la RTC SONATRACH de Béjaia

Créée le 31 décembre 1963 par le décret N° 63 /491, Sonatrach doit répondre au souci de mobiliser les ressources de la rente pétrolière perçue très tôt comme un élément moteur dans le développement de l'Algérie. Au fil des années, elle devient un puissant élément d'intégration nationale, de stabilité et de développement économique et social. Après 1971, la nationalisation des secteurs des hydrocarbures conduit à une restructuration et réorganisation efficace qui a donné naissance à 18 filiales à savoir NAFTAL , ENEP ,ENGTP, etc.

1.1 Présentation de sonatrach

Sonatrach est la compagnie nationale algérienne de recherche, d'exploitation, de transport par canalisation, de transformation et de commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. Adoptant une stratégie de diversification, Sonatrach se développe bien dans les activités de génération électrique, d'énergies nouvelles et renouvelables, de dessalement d'eau de mer, de recherche et d'exploitation minière. Elle a pour missions de valoriser de façon optimale les ressources nationales d'hydrocarbures et de créer des richesses au service du développement économique et social du pays. Sonatrach est aujourd'hui la première compagnie d'hydrocarbures en Afrique et en Méditerranée. Aujourd'hui, Sonatrach s'affirme non seulement comme un Groupe international à vocation pétrolière et gazière, mais comme une compagnie solidaire, responsable et citoyenne. Elle s'est engagée en faveur du développement économique, social et culturel des populations ; elle s'est fixée des priorités incontournables en matière de HSE et s'est impliquée résolument dans la protection de l'environnement et la préservation des écosystèmes.

1.2 Activités principales de Sonatrach en partenariat

Sonatrach exerce ses activités dans quatre principaux domaines l'Amont, l'Aval, le Transport par Canalisation et la Commercialisation :

1.2.1 Activité en Amont

cette activité en amont recouvre les métiers de recherche, d'exploration, de développement et de production d'hydrocarbures. Sonatrach opère dans des gisements géants, dans différentes régions du Sahara algérien, tels que : Hassi Messaoud, Hassi R'Mel, Hassi-Berkine, Ourhoud, Tin Fouyé Tabankort, Rhour de Nouss, In Salah et In Amenas, en effort propre ou en association avec des compagnies pétrolières étrangères.

1.2.2 Activité en Aval

L'activité en Aval a en charge le développement et l'exploitation des complexes de liquéfaction de gaz naturel, de séparation de GPL, de raffinage et des gaz industriels.

1.2.3 Commercialisation

L'activité Commercialisation a pour missions l'élaboration et l'application de la stratégie de Sonatrach en matière de commercialisation des hydrocarbures sur le marché intérieur et à l'international par les opérations de trading et de shipping. Cette activité gère les interfaces et les opérations avec les autres opérateurs nationaux pour satisfaire la demande du marché dans les meilleures conditions économiques et de qualité de service.

1.2.4 Transport par Canalisation (TRC)

L'Activité Transport par Canalisation assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, condensât, gaz naturel et GPL). Les centres de dispatching comptent parmi les installations névralgiques de l'Activité. Le réseau transport par canalisation compte 20 oléoducs d'une longueur de 9 883 Km, avec une capacité de transport de 145 Millions Tonnes et 14 gazoducs d'une longueur totale de 8629 Km, avec une capacité de transport de 142 milliards de m³/an.

1.3 Régions de transport par canalisation et Stations de pompage

Sonatrach, à travers l'Activité Transport par Canalisation, dispose de 22 systèmes de transport par canalisation (20 en exploitation, 1 en cours de réalisation GK3, 1 en phase de lancement GR5)

- Région Transport Haoud El-Hamra (RTH) ;

- Région Transport Est-Skikda (RTH) ;
- Région Transport Centre-Béjaia (RTC) ;
- Région Transport In Aménas (RTI) ;
- Gazoduc Espagne/ Maroc (GEM) ;
- Gazoduc Tunisie/Italie (GPDF) ;
- Région transport Ouest Arzew (RTO).

Les stations de pompage sont :

- SPA : station satellite (Touggourt) ;
- SPI BIS : station de pompage à Djemaa(EL-Oued) ;
- SPB : station satellite Biskra ;
- SP2 : station de pompage à Biskra ;
- SPC : station satellite (M'sila) ;
- SP3 : station de pompage à M'sila ;
- SPD : station satellite (Béni-Mansour) ;
- SBM : station de pompage Béni-Mansour ;
- TRA : terminal raffinerie d'Alger ;
- TMA : terminal marin de Béjaia.

1.4 Présentation des différentes Structures de RTC

L'organigramme des différentes structures de l'entreprise RTC Sonatrach de Béjaïa est donné dans la figure suivante :

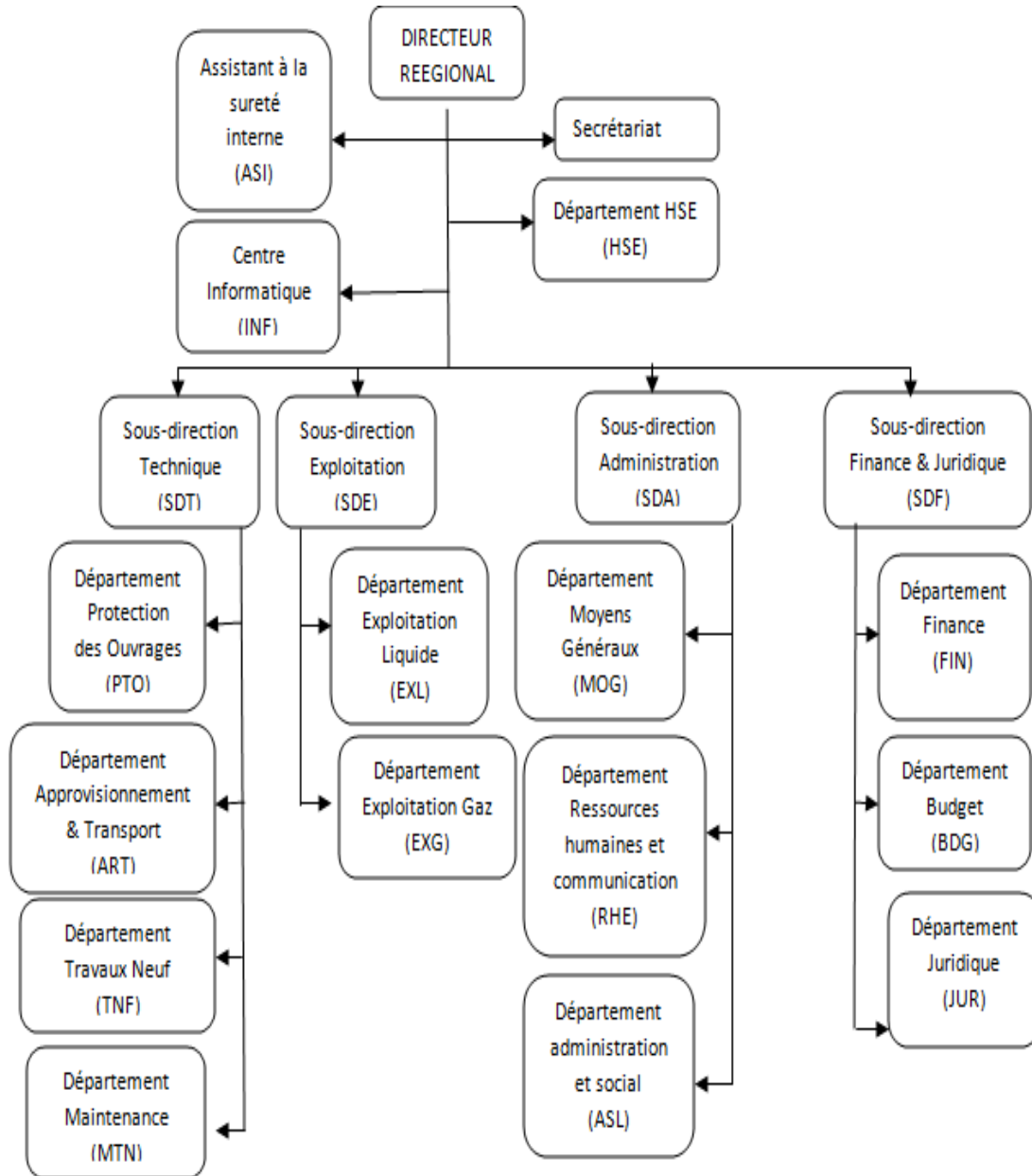


FIGURE 1.1 – Organigramme de la RTC Béjaïa.

1.4.1 Sous direction exploitation :

La sous-direction exploitation subdivisée en deux départements :

- **Département exploitation liquide** : Ce département est chargé des missions suivantes :
 - ▷ Transport de pétrole brut et de condensat de Haoud-El-Hamra vers le terminal de Bejaia et de la raffinerie de sidi-Arcine-Alger ;
 - ▷ Chargement de bateaux en pétrole brut et de condensat ;
 - ▷ Livraisons de pétrole à la raffinerie de sidi-Arcine-Alger ;
 - ▷ Stockage de pétrole brut et de condensât.
- **Département exploitation gaz** : Ce département est chargé de l'exploitation du gazoduc de Hassi-R'mel à Borj-M'nayel. Le gaz est livré directement à la SONALGAZ pour l'alimentation électrique et la consommation domestiques. Elle gère deux stations qui sont :
 - ▷ Station de compression Medjdel ;
 - ▷ Le terminal GG1 Bordj-Menaïel.

1.4.2 Sous direction administration :

Cette direction contient trois départements qui sont :

- ▷ **Département ressources humaines et communication** Sa mission est d'acquérir des ressources humaines en nombre et en qualité, d'assurer l'évolution de leurs carrières et de planifier les besoins à court et moyen terme, tant en effectif qu'en besoins de formation, de perfectionnement et de recyclage. Pour ces besoins, ce département dispose de cadre de communication qui anime une cellule de communication.
- ▷ **Département administratif et social** Ce département veille au respect des lois en vigueur qui régissent les relations de travail, comme il est chargé de la gestion du personnel de la RTC.
- ▷ **Département moyens généraux** : Ce département assure le soutien logistique de l'entreprise (restauration, hébergement des missionnaires, entretien des bâtiments et des espaces verts, achat des fournitures du bureau,... etc.

1.4.3 Sous direction finance et juridique :

Cette direction est organisée en trois départements qui sont :

- ▷ **Département finance** : Il prend en charge la gestion comptable et financière de , il assure l'enregistrement chronologique des informations de comptabilité et la gestion de la trésorerie comme il fait des appels de fond à la division de commercialisation des hydrocarbures.
- ▷ **Département budget** : Qui était l'un des services du département finances, est devenu département dans le cadre de nouvel organigramme. Il est chargé :

- Élaborer le budget prévisionnel de l'année à venir, en se basant sur les prévisions élaborées par chaque structure de la RTC.
- Élaborer le plan de gestion à court et à moyen terme.
- ▷ **Département juridique** : Ce département veille sur la légalité des transactions, lance des appels d'offre nationaux et internationaux, règle les litiges nées entre RTC et les tiers et s'occupe aussi des assurances du patrimoine de l'entreprise.

1.4.4 Sous direction technique :

Elle se compose de quatre départements :

- ▷ **Département approvisionnement et transport** : Assure les approvisionnement nécessaire pour la bonne exploitation des installations, le stockage des pièces de rechange nécessaires pour une année minimum d'utilisation et le transport en tout genre.
- ▷ **Département maintenance** : la mission principale de ce département est de veiller au maintient du bon état de fonctionnement des équipement et des installations techniques de la région.
- ▷ **Département protection des ouvrages** : Ce département est chargé de la réparation des canalisations et des ouvrages de génie civil y afférent ainsi que de la protection cathodique des installations.
- ▷ **Département Travaux Neufs** : Ce département est chargé des études, l'assistance technique et le suivi de réalisation des projets d'investissement et des travaux neufs de la région. Il prend aussi en charge les travaux de rénovation des installations demandés par les différentes structures de la région. Le département travaux neufs gère environ quatre vingt pour cent du budget global de région. Ce département actuellement est structuré comme suit :
 - Service études industrielles,
 - Service technique et suivi de réalisation ;
 - Section archivage et documentation ;

Autres structures de la RTC : Les structures suivantes sont rattachées directement à la direction régionale :

- ▷ **Centre Informatique** Il a pour mission de :
 - Développer, installer et exploiter des applications informatiques.
 - Maintenance de parc informatique de la région.
- ▷ **Département Hygiène Sécurité Environnement** : Il a pour mission :
 - protection et sauvegarde du patrimoine humain et matériel de la région.
- ▷ **Assistante Sécurité Interne** : Il veille à la sécurité et à l'intégrité des installations et des personnes de la région.

Cette brève présentation de l'entreprise RTC Sonatrach de Bejaia, nous l'avons réalisée durant le stage d'un mois qu'on a effectué au sein de cette entreprise. Toujours durant ce stage l'entreprise nous a soulevé l'un des problèmes auxquels elle est confrontée à savoir le

problème de minimisation de la durée du projet 'Rénovation de la base de vie de la station de pompage $SP3 - OB1$ ' que nous expliciterons dans la section suivante.

1.5 Position du problème

La RTC Sonatrach de Bejaia a pris en charge de réaliser les travaux de rénovation de la base de vie de la station de pompage SP3-OB1 .

Elle cherche à trouver un planning prévisionnel de réalisation qui prend en compte les contraintes des ressources et de chevauchement des tâches, dont l'objectif est de minimiser la durée totale du projet.

Pour trouver ce planning, des outils familiers tels que pert et le diagramme de Gant peuvent être effectuée mais ces méthodes ne prennent pas en compte les contraintes des ressources.

Pour réaliser ce projet dans le délai qui est imposé par l'entreprise, nous allons appliquer le chevauchement entre les activités, cette technique permet d'accélérer l'exécution du projet, mais comprend des risques du surcharge des ressources. Alors comment peut on atteindre une durée minimale sans violer la contraintes des ressources ?

