

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderahmane Mira de Béjaïa  
Faculté des Sciences Exactes  
Département de Recherche Opérationnelle

---



Mémoire Présenté

Pour L'Obtention du Diplôme de Master

En Recherche Opérationnelle

Option : Modélisation Mathématique et Évaluation des Performances des Réseaux

Par : ZAIDI Narimene et SAIDI Fahima

**Optimisation des Ressources dans un Problème  
d'Ordonnancement de Projet avec  
Chevauchement de Tâches**

Soutenu à Béjaïa , devant le jury composé de :

M <sup>me</sup> K. BOUCHAMA	M.A. classe/ A	Présidente	Université de Bejaia.
M <sup>r</sup> L. ASLI	M.A. classe/ A	Encadreur	Université de Bejaia
M <sup>r</sup> H. AIT IDIR	Ingénieur Planning	Co-Encadreur	RTC. Sonatrach de Béjaïa.
M <sup>r</sup> A. LAOUER	M.A. classe/ A	Examineur	Université de Bejaia.
M <sup>r</sup> M. SOUFIT	Doctorant	Examineur	Université de Bejaia.

**Année Universitaire 2017 – 2018**

# *Remerciements*

Ce mémoire marque une étape très importante dans notre vie, couronnant nos années d'études universitaires. Nous voudrions remercier ici les personnes qui nous ont accompagnés au cours de notre parcours.

Tout d'abord, nous remercions "Dieu" le Tout Puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience pour faire aboutir ce travail.

Nous tenons particulièrement à remercier très chaleureusement notre encadreur Mr. L.ASLI, et notre co-encadreur Mr. H. AIT IDIR, nous avons pu profiter de leurs connaissances scientifiques, de leurs orientations, du soutien moral et intellectuel qu'ils nous ont apporté. Ils nous ont permis de bénéficier de leurs encadrements, les précieux conseils qu'ils nous ont prodigués, la patience et la confiance qu'ils nous ont témoignés. Ces deux personnes ont été déterminantes dans la réalisation de notre travail de recherche.

Nous tenons également à remercier vivement les membres du jury :

◇ M<sup>me</sup> K. BOUCHAMA : pour l'honneur qu'elle nous a faite en acceptant de présider ce jury et de juger ce travail.

◇ M<sup>r</sup> A. LAOUER et M<sup>r</sup> M. SOUFIT : pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis tout particulièrement KHIROUNE Mouhamed Lamine, qui nous ont toujours soutenue et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans une pensée pour nos parents, nos sœurs et nos frères. Merci de nous avoir encouragées et soutenues tout au long de ces années et de nous avoir permis de mener à bien nos études.

## *Dédicaces*

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Je dédie ce travail :

**A** mes chers parents, en qui j'ai puisé tout le courage, la volonté et la confiance, je leurs serai éternellement reconnaissante, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Que ce travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices ;

**A** ma chère sœur Kenza et mes chers frères Zahir, Khaled et sa femme Sonia ;

**A** mes cousines, cousins, tantes et oncles ;

**A** toute la famille ZAIDI ;

**A** ma Nini qui me tient toujours compagnie ;

**A** ma binôme Fahima ;

**A** mes très chères amies : Hinane, Lydia, Ryma, Damya, Amina, Imene, Merieme ;

**A** tous mes amis : Yanis, Amine, Yacine, Midou, Karim ;

**A** tous ceux qui me connaissent et qui me sont chers dans ma vie, et à tous les étudiants de RO.

*Narimene.*

## *Dédicaces*

Je dédie ce travail :

**A** mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leur prières tous au long de mes études.

**A** mes chères frères et sœurs : Amine, Boubaker, Ahlem, Asma, Nadjah.

**A** toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

**A** ma chère binôme : Narimene.

**A** mes amis : Mouhamed Lamine, Karim, Safi Eddine, pour leurs appui et leurs encouragements.

**A** mes chères amies : Milan, Warda, Kamilia, Sabira, Lamia, yasmine.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible.

Merci d'être toujours là pour moi.

*Fahima.*

# Table des matières

Liste des figures . . . . .	vii
Liste des tables . . . . .	viii
<i>Introduction Générale</i> . . . . .	<b>1</b>
<b>1 Présentation de l'organisme d'accueil (SONATRACH-RTC de Béjaia)</b> . . . . .	<b>4</b>
Introduction . . . . .	4
1.1 SONATRACH, historique et missions . . . . .	5
1.2 Situation géographique et organisation de la RTC Béjaia . . . . .	6
1.3 Régions de transport par canalisation et stations de pompage . . . . .	6
1.4 Missions et activités principales de SONATRACH-RTC . . . . .	8
1.5 Les structures de RTC . . . . .	9
1.5.1 Présentation de la structure d'accueil (TNF) . . . . .	10
1.6 Position du problème . . . . .	11
<b>2 L'ordonnancement dans la gestion de projet</b> . . . . .	<b>13</b>
Introduction . . . . .	13
2.1 Optimisation combinatoire . . . . .	14
2.2 Définition du projet . . . . .	14
2.2.1 Cycle de vie d'un projet . . . . .	14
2.2.2 Les objectifs d'un projet . . . . .	15
2.2.3 Management de projet . . . . .	16
2.2.4 Étapes de réalisation d'un projet . . . . .	17
2.2.5 Structure de découpage de projet (Work Breakdown Structure (WBS)) . . . . .	18
2.3 Problème d'ordonnancement de projet . . . . .	19
2.3.1 Données d'un problème d'ordonnancement . . . . .	19
2.3.2 Tâche / Activité : . . . . .	19
2.3.3 Contraintes : . . . . .	20
2.3.4 Définition de l'ordonnancement . . . . .	21
2.3.5 Objectif de l'ordonnancement . . . . .	21
2.3.6 Classification des problèmes d'ordonnancement . . . . .	21
2.4 Quelques concepts de la théorie des graphes . . . . .	22
2.4.1 Définition d'un graphe . . . . .	22
2.4.2 Date au plus tôt . . . . .	22

---

2.4.3	Date au plus tard	22
2.4.4	Tâche critique	22
2.4.5	Chemin critique	23
2.4.6	Marges	23
2.5	Ordonnancement de projets sous contraintes de ressources	23
2.5.1	Définition du problème d'ordonnancement sous contrainte de ressources (RCPSP)	23
2.5.2	Chevauchement entre activités	24
2.5.3	Problème d'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités	24
2.6	Techniques d'ordonnancement	25
2.6.1	Le diagramme de GANTT	25
2.6.2	La méthode du Potentiel-Metra MPM	25
2.6.3	La méthode PDM (Processus Diagram Method)	26
2.6.4	La méthode PERT	26
2.6.5	La méthode CPM (Critical Path Method)	27
2.7	Méthodes de résolution du problème RCPSP	27
2.7.1	Les méthodes exactes	27
2.7.2	Les méthodes approchées	28
2.7.3	Conclusion	30
<b>3</b>	<b>Modélisation et approche de résolution</b>	<b>31</b>
	Introduction	31
3.1	Présentation du projet et objectif de l'entreprise	32
3.2	Modélisation du problème	32
3.2.1	Données du problème :	32
3.2.2	Modèle mathématique	35
3.3	Méthodologie de résolution	36
3.3.1	Nivellement des ressources	36
3.3.2	Lissage des ressources	37
3.3.3	Recuit simulé	37
3.3.4	Illustration par le problème du voyageur de commerce :	41
3.3.5	Etat de l'art sur le recuit simulé :	44
	Conclusion	45
<b>4</b>	<b>Cas d'étude (Aménagement divers de la station de pompage de Beni-Mansour SBM-DOG1 (W. Bouira))</b>	<b>46</b>
	Introduction	46
4.1	Description des travaux	47
4.2	Collecte des données	48
4.3	L'éclatement des activités	49
4.4	Réseau PERT	50
4.5	Ressources mises en oeuvre	52

---

4.5.1	Affectation des ressources aux tâches . . . . .	53
4.6	Adaptation de l'algorithme du recuit simulé au problème d'ordonancement	54
4.6.1	Ensemble des tâches chevauchées . . . . .	55
4.6.2	Influence des paramètres . . . . .	56
4.6.3	Paramétrage et résultats obtenus par l'algorithme du Recuit simulé	57
4.6.4	Interpretation des résultats . . . . .	58
	Conclusion . . . . .	59
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>60</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>61</b>
	<b>Annexe</b>	<b>66</b>

# Table des figures

1.1	Branches transport par canalisation de RTC	7
1.2	Carte du réseau de transport RTC.	8
1.3	Organigramme de la RTC.	9
1.4	Organigramme de la structure d'accueil(TNF).	10
2.1	Cycle de vie d'un projet.	15
2.2	Le triangle d'or.	16
2.3	Structure de découpage d'un projet (WBS).	18
2.4	Caractéristiques d'une tâche $i$ .	20
2.5	Chevauchement entre activités.	24
3.1	Représentation des différentes configurations d'énergie.	38
3.2	Organigramme basique de l'algorithme de recuit simulé.	41
3.3	Ensemble de villes (noeuds) reliés entre eux par des routes (arcs).	42
3.4	Une première solution (parcours suivant l'ordre des villes).	42
3.5	Le résultat donné par l'algorithme glouton (se décaler d'un sommet vers son plus proche voisin).	42
3.6	Le résultat obtenu en échangeant les sommets 2 et 3.	42
3.7	Le résultat obtenu en échangeant les sommets 5 et 2.	43
3.8	les résultats obtenus dans l'exemple.	43
4.1	Diagramme de Gantt.	49
4.2	Réseau PERT.	51
4.3	Diagramme de la ressource plombier avant et après résolution.	66
4.4	Diagramme de la ressource maçon avant et après résolution.	67
4.5	Diagramme de la ressource manoeuvre avant et après résolution.	67
4.6	Organigramme du recuit simulé	68



## Liste des tableaux

4.1	Tableau des activités du projet. . . . .	48
4.2	Tableau des activités du projet. . . . .	50
4.3	Tableau des ressources et leurs capacités. . . . .	52
4.4	Capacités des ressources nécessaires pour chaque activité. . . . .	53
4.5	Dates de début au plus tôt et au plus tards de toutes les tâches du projet. . . . .	55
4.6	Les tâches chevauchables. . . . .	56
4.7	Valeurs des paramètres testés. . . . .	57
4.8	Le calendrier d'exécution des tâches obtenu par le recuit simulé. . . . .	58

# Introduction Générale

L'OPTIMISATION est une discipline de la Recherche Opérationnelle en plein essor qui est l'une des parties intégrantes dans beaucoup de domaines applicatifs, tel que la conception de circuits électroniques, la biologie, mais aussi présente un outil de réponse aux besoins croissants des secteurs économiques et industriels (maximisation des performances, minimisation des coûts, et autres).