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une représentation structurelle et fonctionnelle de l'entreprise RTC SONATRACH de Béjéïa où nous avons effectué notre stage. Durant ce stage, l'entreprise a soulevé l'un des problèmes auxquels elle est confrontée à savoir le problème de minimisation de la durée du projet 'Rénovation de la base de vie de la station de pompage $SP3 - OB1$ '. Notre objectif étant d'essayer de résoudre ce problème posé, le chapitre suivant résumera les notions de base de la gestion de projets et de leurs ordonnancement.

Chapitre 2

Gestion de projets et le problème d'ordonnancement

2.1 Introduction

La gestion de projets concerne les efforts à déployer pour planifier et organiser les individus et les ressources pour un objectif donné. Au niveau de la gestion de projets, il est important de bien distinguer entre l'ordonnancement et la planification.

Dans ce chapitre nous allons présenter certains concepts de la gestion et d'ordonnement de projets.

2.1.1 Définition d'un projet

Un projet est un processus unique, qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées faisant appel à diverses compétences et ressources de l'entreprise dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques telles que des contraintes de délais, de coûts et de ressources [21].

Selon la norme AFNOR : le projet est un ensemble d'actions à réaliser avec des ressources données, pour satisfaire un objectif défini, dans le cadre d'une mission précise, et qu'a un début et une fin [4].

Le projet est un système complexe non préparatif de moyens et d'actions constitué pour appuyer une réponse à une demande élaborée pour satisfaire les besoins d'un client.

2.1.2 Objectifs d'un projet

l'objectif d'un projet décliné en trois catégories d'objectifs qui sont souvent antagonistes :

- **Les objectifs de performance technique** : relatifs au respect des spécifications fonctionnelles et des caractéristiques techniques du produit. On se définit ainsi un niveau de qualité en ce qui concerne, par exemple le respect de tolérance, la fiabilité du produit, la facilité d'usage, etc.

- **Les objectifs de délai** ils sont une composante très importante pour le client. Ainsi, il ne sert à rien de livrer un stade olympique 3 mois après la fin des jeux olympiques. D'autre part, dans un marché concurrentiel, tel que celui des produits pharmaceutiques, être le premier à mettre sur le marché un nouveau vaccin ou un nouveau médicament peut représenter un effet de monopole et des gains substantiels pour le premier arrivé sur le marché.
- **Les objectifs de coût** ils sont primordiaux notamment dans le cadre d'un contrat à prix non révisables ou dans le cas d'un projet interne.

Un projet a peu de chances d'aboutir si les trois objectifs précédents ne sont pas clairement fixés et formalisés [21].

2.1.3 Management du projet

Le management de projets est l'application de connaissances, de compétences, d'outils et de techniques aux activités d'un projet afin d'en satisfaire les exigences [27].

Le management d'un projet est effectuée en appliquant et en intégrant, de manière appropriée, les processus de management du projet groupés logiquement dans les cinq groupes de processus qui sont [15] :

- Le démarrage.
- La planification.
- L'exécution.
- La surveillance et la maîtrise.
- La clôture.

Le management d'un projet a pour objectif essentiel d'apporter à la direction de ce projet (et à travers elle, à la hiérarchie), des éléments pour prendre en temps voulu toutes les décisions lui permettent de respecter les termes du contrat, en contenu, en qualité, en délais et en coûts[10].

2.1.4 Phases du projet :

Les phases du projets sont :

Phase 1 :la initialisation du projet

Cette phase a l'objectif de décider la réalisation du projet. Elle joue les rôles suivants :

- 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.

Phase 2 : planification et budgétisation du projet :

Cette phase doit aboutir à :

- La définition du détail des coûts et des délais.
- La définition des responsabilités et circuits d'information et de décision .
- estimation de la rentabilité .
- La conception et la mise en place des outils permettant de contrôler l'avancement du projet.

Phase 3 : phase de réalisation

cette phase génère le plus de coûts.

- mise en place de l'organisation .
- exécution du travail.
- pilotage coûts-délais-spécifications.
- résolution de problèmes.

Phase 4 : Phase de terminaison

Archivage de l'expérience et améliorer le déroulement des projets futurs, elle joue les rôles suivants :

- analyse des écarts entre planifie et réalise.
- mémoire des opérations passées.
- évaluation du projet.

2.2 Problème d'ordonnancement

Un problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, etc.), et de contraintes portant sur l'utilisation, la disponibilité des ressources requises pour les tâches, et visant à minimiser (resp. maximiser) un certain critère d'optimalité. Dans un problème d'ordonnancement interviennent trois notions fondamentales : les ressources, les tâches, et les contraintes .

2.2.1 Ressources

Une ressource est un moyen technique ou humain qui sert à l'exécution d'une tâche. On distingue plusieurs types de ressources [19] :

- **Ressources renouvelables :**

Une ressource est dite renouvelable si, les ressources qui sont affectées à une tâche redeviennent disponibles après l'achèvement de cette dernière pour les tâches suivantes. C'est le cas pour les machines, les processeurs, les fichiers, le personnel, etc.

– **Ressources consommables :**

Contrairement aux ressources renouvelables, les ressources consommables ne redeviennent plus disponibles après leurs utilisations. C'est le cas pour l'argent, la matière première, etc.

– **Ressources doublement contraintes :**

Une ressource est doublement contraintes, si, son utilisation instantanée et sa consommation globale sont toutes les deux limitées. C'est le Cas pour les sources d'énergies, de financement, etc.

– **Ressources disjonctives :**

Une ressource est dite disjonctive ,si, elle ne peut exécuté qu'une seule tâche à la fois, alors elle est non partageable. C'est le cas pour les machines, robots,..., etc.

– **Ressources cumulatives :**

Différemment à une ressource disjonctive, une ressource cumulative est partageable, peut être utilisées par plusieurs tâches en même temps.

2.2.2 Tâches

Une tâche i est une entité élémentaire de travail localisé dans le temps par une date de début t_i et de fin C_i dont la réalisation est caractérisée par [19] :

- Une durée d_i (on a $d_i = t_i + C_i$);
- r_{ik} :L'intensité avec laquelle la tâche i consomme une certain moyen ou ressource k .

Exemples :

- En construction : pose des dalles , plomberie,...,etc.
- En informatique : exécution d'un programme, impression d'un document, ...etc.

Donc , il n'y pas de définition formelle d'un tâche, mais dépend de la domaine.

En ordonnancement de projet, nous conservons le terme tâche pour désigner les activités constitutives d'un projet,l'ensemble des tâche est généralement noté I , le nombre de tâche par n et chaque tâche est noté par i et elle est décrite par les caractéristique suivantes :

- La date de disponibilité de la tâche i (date au plus tôt);
- La date de début au plus tard de la tâche i ;
- La date de fin au tôt;
- La date échue de tâche i (date de fin au plus tard);
- t_i : 'Date de début d'exécution de la tâche i ';
- C_i : 'Date de fin d'exécution de la tâche i ';
- d_i : 'Durée d'exécution de la tâche i '.

2.2.3 Contraintes

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre conjointement les variables de décisions. On distingue différents types de contraintes [2] :

- **Contraintes potentielles** : On distingue deux classes :
 - ▷ **Contraintes d'antériorité** : l'activité j commence dès que l'activité i soit achevée, par exemple, la construction des piliers suit les fondations.
 - ▷ **Contraintes de localisation temporelle** : L'activité j ne peut débuter avant une certaine date ou qu'elle peut s'achever.
- **Les contraintes disjonctives** : Deux tâches i et j sont en disjonction si elles ne peuvent être exécutées simultanément, ce type de contrainte peut figurer dans le cas d'utilisation d'une ressource présente en un seul exemplaire ou bien pour des raisons de sécurité.
- **Contraintes cumulatives** : C'est une généralisation des contraintes disjonctives, elles sont relatives à l'évolution au cours du temps, des moyens de réalisation des différentes tâches.

2.3 Définition d'ordonnement

L'ordonnement est la programmation dans le temps de l'exécution d'une série de tâches (activités, opérations) sur un ensemble de ressources physiques (humaines et techniques), en cherchant à optimiser certains critères, financiers ou technologiques, et en respectant les contraintes de fabrication et d'organisation [11]. Le problème d'ordonnement consiste à organiser dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînements,...) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises.

2.3.1 L'objectif de l'ordonnement

Les objectifs des entreprises se sont diversifiés et le processus d'ordonnement est devenu de plus en plus multicritères. D'une manière générale, on distingue plusieurs classes d'objectifs concernant un ordonnancement [17] :

- **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.

2.3.2 Le problème d'ordonnement de projets sous contraintes de ressources

Le problème d'ordonnement de projets à moyens limités (RCPSP : Resources Constrained Project Scheduling Problem), est l'un des problèmes d'ordonnement cumulatif les plus connus, du fait de l'intérêt que lui ont accordé les chercheurs du domaine de la recherche opérationnelle et de ses nombreuses applications industrielles.

◆ Définition du problème RCPSP

Le problème d'ordonnement de projets sous contraintes de ressources (RCPSP) est un problème d'optimisation combinatoire les plus difficiles à résoudre. La démonstration de sa NP-difficulté au sens fort est donnée par Blazewicz et al [3], ce problème est défini par un 6-uplet (V, p, E, R, B, b) , où :

- V est un ensemble d'activités.
- p 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).

◆ Chevauchement entre activités

Chevauchement entre tâches, cette contrainte d'ordonnement est une généralisation des liens de précedence entre deux tâches successives, pour prendre en compte les cas où la seconde tâche peut débuter avant la fin de la première [25].

C'est-à-dire le chevauchement des tâches consiste à exécuter en parallèle deux activités, normalement séquentielles, en autorisant l'activité en aval à commencer avec des informations préliminaires. Il a été confirmé par une étude statistique (Terwiesch et Loch, 1999) qu'il permet de réduire la durée d'exécution du projet et peut être utilisée pour limiter les risques de retards lors de l'exécution du projet. Le chevauchement d'activités est complexe à cause des nombreux paramètres qui interagissent entre les activités.

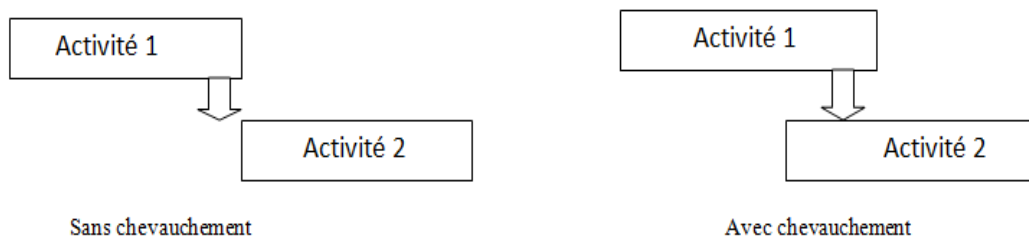


FIGURE 2.1 – Chevauchement des tâches.

◆ Problème d'ordonnement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités

Le problème d'ordonnement de projets avec contrainte de ressources et modes de chevauchement est une extension du problème d'ordonnement classique (Research Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)), Étant donné un ensemble d'activités à réaliser, le RCPSP-OM (Resource Constrained Project Scheduling Problem with Overlapping Modes) consiste à déterminer l'ordre d'exécution dans le temps d'un ensemble d'activités de façon à minimiser la durée totale du projet tout en respectant les relations de précédence. L'ordonnement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités s'appuie sur les hypothèses suivant [25] :

les activités chevauchables sont :

- identifiées à priori.
- les échanges d'information sont unidirectionnels .
- les échanges d'information entre les activités chevauchables sont gratuits et instantanés.

◆ Problème de lissage des ressources

La durée du projet représente un objectif lié à l'exécution des tâches. D'autres objectifs réalistes sont liés à la gestion des ressources. On peut par exemple souhaiter que le profil d'utilisation des ressources soit le plus équilibré possible. Il s'agit du problème de lissage des ressources (ressource levelling problem). Dans ce cas, une date limite T est imposée au projet et l'utilisation maximale à un instant donné d'une variable R_k . Afin de mesurer la qualité d'un certain ordonnancement, nous réduisons au minimum la somme des carrés des valeurs de la ressources k . Alors nous pouvons exprimer toute la demande de la ressources k en fonction de temps t pour un ordonnancement donné t_N par un profil de ressource r_{kt} .

La fonction objectif est remplacée par $\min \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2$ (vise à minimiser la somme du carré des utilisations des ressources)

Le problème de lissage de ressources (RLP) est l'un des problèmes d'ordonnement, son objectif est de parvenir à la consommation de ressources la plus efficace sans l'augmentation du Makespan (la durée totale) prescrit du projet [5, 20].

Les problèmes de lissage de ressources (RLP), est donné par un ensemble d'activités $A = \{1, \dots, n\}$ et d'un ensemble de ressources renouvelables $k = \{1, \dots, m\}$. Chaque ressource k est disponible en quantité constante R_k . Chaque activité $i \in A$ a une durée opératoire d_i et nécessite pour sa réalisation une constante r_{kt} de la ressource k ($k \in \{1, \dots, m\}$).

- Les contraintes de ressources, indique qu'à chaque instant t , la quantité d'une ressource k utilisée par l'ensemble $A(t)$ des activités en cours d'exécution, n'excède pas

la capacités R_k de la ressource k

$$\sum_{i \in A(t)} r_{kt} \leq R_k, \forall t = 1, \dots, T; \forall k = 1, \dots, m;$$

Avec $A(t) = \{t_i \leq t \leq t_i + d_i\}$: est l'ensemble des activités i en cours d'exécution au temps t .

Et r_{kt} : Capacité de le ressource k durant la période t .

La formulation conceptuelle du RLP se présente donc comme suit [22] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{k=1}^m \sum_{i \in A(t)} r_{kt}^2; \quad (2.1) \\ t_i + d_i \leq t_j, \forall (i, j) \in A; \quad (2.2) \\ \sum_{i \in A(t)} r_{kt} \leq R_{kt}, \forall t = 1, \dots, T; \forall k = 1, \dots, m; \quad (2.3) \\ t_i \geq 0, \forall i = 1, \dots, n; \quad (2.4) \\ d_i \geq 0, \forall i =, \dots, n. \quad (2.5). \end{array} \right.$$

Les variable t_i représente les dates de début des activités, L'objectif (2.1) minimiser la somme des carré d'utilisations des ressources[6]. L'équation (2.2) sont les contraintes de précédence. Les contraintes de ressource(2.3) signifient qu'a tout instant t et pour toute ressource k , la somme des consommations de la ressource k sur l'ensemble $A(t)$ des activités en cour à l'instant t est inférieur à la capacité R_k .

2.4 Quelques éléments de la théorie des graphes

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

2.4.1 Définition d'un graphe

Un graphe orienté pondéré G est constitué de deux ensembles :

1. Un ensemble X d'élément 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 pondéré". par contre, si elles ne sont pas orientées, on obtient des arrêtes et G devient "un graphe non orienté".

2.4.2 Date au plus tôt

On appelle date au plus tôt d'une tâche j , noté 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.

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

$$\begin{cases} t_1 = 0. \\ t_j = \max(t_i + d_i), \text{ telque } j \neq i; \end{cases}$$

Avec d_{ij} la durée de l'activité (i,j).

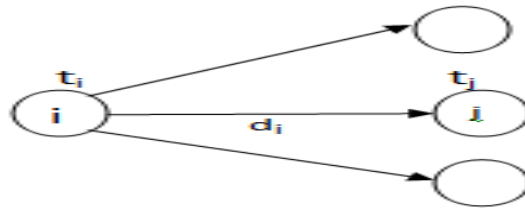


FIGURE 2.2 – Date au plus tôt.

2.4.3 Date au plus tard

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

$$\begin{cases} T_N = t_N. \\ T_j = \min(T_i - d_i); \end{cases}$$

Où $I(i, j)$: extrémité initiale.



FIGURE 2.3 – Date au plus tard.

2.4.4 Tâche critique

Si tout retard dans l'exécution de cette tâche se répercute automatiquement (par un retard égal) dans la durée de réalisation du projet. On dit alors que cette tâche est critique.

2.4.5 Chemin critique

C'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 est nulle.

Il est déterminé en établissant l'éventail des activités qui disposent toutes de la même marge minimale[14].

2.4.6 Une marge

Elle est définie pour chaque tâche, comme la différence entre sa date de début au plus tard et sa date de début au plus tôt. On distingue les marges suivantes :

- **Marge totale** : C'est la durée de flottement qui est égale à la différence entre les dates au plus tôt et les dates au plus tard d'une activité.
- **Marge libre** : Est le retard maximal sur cette activité non critique sans affecter la date au plus tôt de l'évènement final de cette activité.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes généralités sur la gestion de projets et le problème d'ordonnement. Pour résoudre ce genre de problèmes de nombreuses méthodes ont été développées, ces dernières seront présentées brièvement dans le prochain chapitre.

Chapitre 3

Méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement

3.1 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.

3.2 Modèles de planification de tâches d'un projet

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

3.2.1 Le diagramme Gantt

Le diagramme de Gantt est un outil permettant de modéliser la planification de tâches nécessaires à la réalisation d'un projet. Le principe de ce type de diagramme est de représenter au sein d'un tableau, en ligne les différentes tâches et en colonnes les unités de temps (exprimées en mois, semaines, jours, etc). Cette méthode a été développée au début des années 1960 et elle est actuellement intégrée dans tous les logiciels de planification de projets (MS Project, Gantt Project) [9]. Les différentes étapes de réalisation d'un diagramme de Gantt sont les suivantes :

- Définition des différentes tâches à réaliser et leurs durées ;
- Définition des relations d'antériorité entre tâches ;
- Représentation des tâches par des traits dans le diagramme : d'abord les tâches n'ayant aucune antériorité, puis celles dont les tâches antérieures ont déjà été

- représentées, et ainsi de suite ;
- Évaluer la solution : représentation de la progression réelle du travail par un trait pointillé parallèle à la tâche planifiée.

3.2.2 La méthode MPM

La méthode des potentiels a été développée vers la fin des années 50 parallèlement à la méthode PERT (see 3.2.4). Elle est appelée également la méthode MPM (Méthode des Potentiels Metra) [23] ou encore méthode des potentiels-tâche [9].

Dans la méthode des potentiels-métra, le problème est représenté sous forme d'un graphe tel que les tâches sont représentées par des nœuds et les contraintes de succession par des arcs. À chaque nœuds sont associées une date de début au plus tôt et une date de fin au plus tard. À chaque arc est associé un délai d'attente entre les tâches. La date de début au plus tôt d'une tâche dépend de la date de fin des tâches qui la précèdent. La tâche DÉBUT est initialisée avec une date de début au plus tôt égale à zéro. Cette méthode permet de déterminer la date 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 [2].

► Exemple d'application de la méthode MPM

Soit un projet constitué de six activités dont les noms et les durées sont résumés dans le tableau suivant :

N° d'activité	Description des activités	Prédécesseurs	Durée en jours
1	Installation de chantier	-	61
2	Travaux préparatoire	1	70
3	Terrassement	1,2	240
4	Infrastructure-Assainissement intérieur	2	200
5	Infrastructure-Passage câble électricité	3,4	245
6	Superstructure	4,5	300

TABLE 3.1 – Tableau des activités du projet.

En résolvant par la méthode MPM le problème représenté dans la TABLE 3.1, on obtient le réseau MPM suivant :

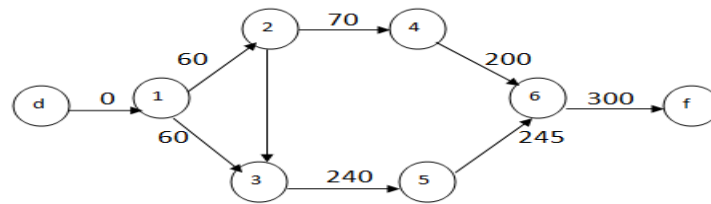


FIGURE 3.1 – Tâches dans le réseau MPM associé au projet.

Le tableau suivant indique les dates 'au plus tôt' et 'au plus tard' de chaque activité.

N° de l'activité	Dates au plus tôt	Dates au plus tard
1	0	0
2	60	245
3	130	130
4	30	450
5	370	370
6	615	615

TABLE 3.2 – Dates 'au plus tôt' et 'au plus tard' des tâches du projet.

3.2.3 La méthode PDM

La méthode des antécédents (Processus Diagram Method (PDM)), est un outil de planification de projets développé en 1964 par H. B. Zachry en coopération avec IBM. Elle consiste à représenter les chevauchements possibles de chaque tâche grâce à quatre liaisons :

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

Exemple :

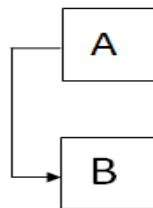


FIGURE 3.2 – Le lien Début-Début.

- **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 dont elle dépend qui est la tâche (A) n'a pas commencé.

Exemple :

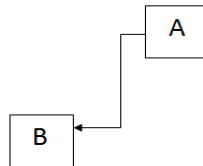


FIGURE 3.3 – Le lien Début-Fin.

- **Le lien Fin-Début** : Pour que la tâche (B) puisse commencer la tâche (A) doit être terminée. La tâche (B) est successeur de la tâche (A).

Exemple :

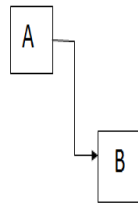


FIGURE 3.4 – Le lien Fin-Début.

- **Le lien fin-fin** : C'est la fin de la tâche (A) qui commande la fin de la tâche (B), c'est-à-dire la tâche (B) ne peut pas se terminer tant que la tâche (A) n'est pas encore terminée.

Exemple :

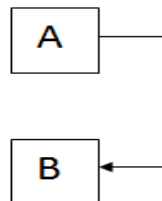


FIGURE 3.5 – Le lien fin-fin.

3.2.4 Méthode PERT

La méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique) s'est développée, parallèlement à la méthode du potentiel, aux Etats-Unis en 1958 pour la planification de la construction de la fusée Polaris. Elle se distingue de la méthode du potentiel par le fait que les tâches ne sont plus associées aux nœuds mais plutôt aux arcs du réseau. Le modèle PERT fait intervenir les étapes du projet et son but principal est l'étude finale de la réalisation. La méthode PERT cherche donc à déterminer la chronologie des tâches dans le temps en déterminant la date de début, la date de fin et les marges de chaque tâche par rapport au projet. Et ceci, en prenant en compte les contraintes de précédences, de délai, et une date au plus tôt et au plus tard de chaque tâche. Ainsi, cette méthode permet d'identifier les tâches critiques ce qui permet donc d'estimer une durée minimale d'un projet.

La méthode PERT s'appuie essentiellement sur la construction du graphe $R = (X, U, D)$ orienté, sans boucles, défini comme suit [18] :

- X : l'ensemble des sommets qui représentent les étapes de la réalisation du projet tels que : $X = \{1, \dots, N\}$;
- U : l'ensemble des arcs qui représentent toutes les tâches du projet ; avec $U = \{(i, j) \in X^2 / i \neq j, i < j\}$, $|U| \leq N - 1$;
- D : l'ensemble des poids des arcs, i.e. $D = \{d_{ij} \in \mathfrak{R}^+, (i, j) \in X^2\}$.

3.2.5 La méthode CPM

Méthode du chemin critique (Critical Path Method (CPM)) est une technique d'analyse d'un réseau d'ordonnement. Elle a été développée par Du Pont Corporation en 1957. Dans la méthode CPM, la planification désire minimiser les coûts de réalisation du projet. Contrairement à la méthode PERT, dans cette méthode, il n'y pas d'incertitude sur les durées des tâches. Cette méthode est utilisée fréquemment pour les projets de construction, dans lesquels plusieurs activités dépendantes les unes des autres peuvent se dérouler en même temps.

3.3 Méthodes de résolution des problèmes d'ordonnement

Les méthodes de résolution des problèmes d'ordonnement se distingue principalement en deux catégories. La première catégorie englobe les méthodes exactes et la seconde englobe les méthodes approchées.

3.3.1 Les méthodes de résolution exactes

les méthodes de résolution exactes permettent d'obtenir une solutions dont l'optimalité est garantie, dans certaines situations. On peut cependant chercher des solutions de bonne qualité, sans garantie d'optimalité, au profit d'un temps de calcul plus réduit. Parmi ces méthodes on trouve :

► Les méthodes de séparation et d'évaluation

ces méthodes consiste à placer progressivement les tâches sur les ressources en explorant un arbre de recherche décrivant toutes les combinaisons possibles. Il s'agit, alors de trouver la meilleure configuration donnée de manière à couper les branches de l'arbre qui conduisent à de mauvaises solutions. Ces méthodes effectuent une recherche complète de l'espace des solutions d'un problème donné, pour trouver la meilleur solution d'entre elles.

► La programmation dynamique

Cette méthode se base sur le principe de Bellman(1954). Elle est destinée à résoudre des problèmes d'optimisation à vocation plus générale que la méthode de séparation et d'évaluation sans pour autant permettre d'aborder des problèmes de tailles importantes.

► La programmation linéaire

Cette méthode permet de modéliser des problèmes dont le critère et les contraintes sont des fonctions linéaires des variables de décision.

3.3.2 Les méthodes approchées

► Les méthodes Heuristiques

Une heuristique désigne un algorithme qui résout un problème d'optimisation donné sans garantie d'optimalité, mais dans des temps de calcul raisonnables. En général, une des difficultés dans un processus heuristique consiste à choisir entre plusieurs solutions. Afin de contourner cette difficulté, une pratique courante est d'utiliser une liste de priorités pour les activités. Cette combinaison renforce donc l'efficacité des heuristiques et se retrouve le plus souvent dans des méthodes de résolution approchées telles les algorithmes de liste. Dans ces méthodes, la liste sert d'élément de base à l'heuristique qui définit alors une solution (un ordonnancement) réalisable [11].

a- Les algorithmes de liste :

Dans le cas de problèmes d'ordonnement NP-difficiles, les algorithmes les plus utilisés sont basés sur les listes. Ils déterminent pour un ordre de tâches donné par une liste, l'ordonnement correspondant. Ils considèrent les tâches une par une et prennent la décision d'ordonner sur la base d'un ordonnancement partiel de tâches ordonnancées auparavant. Les décisions pour les premières tâches affectées restent inchangées. L'ordonnement obtenu est le résultat de l'algorithme de type liste. En général, cet ordonnancement n'est

pas optimal. De telles approches sont aussi appelées règles de priorité statique [13]. Un algorithme de liste se développe en deux étapes :

1. Selon une règle de priorité on calcule, pour chacune des tâches, une valeur mesurant une urgence dans son exécution. Cela permet de construire une liste qui commence par la tâche la plus prioritaire, suivie d'une tâche moins prioritaire et ainsi de suite jusqu'à la tâche la moins prioritaire. En cas d'égalité de priorités, on choisit la tâche arbitrairement.

Règle de priorité : Plusieurs règles de priorité sont définies dans la littérature. Présentons quelques unes d'entre elles :

- Les tâches les plus courtes d'abord (Shortest Processing Time (SPT)) ;
- Les tâches les plus longues d'abord (Longest processing Time (LPT)) ;
- Les tâches avec des dates au plus tard les plus courtes d'abord (SDD)).

On distingue deux algorithmes de liste principaux pour le RCPSP, à savoir :

1. **Un ordonnancement de liste parallèle :** on construit la solution dans un ordre chronologique à partir de la date de début du projet ($t = 0$), et à chaque date, on planifie le maximum d'activités possibles ; puis on passe à la date suivante. La solution obtenue fait partie de l'ensemble des ordonnancements sans-délai qui ne contient pas nécessairement la solution optimale. A l'opposé.
2. **Un ordonnancement de liste en série :** Cet ordonnancement raisonne activité par activité, choisit chaque activité dans l'ordre de la liste de priorité et la planifie au plus tôt compte tenu des tâches déjà ordonnancées. L'ordonnement, ainsi obtenu, appartient à la classe des ordonnancements actifs qui contiennent au moins un ordonnancement optimal.

b-Recherche locale par voisinages :

Il s'agit de méthodes itératives qui, à partir d'une solution initiale calculée par une heuristique, applique à chaque itération une modification locale (opération de déplacement vers un voisin) de la solution courante. L'ensemble des solutions (voisins) pouvant être sélectionnées à partir de la solution courante x est appelé le voisinage de x . Dans ces méthodes, la définition de voisinage est donc une étape importante.

c- Méthode de Burgess-Killebrew :

Cette méthode, dont l'origine remonte à 1962, a été proposée par Burgess-Killebrew pour résoudre le problème de lissage de ressources (Resource Leveling Problem (RLP)) [7]. L'objectif de Burgess-Killebrew est de minimiser la somme des carrés des ressources utilisées. Le principe de cette méthode est présenté dans les étapes suivantes :

- **Étape 1** On positionne toutes les tâches au début au plus tôt sur le diagramme de Gantt et on calcule la somme des carrés des valeurs de la charge dénotée S , dont la valeur est calculée par

$$S = \sum_k^m \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2, \forall t = 1, \dots, T; \forall k = 1, \dots, m.$$

Avec $k = 1, \dots, m$: Ensemble de ressource renouvelable. Et r_{kt} : Capacité de le

ressource k durant la période t .