Dans la vie, l'être humain est quotidiennement confronté à différents problèmes que ce soit au niveau personnel ou professionnel, il se trouve donc dans l'embaras du choix de la meilleure solution qui règlera à la fois tous ses problèmes. C'est à partir de l'année 1950 que les chercheurs ont développés plusieurs techniques pour aider le décideur à prendre de bonnes décisions. Les problèmes d'optimisation sont inspirés des travaux réalisés dans la science du management [46].

Selon les dirigeants des entreprises et les experts du monde des affaires, la gestion du projet apparait comme la tendance de l'avenir, car elle fournit un ensemble d'outils efficaces qui permettent aux gestionnaires d'améliorer leurs capacités de planifier, de mettre en oeuvre et de gérer des activités en vue d'atteindre des objectifs organisationnels précis.

Le calendrier d'activités est l'un des éléments les plus importants du coffre à outils du gestionnaire de projet. Toutefois, la gestion de projets constitue plus qu'un simple ensemble d'outils, il s'agit d'un style de gestion par objectifs, qui accorde beaucoup d'importance à l'établissement de relations de collaboration entre des employés aux fonctions et aux personnalités différentes et de coordonner leurs efforts collectifs afin d'obtenir le meilleur profit [12].

Dans la gestion de projets, il est important de bien distinguer entre l'ordonnancement et la planification. En effet, la planification vise à déterminer les différentes opérations à réaliser et les moyens matériels et humains à y affecter, alors que l'ordonnancement consiste à organiser l'exécution d'un ensemble d'activités soumises à des contraintes de temps et/ou de ressources. L'un des plus célèbres problèmes de cette catégorie est l'ordonnancement de projet à ressources limités ou RCPSP (Ressource-Constrained Project Scheduling Problem), qui par définition, est un problème d'ordonnancement situé au coeur de la gestion de projet, et à ce titre possède des applications industrielles directes, notamment dans les secteurs de la construction et des services.

Ces problèmes 'RCPSP' consistent à ordonnancer 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 précédence et d'utilisation des ressources [28].

De nombreuses extensions du RCPSP ont été traitées dans la littérature [54][4]. Depuis la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, différentes techniques ont été développées dans le but de réduire la durée de résolution. Ces techniques incluent la compression, la substitution et le chevauchement des activités des projets.

La résolution de ce type de problème d'optimisation a déjà fait l'objet de nombreuses études [20][52]. Les travaux visant à résoudre ce problème portent sur les méthodes de résolution exactes et méthodes approchées. Ces travaux s'appuient sur des outils théoriques divers, comme la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE), la programmation par contraintes, les heuristiques et métaheuristiques, et les méthodes exactes. En dépit de tous les travaux effectués pour la résolution de ces problèmes, il n'existe pas de méthodes exactes permettant de résoudre systématiquement des instances de plus de soixante activités [3].

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, en autorisant l'activité en aval à débiter avant la fin de l'activité en amont à partir des informations préliminaires [16]. Cela consiste en l'allocation des ressources financières, humaines et matérielles, de manière à atteindre des objectifs bien précis, à savoir une bonne gestion des ressources limitées pour la réalisation du projet dans le délais fixé.

Ce mémoire est structuré de la façon suivante :

- Après une introduction générale mettant l'accent sur la thématique traitée ;
- Un premier chapitre sera consacré à la présentation générale de la RTC-SONATRACH de Bejaia, notamment du département travaux neufs (TNF) où nous avons effectué notre stage, ainsi qu'à la position du problème auquel les dirigeants du département TNF sont confrontés.
- Le second chapitre traite les notions de bases de la gestion de projet, et des problèmes d'ordonnancement, ainsi que les différents outils d'ordonnancement et méthodes de résolution du RCPSP d'une manière générale.
- Dans le troisième chapitre sera présentée la modélisation du problème étudié ; le modèle issu reflètera au mieux la situation réelle rencontrée par l'entreprise, ainsi qu'une présentation détaillée sur la métaheuristique utilisée, à savoir " le recuit si-

mulé ” dont un état de l’art est consacré à la fin du chapitre.

- Le quatrième chapitre est consacré à la résolution du problème, et à l’interprétation des résultats.
- Notre travail s’achèvera par une conclusion générale où des perspectives de recherches issues de cette étude seront proposées.

# 1

## Présentation de l'organisme d'accueil (SONATRACH-RTC de Béjaïa)

SONATRACH est la compagnie nationale algérienne de recherche, d'exploitation, de transport par canalisations, de transformation et de commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. 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. Compagnie pétrolière intégrée, elle est un acteur majeur dans le domaine du pétrole et du gaz. Elle est présente dans plusieurs projets avec différents partenaires en Afrique, en Amérique Latine et en Europe.

SONATRACH s'est adaptée au nouvel environnement économique mondial en diversifiant ses activités. Elle a, par conséquent, investi d'autres créneaux économiques notamment la génération électrique, l'eau, le transport aérien et maritime.

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>1.1 SONATRACH, historique et missions</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>1.2 Situation géographique et organisation de la RTC Béjaïa</b> . .	<b>6</b>
<b>1.3 Régions de transport par canalisation et stations de pompage</b>	<b>6</b>
<b>1.4 Missions et activités principales de SONATRACH-RTC</b> . . .	<b>8</b>
<b>1.5 Les structures de RTC</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>1.6 Position du problème</b> . . . . .	<b>11</b>

Dans ce chapitre nous allons faire une présentation générale de l'entreprise RTC-Sonatrach, notamment le département TNF, où nous avons effectué notre stage, et on terminera par la formulation de la problématique issue de ce dernier.



## 1.1 SONATRACH, historique et missions

L'entreprise SONATRACH (SOciété Nationale de TRANsport et la Commercialisation des Hydrocarbures) a été créée par le décret N : 63/491 du 31/12/1963. 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.

Le 24/02/1971, l'Algérie a décidé d'étendre la nationalisation à tous les secteurs des hydrocarbures. Ce qui a conduit à une restructuration et à une réorganisation efficace qui a donné naissance à 18 filiales à savoir NAFTAL, ENEP, ENTP, etc.

SONATRACH est la première société du continent africain, elle est classée 11<sup>ème</sup> parmi les compagnies pétrolières mondiales, 2<sup>ème</sup> exportateur de Gaz Natinal Liquéfié (GNL) et 3<sup>ème</sup> exportateur de gaz naturel. Sa production globale (tous produits confondus) est de 2002 millions de tonnes. elle est leader à l'échelle africaine, avec 32,8 milliards de dollars de chiffre d'affaires dégagé en 2004. Ses activités constituent environ 30% du Produit National Brut (PNB) de l'Algérie et emploie environ 120000 personnes dans l'ensemble du groupe.

En 1985, SONATRACH s'est focalisé sur ses métiers(branches) de base à savoir :

- La recherche et l'exploitation ;
- La production ;
- L'exploitation ;
- La liquéfaction et la transformation ;

- La commercialisation ;
- Le transport.

Le but recherché par la restructuration et la réorganisation est la décentralisation des pouvoirs, c'est-à-dire l'adoption d'un système qui permet d'évoluer vers un schéma de groupe en constituant des branches d'activités autonomes et leur filiation. L'activité Transport est confiée à la branche Transport par Canalisation (TRC) dont la mission principale est d'assurer le transport des hydrocarbures par pipe-line.

## 1.2 Situation géographique et organisation de la RTC Béjaia

La RTC Bejaia se situe à 2Km au nord-ouest, au niveau l'arrière port, à l'entrée de la ville de Bejaia.

La Région Transport Centre est constituée d'un Port Pétrolier et d'un Terminal Arrivée comportant 02 parcs de stockage. La RTC est confiée à la branche de transport par canalisation (pipeline) des hydrocarbures, le développement, la gestion de la maintenance d'un réseau de 2 pipe-lines en exploitation, ainsi que les installations suivantes :

- 04 Stations de Pompage et une Station de Compression en exploitation.
- 16 bacs de stockages en exploitation.

## 1.3 Régions de transport par canalisation et stations de pompage

Après la nationalisation du secteur des hydrocarbures en 1971, d'autres pipe-lines ont été réalisés par SONATRACH à travers le territoire national d'où la naissance des directions régionales dédiées au transport des hydrocarbures.

La société pétrolière de gérance (SOPEG) est devenue depuis, la Direction Régionale de Bejaia (DRG.B), elle-même devenue Région Transporte Centre (RTC).

Ainsi sept régions de l'activité transport par canalisation, ont été créées à savoir :

1. Région transport Centre - Bejaia (RTC) ;
2. Région transport de Haoued El-Hamra(RTH) ;
3. Région transport d'In amenas (RTI) ;
4. Région transport Est-Skikda (RTE) ;
5. Région transport Ouest Arzew (RTO) ;
6. Gazoduc Maroc/Espagne (GEM) ;
7. Gazoduc Tunisie/Italie (GPDF).

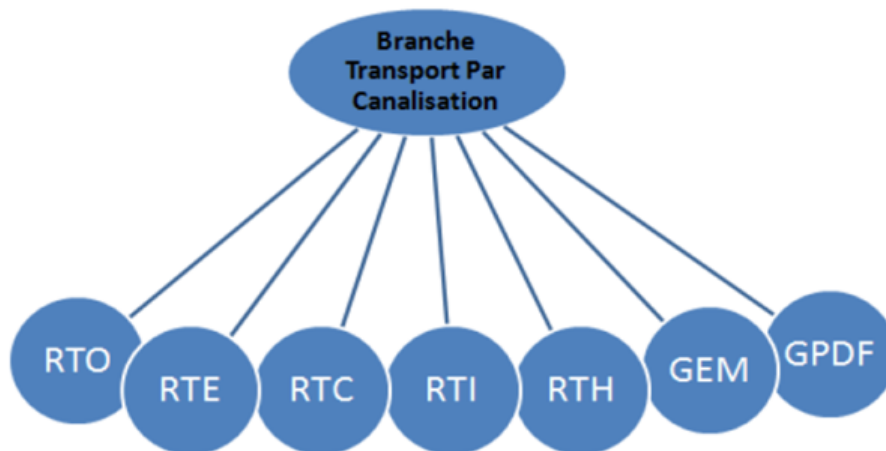


FIGURE 1.1 – Branches transport par canalisation de RTC

**L'oléoduc Haoued El Hamra-Bejaia (OB1) :** Réalisé en 1959 par SOPEG, est le premier pipe-line qu'a connu l'Algérie. Il est d'une longueur de Six cent soixante-huit (668) Kilomètres et d'un diamètre de vingt-quatre (24) pouces, avec une capacité de transport de dix-sept (17) millions de tonnes par an de pétrole brut et condensat vers le Terminal Marin de Bejaia.