T : Date limite imposée au projet.

- **Étape 2** En commence par la dernière activité ayant une marge totale non nulle, après on la déplace par une unité de temps vers la fin du projet, puis on recalcule la somme des carrés et on la compare avec la première, si elle est inférieure ou égale, on la fait avancer encore une foie, sinon on revient à l'état initial.
- **Étape 3** Répéter l'étape 1 et 2 jusqu'à ce qu'il n'y ait pas de diminution de la somme des carrés.

Illustrons cette méthode par un exemple de projet qui est constitué de six activités et trois ressources avec un délai de réalisation qui est $T = 9$ mois.

La capacité de chacune de ces ressources est : $R_1 = 13, R_2 = 17, R_3 = 13$. Le tableau suivant indique les dates au plus tôt, les dates au plus tard, les marges libres, les marges totales de chaque activité et les besoins du projet en chaque ressource.

Activité	Durée	Début au plus tôt	Fin au plus tôt	Marge Totale	Marge Libre	Utilisation de R_1	Utilisation de R_2	Utilisation de R_3
1	1	0	1	0	0	6	5	6
2	2	1	3	1	0	6	5	6
3	3	1	4	2	2	4	7	6
4	4	1	5	0	0	6	6	5
5	3	3	6	2	2	2	6	3
6	4	5	9	0	0	4	2	2

TABLE 3.3 – Tableau des Besoins de chaque activité.

Activité	début	fin	durée	mois 1	mois 2	mois 3	mois 4	mois 5	mois 6	mois 7	mois 8	mois 9
1	0	1	1									
2	1	3	2									
3	2	5	3									
4	1	5	4									
5	3	6	3									
6	5	9	4									
utilisation de R1 par mois				6	13	13	12	9	8	4	4	4
utilisation de R2 par mois				5	17	17	19	13	8	2	2	2
utilisation de R3 par mois				6	13	13	14	9	6	2	2	2

FIGURE 3.6 – Représentation des activités et des ressources sur le diagramme de Gantt.

Les activités 1,4,6 sont critiques, alors elles ne doivent pas être déplacées.
 Les activités 2, 3 et 5 sont non critiques, donc on essayera de les déplacées dans la mesure du possible. Ainsi, on calcule la somme des carrées des valeurs des charges :

$$S_1^5 = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=9} r_{kt}^2 = 2619.$$

On déplace l'activité N°5, en la décalant d'un mois, ainsi on recalcule la somme des carrées des valeurs des charges qui est de :

$$S_2^5 = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=9} r_{kt}^2 = 2409.$$

On a $S_2^5 = 2409 < S_1^5 = 2619$, alors on décale l'activité N°5 toujours d'un mois, ainsi pour la tâche N°5 on a : Début=4 et fin=7.

Activité	début	fin	durée	mois 1	mois 2	mois 3	mois 4	mois 5	mois 6	mois 7	mois8	mois 9	
1	0	1	1										
2	1	3	2										
3	2	5	3										
4	1	5	4										
5	4	7	3										
6	5	9	4										
utilisation de R1 par mois					6	13	13	10	9	8	6	4	4
utilisation de R2 par mois					5	17	17	13	13	8	8	2	2
utilisation de R3 par mois					6	13	13	11	9	6	5	2	2

FIGURE 3.7 – Premier déplacement de l'activité N°5.

On décale encore l'activité N°5 d'un mois, on recalcule encore la somme des carrées des valeurs des charges qui est de :

$$S_3^5 = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=9} r_{kt}^2 = 2313.$$

On a $S_3^5 = 2313 < S_2^5 = 2409$, alors on décale l'activité N°5 d'un mois, avec maintenant un Début=5 et une fin=8.

Activité	début	fin	durée	mois 1	mois 2	mois 3	mois 4	mois 5	mois 6	mois 7	mois 8	mois 9
1	0	1	1									
2	1	3	2									
3	2	5	3									
4	1	5	4									
5	5	8	3									
6	5	9	4									
utilisation R1 par mois				6	13	13	10	7	8	6	6	4
utilisation R2 par mois				5	17	17	13	7	8	8	8	2
utilisation de R3 par mois				6	13	13	11	6	6	5	5	2

FIGURE 3.8 – Le second déplacement de l'activité N°5.

On déplace encore l'activité N°5 d'un mois. En recalculant la somme des carrés des valeurs des charges, on retrouve :

$$S_4^5 = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=9} r_{kt}^2 = 2339.$$

On a $S_4^5 = 2339 > S_3^5 = 2313$, alors on arrête le déplacement de l'activité N°5. On passe au test du décalage de la deuxième activité non critique, qui est la N°3, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de

$$S_1^3 = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=9} r_{kt}^2 = 2336.$$

On a $S_1^3 = 2336 > S_4^5 = 2313$, alors on ne doit pas décaler l'activité N°3. On passe au test du décalage de la troisième et dernière activité non critique, qui est la N°2, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de

$$S_1^2 = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=9} r_{kt}^2 = 2313.$$

On a $S_1^2 = 2313 = S_3^5 = 2313$, alors on décale l'activité N°2 d'un mois vers la fin du projet. ainsi, le Début=2 et la fin=4.

Activité	début	fin	durée	mois 1	mois 2	mois 3	mois 4	mois 5	mois 6	mois 7	mois 8	mois 9
1	0	1	1									
2	2	4	2									
3	2	5	3									
4	1	5	4									
5	3	6	3									
6	5	9	4									
utilisation R1 par mois				6	10	13	13	7	8	6	6	4
utilisation R2 par mois				5	13	17	17	7	8	8	8	2
utilisation de R3 par mois				6	11	13	13	6	6	5	5	2

FIGURE 3.9 – Déplacement de l'activité N°2.

On essaiera encore de décaler l'activité N°2 d'un mois vers la fin du projet, ainsi on recalcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_2^2 = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=9} r_{kt}^2 = 2330.$$

On a $S_2^2 = 2330 > S_1^2 = 2313$, alors ne va pas décaler cette activité N°2 vers la fin du projet.

Tous les décalages des tâches non critiques sont étudiés, ainsi d'après la méthode Burgess-Killebrew la somme des carrés des valeurs des charges est de $S = 2313$, alors qu'avant l'application de cette méthode elle valait $S = 2619$, donc méthode nous a permis de diminuer cette somme des carrés d'utilisation des ressources.

► Les méthodes métaheuristiques

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. Elles ne sont pas exactes mais permettent en général d'obtenir des solutions proches de l'optimum [6]. Les métaheuristiques forment un ensemble de méthodes utilisées en recherche opérationnelle pour résoudre des problèmes d'optimisation réputés difficiles. C'est une nouvelle génération de méthodes approchées puissante. On peut distinguer deux grandes approches dans les métaheuristiques :

a) Le recuit simulé (simulated annealing) : La méthode de recuit simulé, appliquée aux problèmes d'optimisation, considère une solution initiale et recherche dans son voisinage une autre solution de façon aléatoire. L'originalité de cette méthode est qu'il est possible de se diriger vers une solution voisine de moins bonne qualité avec une probabilité non nulle. Ce technique permet de sortir des optima locaux. Au début de l'algorithme, un paramètre T , apparenté à la température, est déterminé et décroît tout au long de l'algorithme pour tendre vers 0. La probabilité P d'acceptation des mauvaises solutions dépend de la valeur du paramètre T . Le recuit simulé a été appliqué pour résoudre plusieurs problèmes. Aussi, il existe plusieurs variantes de cette méthode, tel que la diffusion simulé, recuit microcanonique, méthode de seuil, ... etc [11].

b) La recherche Tabou (Tabu Search) :

la recherche tabou se comporte comme toute méthode de voisinage et améliore à chaque étape la valeur objectif. La recherche tabou est une méthode de recherche locale combinée avec un ensemble de techniques permettant d'éviter d'être piégé dans un minimum local ou la répétition d'un cycle. Lorsque l'on atteint par contre un minimum local, on se permis de passer au moins mauvais des voisins. se comporte comme toute méthode de voisinage et améliore à chaque étape la valeur objectif. Le principe de cette méthode d'examiner le voisinage de la solution courante à chaque itération. L'algorithme enregistre la meilleur

solution parmi les voisinage ,même si elle moins bonne que la solution courante .L'acceptation des solution mois performante que la solution courante permet d'éviter de tomber dans optimum local [26]. Pour éviter de tourner dans un cercle enter plusieurs solution ,l'algorithme interdit le passage par des solution récemment visitées.

c) Algorithmes génétique Les algorithmes génétiques fournissent des solutions aux problèmes n'ayant pas de solutions calculables en temps raisonnable de façon analytique ou algorithmique [12]. Ils ont été adaptés à l'optimisation par John Holland [13], également les travaux de David Goldberg ont largement contribué à les enrichir. Selon cette méthode, des milliers de solutions plus ou moins bonnes sont créées au hasard puis sont soumises à un procédé d'évaluation de la pertinence de la solution imitant l'évolution des espèces : les plus "adaptés" , c'est-à-dire les solutions au problème qui sont les plus optimales survivent davantage que celles qui le sont moins et la population évolue par générations successives en croisant les meilleures solutions entre elles et en les faisant muter, puis en relançant ce procédé un certain nombre de fois afin d'essayer de tendre vers la solution optimale [28].

d) Algorithme de colonies de fourmis

Les algorithmes de colonies de fourmis ont été proposés par Colorni, Dorigo et Maniezzo en 1992 [2] et appliquées la première fois au problème du voyageur de commerce. Ce sont des algorithmes itératifs à population où tous les individus partagent un savoir commun qui leur permet d'orienter leurs futurs choix et d'indiquer aux autres individus des choix à suivre ou à éviter[24]. Dans une itération de l'algorithme ACF, chaque fourmi construit une solution d'après des décisions basées sur les quantités de phéromone. Ces traces sont mises à jour en examinant les critères heuristiques des solutions obtenues. Elles sont renforcées pour les décisions ayant donné de meilleures solutions et diminuées pour les autres. On répète cette itération générale jusqu'à la réalisation d'un critère d'arrêt, comme un nombre maximum.Ce mécanisme permet d'améliorer progressivement les solutions au cours des itérations [2].

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement les principales méthodes de modélisation et de résolution des problèmes d'ordonnancement. Ce petit état de l'art sur ce sujet nous permettra de modéliser le problème de l'ordonnancement du projet de rénovation de la base de vie de la station de pompage SP3-OB1 (W. M'Sila) dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Application : Modélisation et résolution du problème d'ordonnancement du projet de la station de pompage SP3-OB1 (W. M'sila)

4.1 Introduction

Le projet de construction pris en charge par l'entreprise RTC-Sonatrach de Béjaïa consiste à réaliser des travaux de la rénovation de la base de vie de SP3-OB1 M'sila, Afin de résoudre le problème qui nous a été posé, on doit d'abord le modéliser. , nous présentons d'abord le modèle mathématique d'ordonnancement du projet Une fois le modèle obtenu, nous passerons à sa résolution avec une des méthodes appropriée de résolution.

4.2 Formulation du problème

Les éléments constructifs de notre modèle sont :

► Notations

- T : le délai du projet à ne pas dépasser.
- t_i : date de début d'exécution de la tâche i .
- $A = \{1, \dots, n\}$: l'ensemble des activités.

- C_{max} : la durée du projet.
- S_i : date ou débute l'activité i .
- P_i : la durée d'exécution de l'activité .
- R_k : le nombre d'unités de ressources renouvelables disponible de type k .
- r_{kt} : capacité de la ressource k durant la période t .
- $K = 1, \dots, m$: dénote l'ensemble des ressources renouvelables.
- $A(t)$: est l'ensemble des activités i en cours d'exécution au temps t .

► Contraintes

- $\sum_{i \in A(t)} r_{ik} \leq R_{kt}, \forall t = 1, \dots, T; \forall k = 1, \dots, m \dots \dots (1)$
- $C_{max} \geq S_i + P_i, \forall i = 1, \dots, n \dots \dots (2)$
- $t_i \geq 0. i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, T \dots (3)$

L'équation (1) signifie qu'à tout instant t et pour toute ressource k , la somme des consommations de la ressource k sur l'ensemble $A(t)$ des activités en cours à l'instant t est inférieure à la capacité R_k .

La contrainte (2) signifie l'achèvement de chaque activité avant la fin du projet.

La contrainte (3) signifie aucune tâche on peut commencer avant le début du projet.

► Fonction objectif

L'objectif est de minimiser la durée du projet i.e. $\min C_{max}$.

► Le modèle mathématique

$$\begin{cases} \min C_{max}, \\ \sum_{i \in A(t)} r_{ik} \leq R_{kt}, \forall k = 1, \dots, m; \forall t = 1, \dots, T. \\ C_{max} \geq S_i + P_i, \forall i = 1, \dots, n. t_i \geq 0, \forall i = 1, \dots, 32. \\ t_i \geq 0, \forall i = 1, \dots, n; \forall t = 1, \dots, T. \end{cases}$$

4.3 Description des Travaux

Les opérations s'effectuant dans le cadre de la rénovation de la base de vie de SP3-OB1 M'sila doivent porter essentiellement sur [10] :

- six (06) villas ;
- Bloc vestiaire ;
- Un(01) complexe restaurant ;
- Un (01) poste transformation de 400 KVA ;
- Un (01) réseau anti-incendie ;
- Un (01) réseau basse tension ;
- Une (01) fausse septique.

4.4 Ressources mises en œuvre

Les ressources mises en œuvre pour la réalisation du projet de rénovation de la station de pompage SP3-ON1 sont de deux natures ; humaines et matérielles.

► Liste des ressources humaines

- 02 soudeurs serruriers.
- 12 coffreurs.
- 9 ferrailleurs.
- 10 maçons.
- 18 manœuvres.
- 3 électriciens.
- 2 plombiers.
- 2 chauffagistes.
- 2 menuisiers.
- 6 étanchéités.
- 8 conducteurs d'engins.
- 3 chauffeurs.
- 4 peintres.

► Liste des ressources matérielles

- 2 bulldozers.
- 2 rétro-chargeurs.
- 1 compacteur.
- 1 dumper.
- 1 grue.
- 1 niveleuse.
- 3 bétonnières.
- 1 nacelle télescopique.

- 2 camions 10T.
- 1 camion 3.5T.

Le projet de rénovation de la base de vie de la station de pompage SP3-OB1 (M'Sila) est constitué des activités dont les noms et les durées sont résumés dans le tableau suivant [10] :

Activité	Description des activités	Prédécesseurs	Durée (en mois)
1	Installation de chantier	-	2
2	Travaux préparatoire	1	3
3	Terrassement	1,2	8
4	Infrastructure-Assainissement intérieur	2	6
5	Infrastructure-Passage câble électricité	3,4	6
6	Superstructure	4,5	10
7	Charpente métallique	6,8	9
8	Maçonnerie	6	20
9	Enduit	8	18
10	Revêtement horizontale + vertical	9,8,19	14
11	étanchéité	7	3
12	Menuiserie aluminium+ bois	8	1
13	Menuiserie métallique	8,9	1
14	Table de travail pour cuisine	8	2
15	équipement de cuisine	23	1
16	équipement sport	23	1
17	Mobilier	23	1
18	électricité-Mise à la terre	5	17
19	Câblerie	10	6
20	Plomberie sanitaire	10	17
21	Ventilation	8,19	2
22	Matériel d'extinction incendie	23	2
23	Peinture	9,12,13,28,32	14
24	Climatisation	8,9,12	4
25	Chauffage central	8,9,12	5
26	équipement chaudière	25	2
27	VRD-terrassement	23	3
28	VRD-Voirie et parking	29,30,31	2
29	VRD-Réseau anti incendie	27	4
30	VRD-Réseau au gaz	27	3
31	VRD-Eclairage extérieur	8	2
32	Box de détente	8	4

TABLE 4.1 – Tableau des activités du projet.

L'entreprise de réalisation doit utiliser des ressources (moyens humains et matériels) pour l'exécution des activités du projet. Les ressources et leurs capacités sont mentionnées dans le tableau suivant [10] :

Ressource	Ressource	Nombre
R_1	Soudeur serruriers	2
R_2	Coffreurs	12
R_3	Ferrailleurs	9
R_4	Maçons	10
R_5	Manoeuvres	18
R_6	électriciens	3
R_7	Plombier	2
R_8	Chauffagiste	2
R_9	Menuisiers	2
R_{10}	Etanchéié	6
R_{11}	Conducteurs d'engins	8
R_{12}	Chauffeurs	3
R_{13}	Boulldozer	2
R_{14}	Rétro-chargeurs	2
R_{15}	Compacteur	1
R_{16}	Dumper	1
R_{17}	Grue	1
R_{18}	Nivelleuse	1
R_{19}	Bétonnières	3
R_{20}	nacelle télescopique	1
R_{21}	Camions 10T	2
R_{22}	Camions 3.5T	1
R_{23}	Peintre	4

TABLE 4.2 – Tableau des disponibilités des ressources.

Les ressources nécessaires pour la réalisation de chaque tâche sont résumées dans le tableau suivant :

N°	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w
1	0	0	0	10	18	0	0	0	0	0	8	3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
2	0	0	9	0	14	0	0	0	0	0	6	2	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	1	1	2	1	0	0	1	0	0	2	0	0
4	0	5	4	1	2	0	0	0	0	0	2	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0
5	0	5	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0
6	0	5	5	2	2	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
7	2	0	0	0	2	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
8	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	2	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
13	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
14	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
16	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
17	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
19	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4
24	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
25	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
26	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
27	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0
28	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	2	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
29	0	0	0	3	2	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
30	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
32	0	0	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLE 4.3 – Matrices des besoins en ressources.

4.5 Modélisation du problème sans contraintes de ressources avec la méthode MPM38

► Les colonnes de ce tableau notées avec les lettres alphabétiques représentent respectivement les 23 ressources R_k , avec $k = 1, \dots, 23$.

4.5 Modélisation du problème sans contraintes de ressources avec la méthode MPM

Nous allons modéliser le problème par la méthode MPM, pour obtenir la durée de réalisation du projet.

Le tableau suivant représente les dates au plus tôt et les dates au plus tard des activités.

4.5 Modélisation du problème sans contraintes de ressources avec la méthode MPM39

Activité	Dates au plus tôt	Dates au plus tard
1	0	0
2	2	2
3	5	5
4	5	13
5	13	13
6	19	19
7	29	86
8	29	29
9	49	4
10	67	67
11	38	95
12	49	86
13	67	82
14	49	97
15	82	98
16	82	98
17	82	95
18	19	82
19	81	91
20	81	81
21	87	97
22	82	97
23	68	83
24	67	96
25	81	92
26	86	97
27	82	90
28	89	97
29	85	93
30	82	98
31	85	95
32	49	79

TABLE 4.4 – Tableau des différentes dates au plus tôt et au plus tard des activités.

Selon le réseau MPM obtenu (voir FIG. 4.5), la durée de réalisation du projet est de 99 mois, i.e. $C_{max} = 99$ mois. L'objectif de l'entreprise étant de réduire la durée de ce projet, nous allons appliquer le chevauchement d'activités.

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités⁴⁰

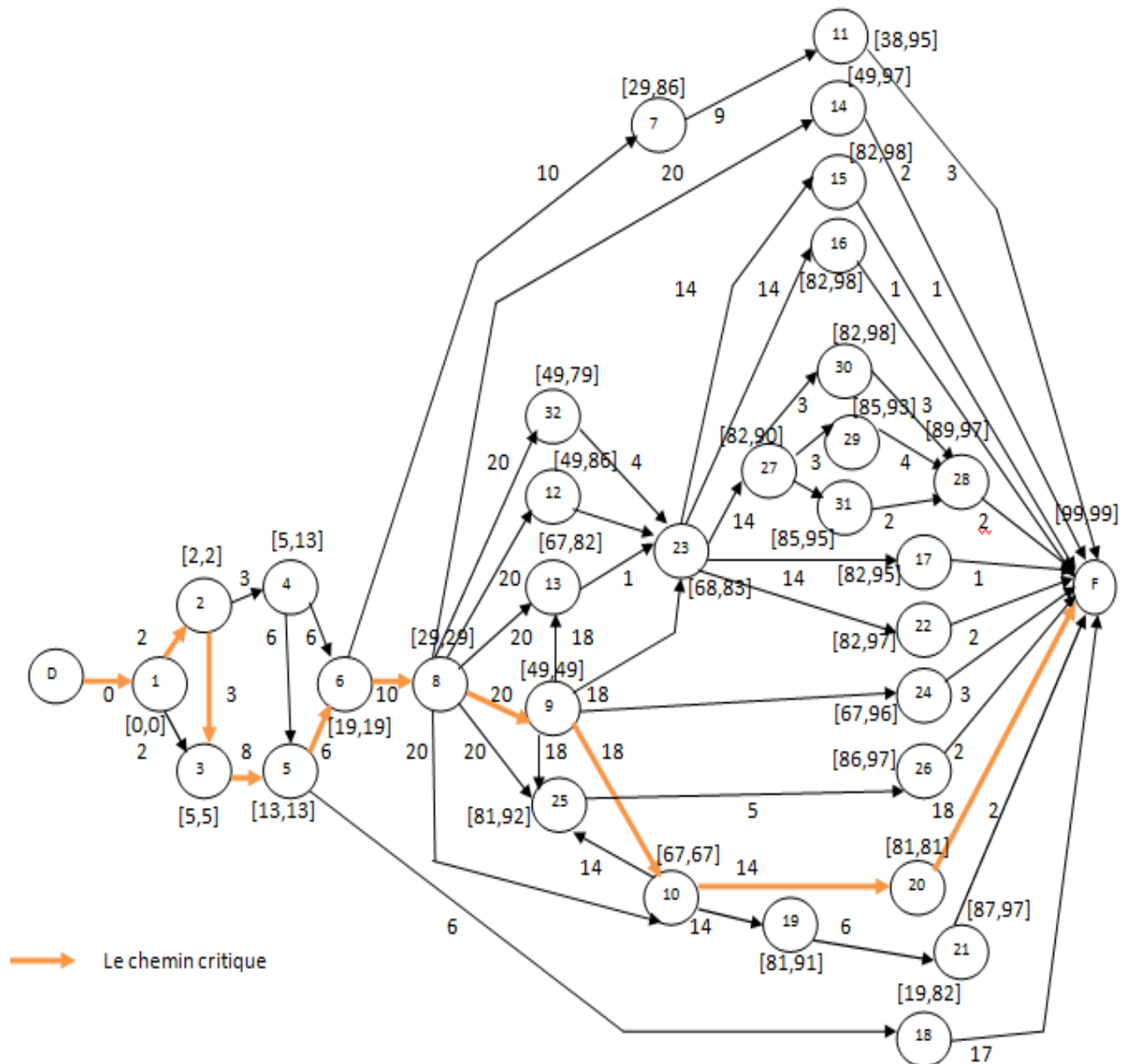


FIGURE 4.1 – Le réseau MPM associé au projet.

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités

L'entreprise souhaite trouver une durée de 30 mois, alors il faut réduire la durée qu'on a trouvée précédemment avec la méthode MPM. Et pour ce faire nous allons exploiter la possibilité de chevauchement d'activités.

Nous allons d'abord présenter les activités du projet sur le diagramme de GANTT suivant :

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités⁴¹



FIGURE 4.2 – Diagramme de GANTT.

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités⁴²

Après l'application du chevauchement les antériorités ont changées, alors les dates au plus tôt et les dates au plus tard sont changées, donc le chemin critique qui relie les tâches dont les dates au plus tôt sont égales aux dates au plus tard se change.

Le tableau suivant représente les dates au plus tôt et les dates au plus tard obtenues.

Activité	Durées	Début au plus tôt	Fin au plus tôt(mois)	Début au plus tard(mois)	Fin au plus tard	Marge Totale
1	2	0	2	0	2	0
2	3	2	5	2	5	0
3	8	3	11	22	30	19
4	6	5	11	24	30	19
5	9	7	13	7	13	0
6	10	9	19	20	30	11
7	9	21	30	21	30	0
8	10	5	25	5	25	0
9	18	8	26	8	26	0
10	14	9	23	16	30	7
11	3	10	13	27	30	17
12	1	13	14	13	14	0
13	1	14	15	29	30	15
14	2	14	16	14	16	0
15	1	20	21	27	28	7
16	1	21	22	28	29	7
17	1	22	23	29	30	7
18	17	6	23	13	30	7
19	6	15	21	24	30	9
20	18	12	30	12	30	0
21	2	20	22	28	30	4
22	2	18	20	28	30	8
23	14	16	30	16	30	0
24	4	26	30	26	30	0
25	5	25	30	25	30	0
26	2	28	30	28	30	0
27	3	26	29	27	30	1
28	2	28	30	28	30	0
29	4	26	30	26	30	0
30	2	27	30	28	30	0
31	2	25	27	28	30	3
32	4	26	30	24	30	0

TABLE 4.5 – Tableau des différentes dates au plus tôt et au plus tard.

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités 44

On remarque que le chevauchement permet d'accélérer l'exécution du projet, mais comprend des risques de surcharge des ressources. En effet, d'après la figure FIG.4.3, on remarque une surcharge au niveau des ressources R_2, R_3, R_5 et R_6 . Pour remédier à ce problème de surcharge des ressources, nous allons effectuer le "Nivellement des ressources", c'est-à-dire reculer certaines tâches afin que les ressources (personnels ou matériels) soient disponibles. Les pointes de surcharge seront alors "lissées".

Le "lissage des ressources" sert à répartir la charge du travail de chaque ressource dans le temps sans rallonger la durée du projet. Pour traiter cette problématique nous avons fait appel à une heuristique qui est la méthode de Burgess et Killebrew.

4.6.1 Application de la méthode de Burgess-Killebrew

Après l'application de l'algorithme de Burgess-Killebrew sous MATLAB on obtient :

On calcule la somme des carrés des valeurs des charges :

$$S = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12793.$$

Les activités critique sont : 1,2,5,7,8,9,11,12,14,20,23,24,25,26,28,29,30,32, Alors ne doivent pas être déplacé. Les activités 3,4,6,10,13,15,16,17,18,19,21,22,27 et 31 sont non critiques, donc on essaiera de les déplacées dans la mesure possible. Ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges :

On déplace l'activité $N^{\circ}31$, en la décalant d'un mois, ainsi on recalcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{31} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12802.$$

$S_1^{31} = 12802 > S = 12793$, on remarque que la somme des carrés des charges augmente, donc on déplacé pas l'activité 31.

On passe au test du décalage de la deuxième activité non critique, qui est la $N^{\circ}27$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{27} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12799.$$

$S_1^{27} = 12799 > S = 12793$, entraîne une augmentation de la valeurs de la sommes des carrés des charges ,alors l'activité 27 ne doit pas être déplacé.

On passe au test du décalage de la troisième activité non critique, qui est la $N^{\circ}22$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{22} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12831.$$

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités 45

$S_1^{22} = 12831 > S = 12793$, la sommes des carrés des charge augmente alors l'activité 22 ne doit pas être déplacé.

On passe au test du décalage de la quatrième activité non critique, qui est la N°21, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{21} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12750.$$

$S_1^{21} = 12750 < S = 12793$, alors on déplace l'activité 21 d'une unité du temps vers la fin du projet.

donc : le Début=22 et la fin=23.