Pour assurer le débit voulu, plusieurs stations de pompage intermédiaires ont été réalisées et sont énumérées ci-dessous :

- SPA :** Station satellite (Touggourt) ;
- SP1 BIS :** Station de pompage n°1 à Djemaa (El Oued) ;
- SPB :** Station satellite Biskra ;
- SP2 :** Station de pompage n°2 à Biskra ;
- SPC :** Station satellite (M'Sila) ;
- SBM :** Station de pompage Béni Mansour ;
- TRA :** Terminal raffinerie d'Alger ;
- TMA :** Terminal marin de Béjaia.

**Gazoduc Hassi R'mel-Bordj Menaiel (GG1) :** Ce gazoduc alimente en gaz naturel, depuis 1981, toutes les villes et pôles industriels du centre du pays avec une quantité de sept(07) milliards de mètre-cube (m<sup>3</sup>) par an. Le gazoduc prend sa source à partir du champ de Hassi R'mel pour aboutir au Terminal de Bordj Ménaiel.

**Oléoduc Béni Mansour-Sidi Arcine (OG1) :** Cet oléoduc d'une longueur de cent trente (130) Kilomètres et d'un diamètre de seize (16) pouces, a été réalisé en 1970 à partir de la Station de Pompage de Beni Mansour. Il sert à alimenter la raffinerie d'Alger, située à Sidi-Arsine (Berraki), en pétrole brut.



Suite à la vétusté de l'oléoduc OG1 et dans le but d'assurer une alimentation optimale de la raffinerie d'Alger, Sonatrach a procédé à son remplacement, par un autre Oléoduc, (DOG1) de vingt (20) pouces en 2005.

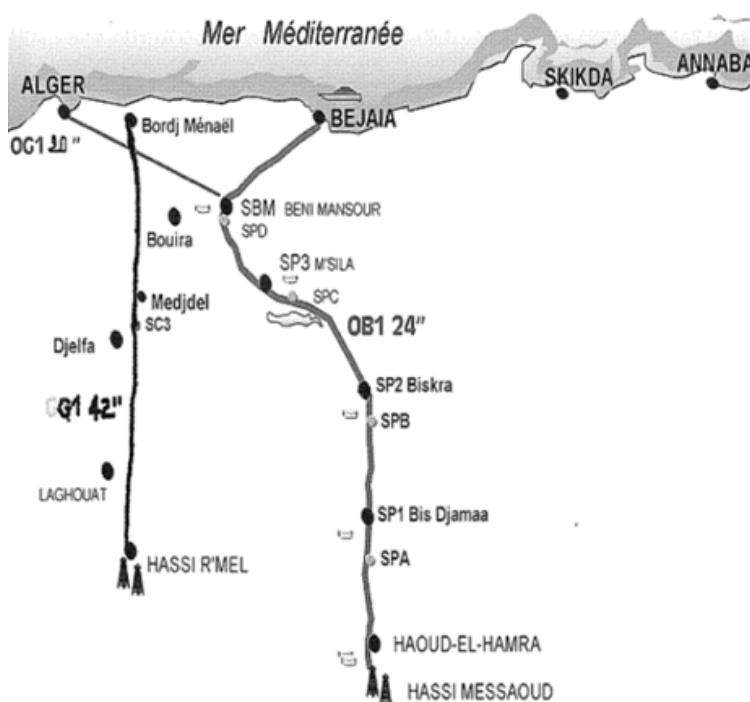


FIGURE 1.2 – Carte du réseau de transport RTC.

## 1.4 Missions et activités principales de SONATRACH-RTC

La Région Transport Centre de Bejaïa est l'une des sept (07) régions de la division Exploitation. La mission de la RTC est de gérer les trois ouvrages énoncés précédemment à savoir :

- Le gazoduc HassiR'mel- Bordj Menaiel (GG1) ;
- L'oléoduc Haoud El Hamra - Bejaia (OB1) ;
- L'oléoduc Béni Mansour - Sidi Arcine / Alger (DOG1).

Pour maintenir ces ouvrages en bon état de fonctionnement, la RTC assure les opérations de :

- Maintenance et de la protection des installations ;
- Conception et de la réalisation de nouveaux projets ;
- Réalisation des travaux de mise à jour et de rénovation ;
- Entretien préventif ;

– Entretien curatif.