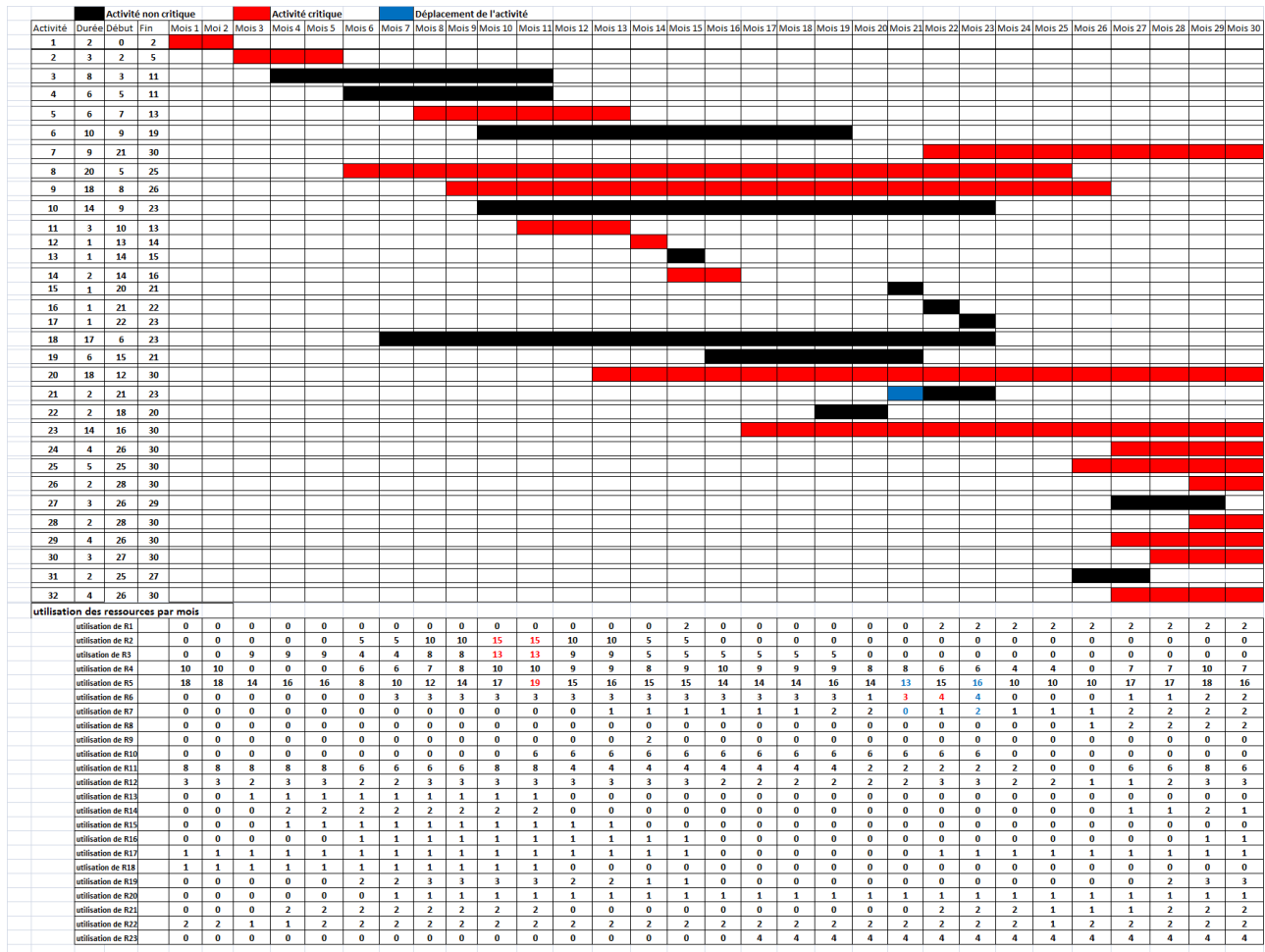


FIGURE 4.4 – Représentation des activités et des ressources après le premier déplacement.

On déplace encore l'activité N°21 d'un mois. En recalculant la somme des carrés des valeurs

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités46

des charges, on retrouve :

$$S_2^{21} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12733.$$

$S_2^{21} = 12733 < S_1^{21} = 12750$, alors on déplace l'activité 21 d'une unité du temps vers la fin du projet.

donc : le Début=23 et la fin=25.

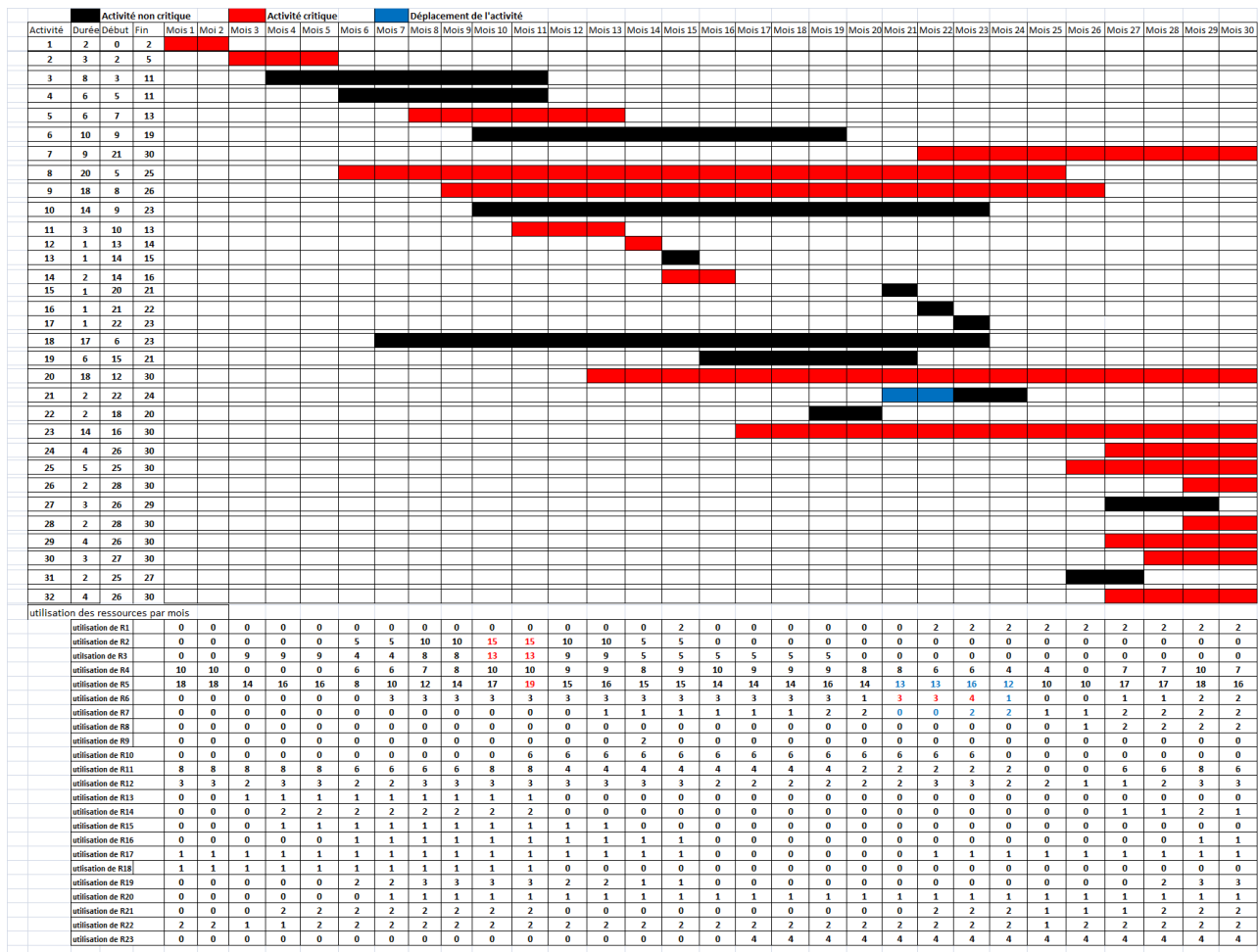


FIGURE 4.5 – Représentation des activités et les ressources après le deuxième décalage.

On déplace encore l'activité N°21 d'un mois. En recalculant la somme des carrés des valeurs des charges, on retrouve :

$$S_3^{21} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12682.$$

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités

$S_3^{21} = 12682 < S_2^{21} = 12733$, alors on déplace l'activité 21 d'une unité du temps vers la fin du projet.
 donc : le Début=24 et la fin=26.

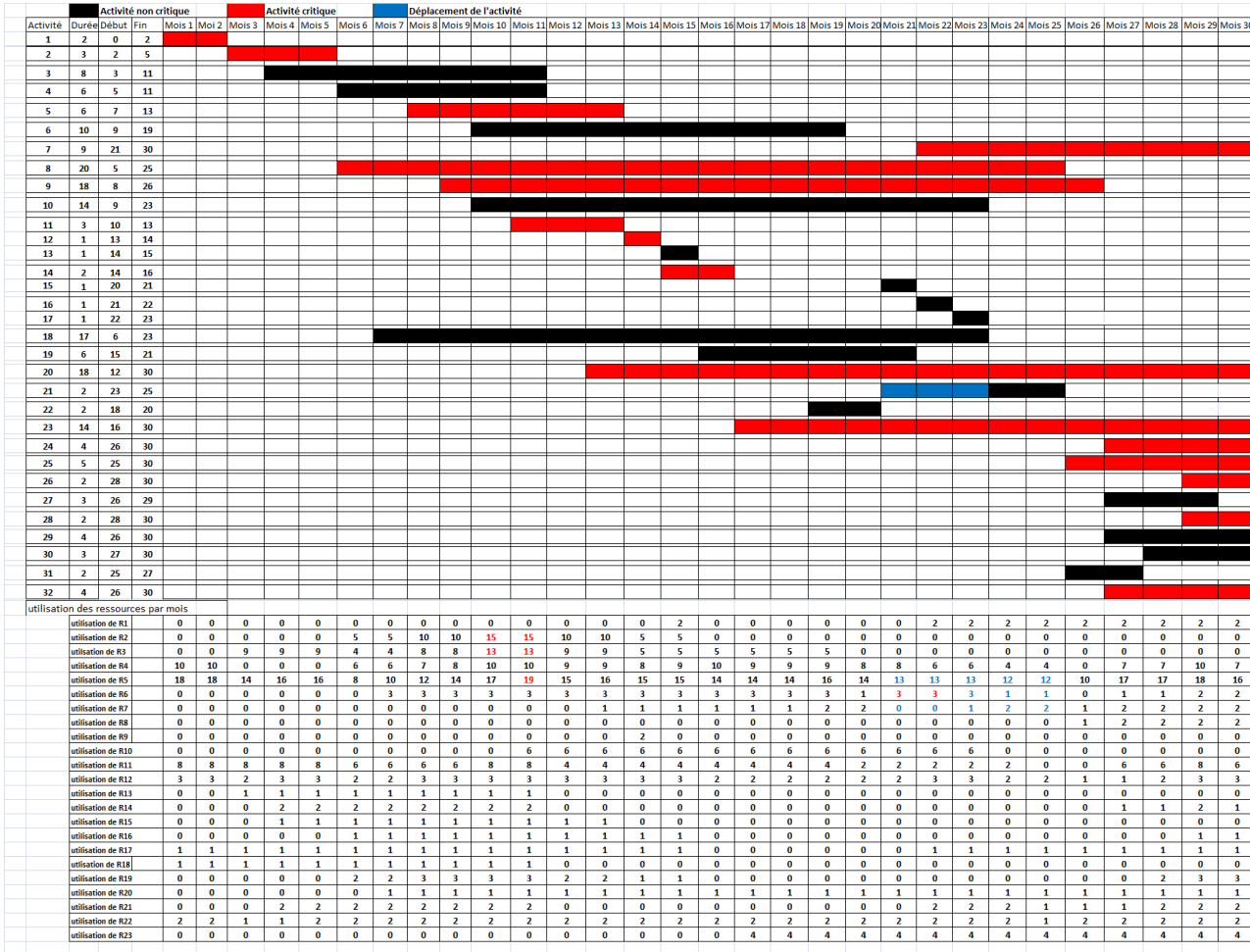


FIGURE 4.6 – Représentation des activités et les ressources après le troisième décalage de l'activité 21.

On déplace encore l'activité 21 d'une unité du temps vers la fin du projet et on recalcule la somme des carrés on obtient :

$$S_4^{21} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12682.$$

$S_4^{21} = S_3^{21} = 12682 = 12682$, alors on déplace l'activité 21 d'une unité du temps vers la fin

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités48

du projet.

donc : le Début=25 et la fin=27.