## 1.5 Les structures de RTC

Les différentes structures de la RTC sont présentées dans le nouvel organigramme (fait en 2017) défini ci-dessous :

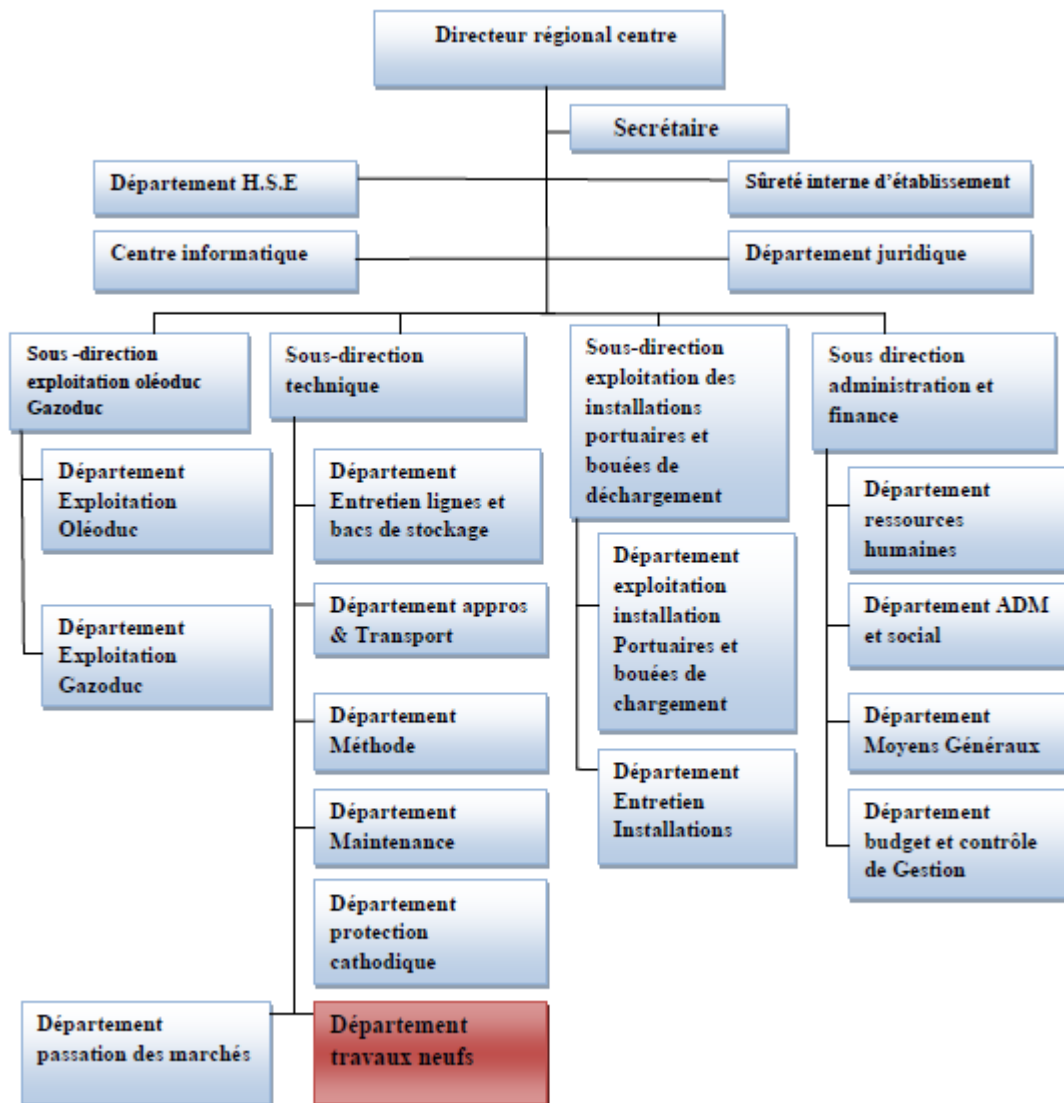


FIGURE 1.3 – Organigramme de la RTC.

### 1.5.1 Présentation de la structure d'accueil (TNF)

**Département Travaux Neufs (TNF) :** Ce département est chargé des études de l'assistance technique et de suivi des réalisations 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 (80%) pour cent du budget global de la région. Ce département est actuellement structuré comme suit :

- Service études industrielles ;
- Service technique et suivi des réalisations ;
- Section archivage et documentation.

Notre travail est en relation directe avec les activités de ce département. L'organigramme du département TNF est représenté ci-dessous :

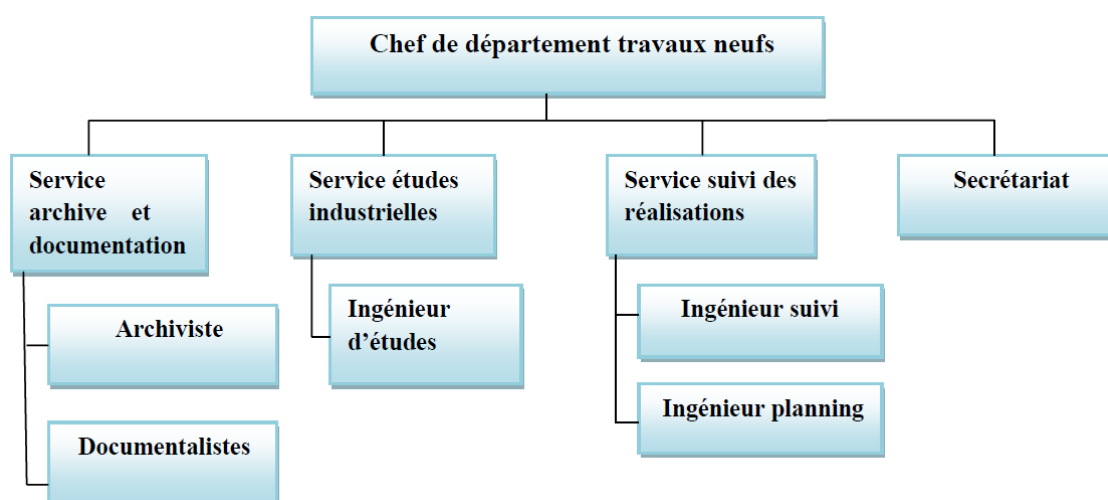


FIGURE 1.4 – Organigramme de la structure d'accueil(TNF).

**Secrétariat :** S'occupe de la communication et diffusion de l'information, ainsi que l'élaboration de la correspondance et le traitement du courrier et documents.

**Service études Industrielles :** Il est composé actuellement d'ingénieurs études et d'une section archive et documentation. Les ingénieurs d'études ont la charge de préparer les dossiers d'appels d'offres "DAO" pour les projets inscrits au budget de la RTC. Une fois l'appel d'offre aboutis dans le respect stricte de la procédure de passation des marchés de SONATRACH, le service technique et suivi de réalisation prend le relai pour la concrétisation du projet.

**Service technique et Suivi des réalisations :** Ce service est composé d'ingénieurs de suivi et d'un ingénieur planning et ordonnancement. Les ingénieurs suivi sont chargés

du suivi des projets dans tous ses volets (juridiques, techniques et financier) et veillent au respect des clauses contractuelles. Ils sont chargés, de ce fait, de rédiger des comptes rendus (reporting) de suivi et en remettre mensuellement. L'ingénieur planning et ordonnancement est chargé du contrôle des attachements des travaux et la vérification des factures et leurs conformités concernant tous les projets gérés par le département, ainsi que l'établissement des différents rapports mensuels d'activités du département.

C'est au niveau du département travaux neufs que nous avons effectué notre stage, sous la direction d'un ingénieur planning et ordonnancement.

## 1.6 Position du problème

Le développement constant induit sans cesse l'entreprise SONATRACH, et particulièrement le département travaux neufs(TNF) à la réalisation de nouveaux projets. Ce dernier se voit donc souvent confronté aux problèmes de planification et veille sur le bon déroulement des projets avant leurs attributions aux entreprises de réalisation.

La RTC-Sonatrach de Béjaia a pris en charge la réalisation des divers travaux d'aménagement de la station de pompage SBM-DOG1 (Bouira). En tant que maître de l'ouvrage, elle souhaite établir des prévisions quant aux différents paramètres et indicateurs de ce projet à savoir délai, ressources,...

Les mesures de performance d'une planification d'un projet est le temps d'exécution, étant un critère important, car tout retard subi par une activité provoque des problèmes dans la gestion de l'entreprise, ce que l'on désire éviter, ainsi que la bonne gestion des ressources, vu que les délais planifiés ne sont souvent pas respectés pour cause de limitations des ressources (humaines, matérielles) qui surviennent au cours de l'exécution du projet et qui ne sont pas prises en compte dans l'élaboration des prévisions, ce qui engendre des retards dans l'exécution des tâches, et qui rend difficile le respect des délais de réalisation.

L'objectif à atteindre pour le projet que le département travaux neufs nous a confié, est la recherche d'une planification qui optimise l'utilisation des ressources mobilisées dans le délai imposé, c'est à dire bien gérer les personnels et les matériels affectés au projet, afin de déterminer la date de début d'exécution de chaque tâches, tout en respectant le délai alloué au projet et sans dépasser la capacité des ressources.

Pour ce faire nous allons dans un premier temps utiliser des outils familiers tels que le diagramme de Gantt et la méthode pert, néanmoins ces méthodes ne prennent pas en compte les contraintes de ressources. C'est pourquoi, pour réaliser ce projet dans le délai qui est imposé par l'entreprise, nous allons appliquer le chevauchement entre les activités, quoique cette technique comprend des risques de surcharge de ressources. Alors comment peut-on respecter le délai imposé sans qu'il y ait une surutilisation de ressources ?

Il y a plusieurs travaux qui ont déjà été traité au niveau de la RTC-Sonatrach de Béjaia, parmi eux on cite :

- Ordonnancement de tâche d'un projet à l'aide d'un algorithme génétique [26].
- Ordonnancement du projet de rénovation de la base de vie de la station de pompage SP3-OB1 (W. M'Sila)[39].
- L'algorithme de colonies de fourmis pour l'ordonnancement des tâches d'un projet. cas de la Cité Béni Mansour, Sonatrach [1].

# 2

## L'ordonnancement dans la gestion de projet

Le concept de gestion de projets englobe des techniques et méthodes organisationnelles, des outils de planification et de suivi de projets (contrôle). Le principal objectif est d'optimiser des paramètres propres au projet c'est-à-dire : les durées, coûts et qualités. La gestion de projet est donc une démarche visant à structurer, assurer et optimiser le bon déroulement d'un projet suffisamment complexe pour devoir être planifié dans le temps et être budgétisé. Elle permet de maîtriser les risques afin d'atteindre le niveau de qualité souhaité au cours du projet [25].