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités49

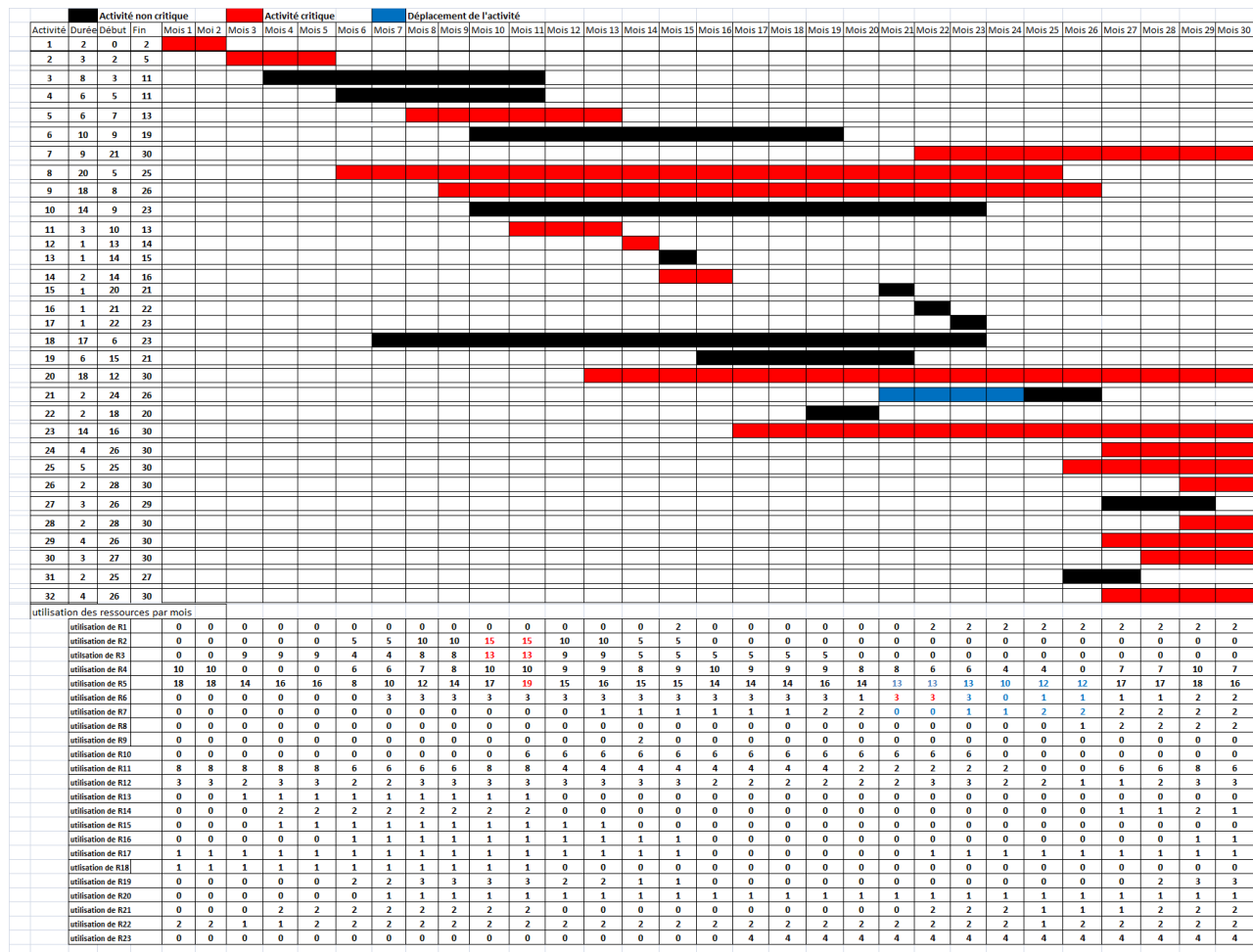


FIGURE 4.7 – Représentation des activités et les ressources après décalage de l’activité 21.

On déplace encore l’activité 21 d’une unité du temps vers la fin du projet et on recalcule la somme des carrés on obtient :

$$S_5^{21} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12827.$$

$S_5^{21} = 12827 > S_4^{21} = 12682$, alors ne doit pas déplacé l’activité 21, donc on arrête de déplacer l’activité 21.

On passe au test du décalage de la cinquième activité non critique, qui est la $N^{\circ}19$, d’un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{19} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12675.$$

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités 50

$S_1^{19} = 12675 < S_4^{21} = 12682$, alors on déplace l'activité 19 d'une unité du temps vers la fin du projet.

On déplace encore l'activité non critique 19 d'une unité du temps vers la fin du projet et on recalcule la somme des carrés on obtient :

$$S_2^{19} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12669.$$

$S_2^{19} = 12669 < S_1^{19} = 12675$, alors on déplace l'activité 19 d'une unité du temps vers la fin du projet.

On déplace encore l'activité non critique 19 d'une unité du temps vers la fin du projet et on recalcule la somme des carrés on obtient :

$$S_3^{19} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12657.$$

$S_3^{19} = 12657 < S_{11}^2 = 12669$, alors on déplace l'activité 19 d'une unité du temps vers la fin du projet.

On déplace encore l'activité non critique 19 d'une unité du temps vers la fin du projet et on recalcule la somme des carrés on obtient :

$$S_4^{19} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12654.$$

$S_4^{19} = 12654 < S_3^{19} = 12657$, alors on déplace l'activité 19 d'une unité du temps vers la fin du projet.

On déplace encore l'activité non critique 19 d'une unité du temps vers la fin du projet et on recalcule la somme des carrés on obtient :

$$S_5^{19} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12654.$$

$S_5^{19} = 12654 = S_4^{19} = 12654$, alors on déplace l'activité 19 d'une unité du temps vers la fin du projet.

On déplace encore l'activité non critique 19 d'une unité du temps vers la fin du projet et on recalcule la somme des carrés on obtient :

$$S_6^{19} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12648.$$

$S_6^{19} = 12648 < S_5^{19} = 12654$, alors on déplace l'activité 19 d'une unité du temps vers la fin du projet.

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités⁵¹

On déplace encore l'activité non critique 19 d'une unité du temps vers la fin du projet et on recalcule la somme des carrés on obtient :

$$S_7^{19} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12673.$$

$S_7^{19} = 12673 > S_6^{19} = 12648$, donc on arrête de déplacer pas l'activité 19.
 donc : le Début=22 et la fin=28.

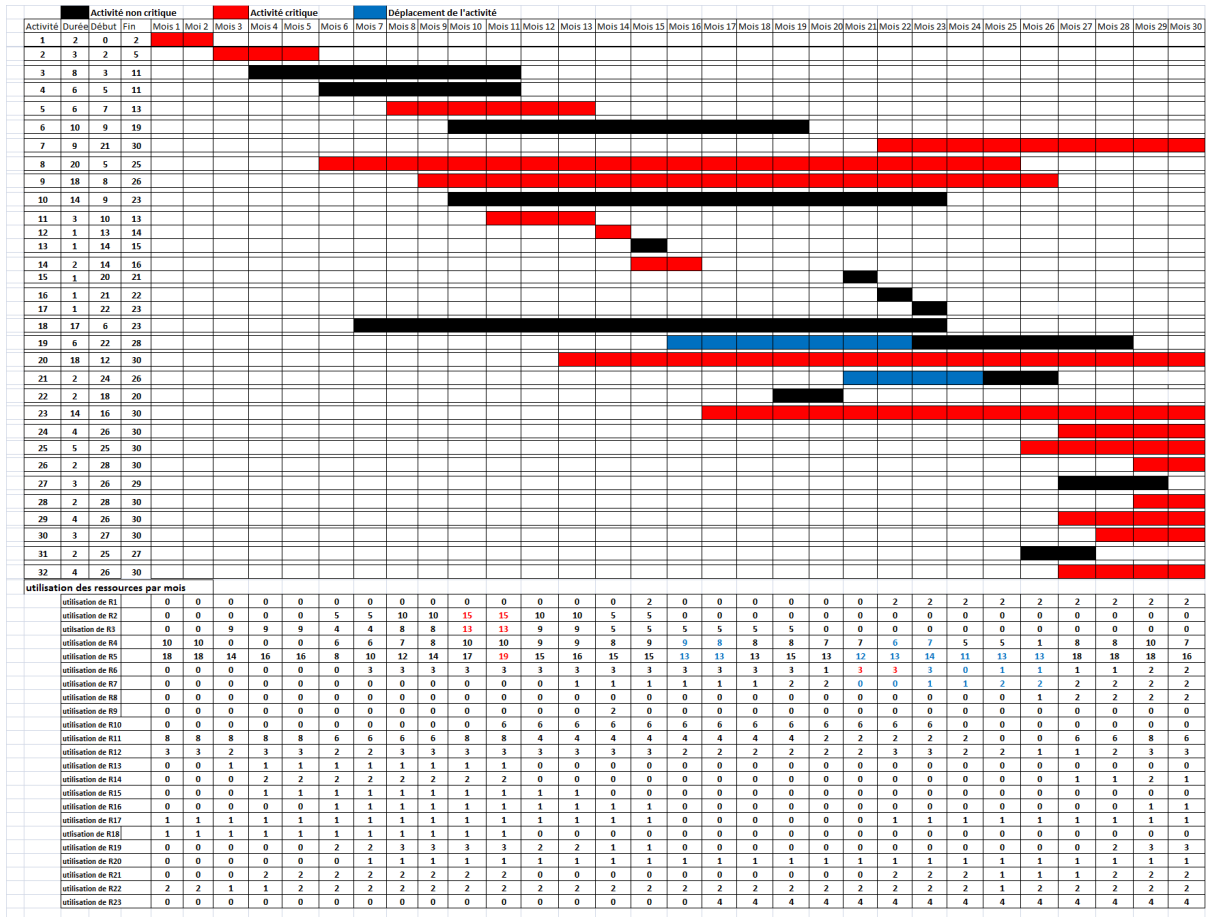


FIGURE 4.8 – Représentation des activités et les ressources après le septième de l'activité 19.

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités 52

On passe au test du décalage de la sixième activité non critique, qui est la $N^{\circ}18$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrées des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{18} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12680.$$

$S_1^{18} = 12680 > S_6^{19} = 12648$, alors l'activité 18 ne doit pas être déplacé.

On passe au test du décalage de la septième activité non critique, qui est la $N^{\circ}17$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrées des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{17} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12664.$$

$S_1^{17} = 12664 > S_6^{19} = 12648$, alors ne doit pas déplacé l'activité 17.

On passe au test du décalage de la huitième activité non critique, qui est la $N^{\circ}16$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrées des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{16} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12672.$$

$S_1^{16} = 12668 > S_6^{19} = 12648$, donc l'activité 16 ne doit pas être déplacé.

On passe au test du décalage de la neuvième activité non critique, qui est la $N^{\circ}15$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{15} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12661.$$

$S_1^{15} = 12661 > S_6^{19} = 12648$, alors l'activité 15 ne doit pas déplacé.

On passe au test du décalage de la dixième activité non critique, qui est la $N^{\circ}13$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{13} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12654.$$

$S_1^{13} = 12654 > S_6^{19} = 12648$, alors l'activité 13 ne doit pas être déplacé.

On passe au test du décalage de la onzième activité non critique, qui est la $N^{\circ}10$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^{10} = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12653.$$

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités 53

$S_1^{10} = 12653 > S_6^{19} = 12648$, alors l'activité 10 ne doit pas être déplacé.

On passe au test du décalage de la douzième activité non critique, qui est la $N^{\circ}6$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^6 = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12634.$$

$S_1^6 = 12634 < S_6^{19} = 12648$, alors on déplace l'activité 6 d'une unité du temps vers la fin du projet.

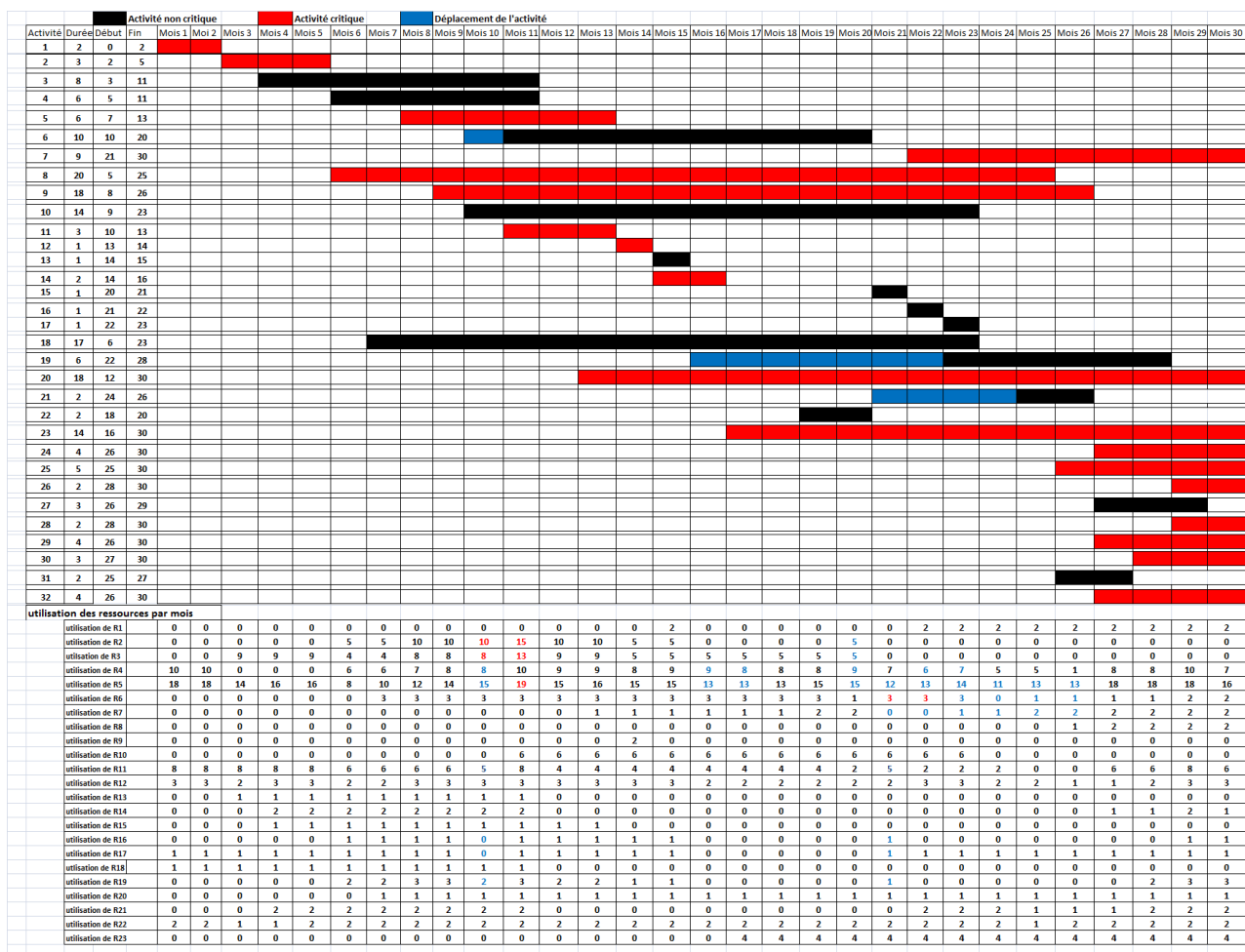


FIGURE 4.9 – Représentation des activités et les ressources après le premier décalage de l'activité 6.

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités⁵⁴

On déplace encore l'activité 6 d'une unité du temps vers la fin du projet et on recalcule la somme des carrés on obtient :

$$S_2^6 = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12211.$$

$S_2^6 = 12211 < S_1^6 = 12634$, alors on déplace l'activité 6 d'une unité du temps vers la fin du projet.

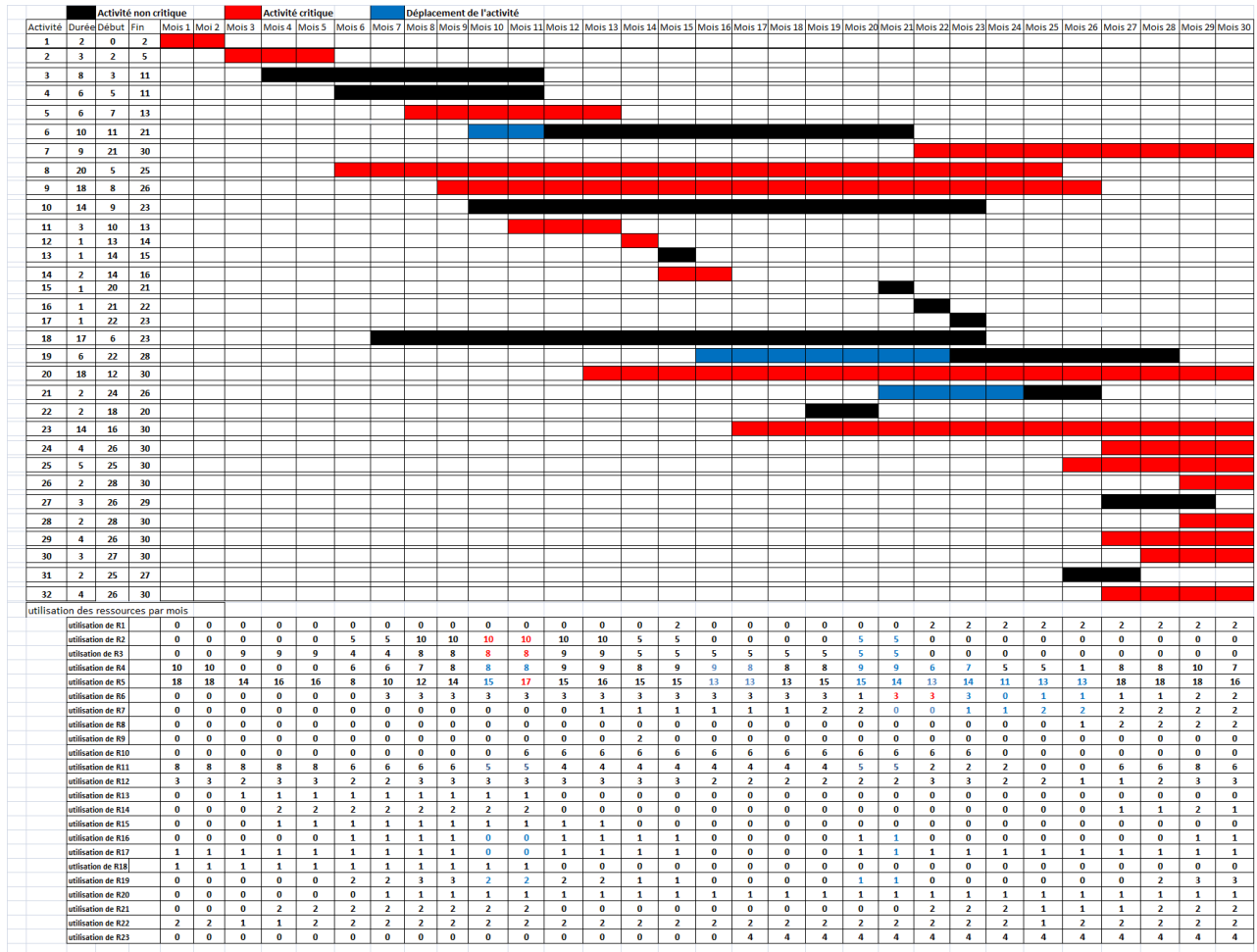


FIGURE 4.10 – Représentation des activités et ressources après le second décalage de l'activité 6.

4.6 Modélisation du problème en prenant en compte le chevauchement des activités 55

On déplace encore l'activité 6 d'une unité du temps vers la fin du projet et on recalcule la somme des carrés on obtient :

$$S_3^6 = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12240.$$

$S_3^6 = 12240 > S_2^6 = 12211$, alors l'activité 6 ne doit pas être déplacé.
donc : le Début=11 et la fin=21.

On passe au test du décalage de la treizième activité non critique, qui est la $N^{\circ}4$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^4 = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12222.$$

$S_1^4 = 12222 > S_2^4 = 12211$, alors l'activité 4 ne doit pas être déplacé.

On passe au test du décalage de la quatorzième activité non critique, qui est la $N^{\circ}3$, d'un mois, ainsi, on calcule la somme des carrés des valeurs des charges qui est de :

$$S_1^3 = \sum_{k=1}^{m=23} \sum_{t=1}^{t=T} r_{kt}^2 = 12232.$$

$S_1^3 = 12632 > S_2^3 = 12211$, alors l'activité 3 ne doit pas être déplacée.

4.6.2 Interprétation des résultats

Après avoir utilisé la technique de chevauchement entre les activités, on remarque une surcharge au niveau des ressources :

- ▷ Le nombre de ressources R_6 (électricien), est augmenté d'une unité (quatre électriciens), sachant qu'au départ il y'avait que trois. Après le lissage, nous avons décalé l'activité 21 de trois mois vers la droite du diagramme de GANTT , ainsi la surcharge est éliminée.
- ▷ Le nombre de ressources R_5 (manœuvre) a dépassé sa capacité qui est de (18), après le lissage nous avons décalé l'activité 6 de deux mois vers la droite du diagramme de GANTT, la surcharge est ainsi éliminée.
- ▷ La même chose pour les ressources R_3 (ferrailleur) et R_2 (coffreur), après le lissage les surcharges sont éliminées.

Avec cette approche qu'on a proposée, nous avons pu réussir à :

- ▷ Réduire la durée du projet à 30 mois, alors qu'elle était à 99 mois avant d'exploiter le chevauchement des activités, tout ceci, en minimisant la somme des carrés des charges. En effet, au début la fonction objectif S valait 12793, à la fin de notre application elle ne vaut que $S = 12211$.

- ▷ Éliminer la sur charge des ressources (coffreur, ferrailleur, manoeuvre et électricien) sans dépasser la capacité des autres ressources.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, en premier lieu, le modèle mathématique du problème d'ordonnancement du projet qu'on a étudié. En second lieu, nous avons résolu le problème avec les approches de résolution appropriées. Nous avons pu en résumé réduire la durée du projet à 30 mois tout en éliminant la sur charge de quelques ressources sans dépasser la capacité des autres ressources. C'est à dire on a pu répondre aux attentes de l'entreprise qui a exigé cette durée de 30 mois pour la durée du projet.

Conclusion Générale

Dans ce travail nous nous sommes intéressées à résoudre le problème d'ordonnancement du projet de rénovation de la base de vie de la station de pompage SP3-OB1 (M'Sila). Ainsi après avoir défini les équations mathématiques qui résument les contraintes des ressources et de chevauchement d'activités, on est passées à la résolution du problème. en effet, dans un premier temps, nous avons centré notre étude sur la modélisation du problème pour estimer la durée d'achèvement du projet avec la méthode PERT. Avec cette méthode on a pu estimer cette durée à 99 mois, ce qui est une très longue qui ne répond pas aux exigences de l'entreprise. Afin de minimiser cette durée, nous avons dû exploiter le chevauchement entre les activités. Cependant, le chevauchement même si il diminue la durée du projet, mais en parallèle il entraîne une sur utilisation des ressources. Pour répondre simultanément à ces deux critères qui sont : la minimisation de la durée du projet et la sur charge des ressources, nous avons dû faire appel à l'heuristique de Burgess et Killebrew. Avec cette heuristique les conflits des charges de travail ont pu être évité. Globalement, l'application de cette méthode, nous a permis de réduire la durée du projet et de régler le problème de surcharge.

On a pu grâce à la technique de chevauchement des activités réduire la durée du projet cependant ceci a induit le problème de surcharge des ressources. On aurait aimé réduire plus la durée du projet en faisant appel aux techniques d'accélération de projets existantes dans la littérature cependant celles-ci exigent beaucoup plus de ressources (ce qui augmente bien sur les coûts du projet), alors que les ressources de l'entreprise sont limitées d'avance.

Bibliographie

- [1] M. Aloulou, Introduction aux problème d'ordonnancement, université Paris Dauphine, Novembre 2005.
- [2] B. Baki, Planification et ordonnancement probabilistes sous contraintes temporelles, Thèse de doctorat, Université de CAEN/BASSE-NORMANDIE U.F.R, Novembre 2006.
- [3] J. Balzwick, Sheduling subject to resuorce constrained : Classification and complixity, Thèse de doctorat, 1983.
- [4] El-M Bennacer, Approche d'élaboration d'une base de données pour l'estimation des montants des projets, Mémoire de fin de formation au niveau du département travaux neufs, entreprise RTC Sonatrach de Béjaia, 2017.
- [5] K.Brinkmann and K.Neumann, Heuristic procedures for ressource-constrained project scheduling with minimal and maximal time lags : the ressource-levlling and minimum project-duration problems, Journal of Decision Systems 5(1996) 129-156.
- [6] A.Burgess and J.Killebrew, Variation in activity level on a cyclic arrow diagram, Journal of Industrial Engineering 13 (1962) 76-83.
- [7] L.ChenguUng, Thesis a multi-ressource leveling algorithm for project networks, Naval Postgraduate School Monterey, California, 1975.
- [8] D. Dewalf, Économie et Gestion de l'environnement et du Développement Durable, université du littoral cote d'opale, Dunkerque, Janvier 2007.
- [9] C. Gray. Management de projets. Dunkerque, paris, Janvier 2007.
- [10] Dossier d'appel d'offres, Rénovation de la base de vie de la station de pompage SP3-OB1(W.M'SILA), A.O.N n° 03/2015.
- [11] S. M. Douiri, S. Elbernoussi, H Lakhbab, Cours des Méthodes de Résolution Exactes Heuristiques et Métaheuristiques, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat Laboratoire de Recherche Mathématiques, Informatique et Applications, 2008.
- [12] SCMC, La société des comptables en management du Ganada (19950) "L'entreprise virtuelle : une rélité?". <http://stategis.gc.ca>, 1999.
- [13] D. E. Goldberg, Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [14] C. Gray, Managment de projets, Ellipses Ed. paris. Janvier 2007.
- [15] K. Kadiri, partie 2, planification du projet, Notes de cours, ENSA Tétouan, 2012.
- [16] O.Kone. Nouvelles approches pour la résolution du problème d'ordonnancement de projet à moyens limités. Thèse de Doctorat, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.

-
- [17] A. Letouzey, Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs : Applications à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, Thèse de doctorat, 2001.
- [18] J. Lissague. Qu'est-ce que Le PERT ? DUNOD, France, Paris, 1988.
- [19] M. Nassereddine, Algorithmes de construction de graphes dans les problèmes d'ordonnancement de projet, Thèse de doctorat, Université Farhat abbas-setif, 2011.
- [20] K. Neumann, J. Zimmermann, Project Scheduling with Time Windows and Scarce Resources, Springer, Berlin, 2003.
- [21] T. H. Nguyen, Contribution à La Planification de projet : Proposition d'un modèle d'évaluation des scénarios de risque-projet, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, septembre 2011.
- [22] J.L. Ponz-Tiendda, Victor Yeps, Eugenio Pellicer, Joaquin Moreno-Flores, The Resource Leveling Problem with multiple resources using an adaptive genetic algorithm, journal home page, Automation in Construction 29 (2013) 161-172.
- [23] B.R et M. Dibon, l'ordonnancement par la méthode des potentiels le programme CONCORD, Automatisme, pages 1-11, février 1966.
- [24] Y. H Song, H.L Kwang, Y. Lee, and I.K. Yu, Fundamentals of ant colony search algorithms, Modern Heuristic Optimisation Techniques. Theory and Application to Power Systems; IEEE PRESS, 2008.
- [25] El-D Talbi, Sélection et réglage de paramètres pour l'optimisation de logiciels d'ordonnancement industriel, Thèse de doctorat, École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, France, 2004.
- [26] W. Tfaili, thèse de doctorat de l'université Paris 12-val de Marne UFR de Science de l'ingénieur, 2007.
- [27] J. Turner, Towards a theory of project management : the functions of project management, International Journal of Project Management 24 (3) (2006) 187-189.
- [28] K. Zidi, Système interactif d'aide au déplacement multimodel, Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille, France, 2006.

Résumé

Ce mémoire propose une application de résolution du problème d'ordonnancement du projet de rénovation de la base de vie de la station de pompage SP3-OB1 (M'Sila). En effet, premièrement, dans l'application on a donné lieu à la modélisation mathématique du problème. deuxièmement, on a évalué la durée du projet avec la méthode MPM à 99 mois. Comme cette durée du projet ne répond pas aux exigences de l'entreprise, on a fait appel à la technique de chevauchement des activités pour réduire cette durée. en exploitant ce chevauchement d'activités, on a pu réduire cette durée à 30 mois, mais avec une augmentation de la capacité des ressources or cette dernière a été limité par l'entreprise. Ainsi, pour remédier à cette limitation, on a fait appel à l'heuristique de Burgess-Killebrew.

Mots clés : Ordonnancement, Projet, Chevauchement d'activité, Lissage de ressources, Surcharge.

Abstract

This thesis proposes an application to solve the problem of scheduling the project of the renovate the base of life of pumping station SP3-OB1 (M'Sila). Firstly, in this application, we given the mathematical modeling of the problem. secondly, using the MPM method, the duration of the project was evaluated to 99-months. As this project duration does not meet the requirements of the company, the overlap technique was used to reduce this duration. using this overlap technique, it has been possible to reduce this duration to 30 months, but with an capacity increasing of the resources, however the ressources are limited by the company. Thus, to remedy this limitation, we used Burgess-Killebrew's heuristic.

Keywords : Scheduling, Project, Resource liveling, Activity Overlapping, Over load.