Le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu de contraintes de délais, d'enchaînement, et des contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises par les tâches.

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>13</b>
<b>2.1 Optimisation combinatoire</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>2.2 Définition du projet</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>2.3 Problème d'ordonnancement de projet</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>2.4 Quelques concepts de la théorie des graphes</b> . . . . .	<b>22</b>
<b>2.5 Ordonnancement de projets sous contraintes de ressources</b> .	<b>23</b>
<b>2.6 Techniques d'ordonnancement</b> . . . . .	<b>25</b>
<b>2.7 Méthodes de résolution du problème RCPSP</b> . . . . .	<b>27</b>

---

Dans ce chapitre descriptif, nous nous intéressons à la gestion de projet et aux problèmes d'ordonnancement d'une manière générale. Il s'agit de présenter les concepts et les bases fondamentales du problème d'ordonnancement sous contraintes de ressources et chevauchement de tâches.

## 2.1 Optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire est une discipline agencant diverses techniques des mathématiques discrètes, de l'informatique et de la recherche opérationnelle, afin de résoudre des problèmes d'optimisation dont l'ensemble des solutions admissibles est discret et souvent fini [29].

## 2.2 Définition du projet

Un projet se définit comme une démarche spécifique qui permet de structurer méthodiquement et progressivement une réalité à venir. Un projet est donc 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 [50].

### 2.2.1 Cycle de vie d'un projet

En général, le cycle de vie d'un projet comporte 4 phases successives (voir la figure 2.1) :

**Définition :** Définir les spécifications du projet, établir ses objectifs, former des équipements et on assigne les principales responsabilités.

**Planification :** On élabore des plans pour déterminer tout ce que le projet implique, le moment de l'ordonnancement, à qui il profitera, le niveau de qualité qui devra être conservé et le budget qui sera retenu.

**Exécution et contrôle (suivi) :** Une importante partie du travail physique et intellectuel du projet s'effectuera à cette étape, où a lieu la fabrication du produit physique, l'évaluation de la durée, les coûts et les spécifications, pour contrôler les résultats ; ainsi que la vérification régulière et continue de la bonne marche du projet pour intégrer, au fur et à mesure du déroulement, les actions correctives nécessaires.

**Clôture :** Elle comprend :

- La livraison du projet au client ;
- Le redéploiement des ressources.

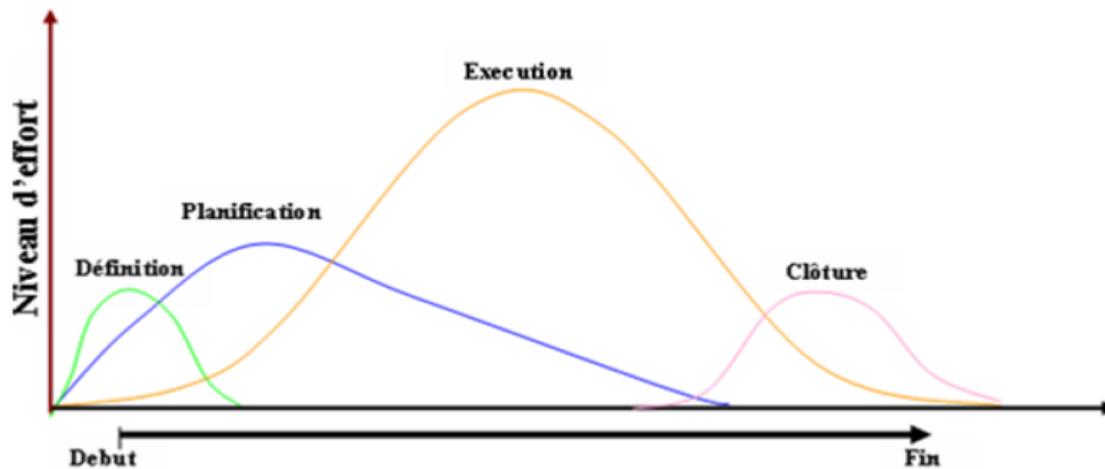


FIGURE 2.1 – Cycle de vie d'un projet.

### 2.2.2 Les objectifs d'un projet

Dans tout projet, on peut identifier trois catégories d'objectifs, qui sont souvent antagonistes :

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

**Les objectifs de délai** : Sont une composante très importante pour le client. Ainsi, il ne sert à rien de livrer un stade olympique trois mois après la fin des jeux olympiques. D'autre part, dans un marché concurrentiel, tel que, par exemple, 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** : Sont primordiaux, notamment dans le cadre d'un contrat à prix non révisable ou dans le cas d'un projet interne.

Ces objectifs sont fortement liées. Par exemple, il est plus facile de respecter des objectifs techniques si le délai imparti est plus grand, ou si les ressources mises en oeuvre sont plus nombreuses et donc plus onéreuses.

Ces trois points forme donc un triangle d'or, qui est l'image couramment retenue pour caractériser les trois paramètres fondamentaux d'un projet. La réussite d'un



projet passe par la satisfaction des ces derniers[45].

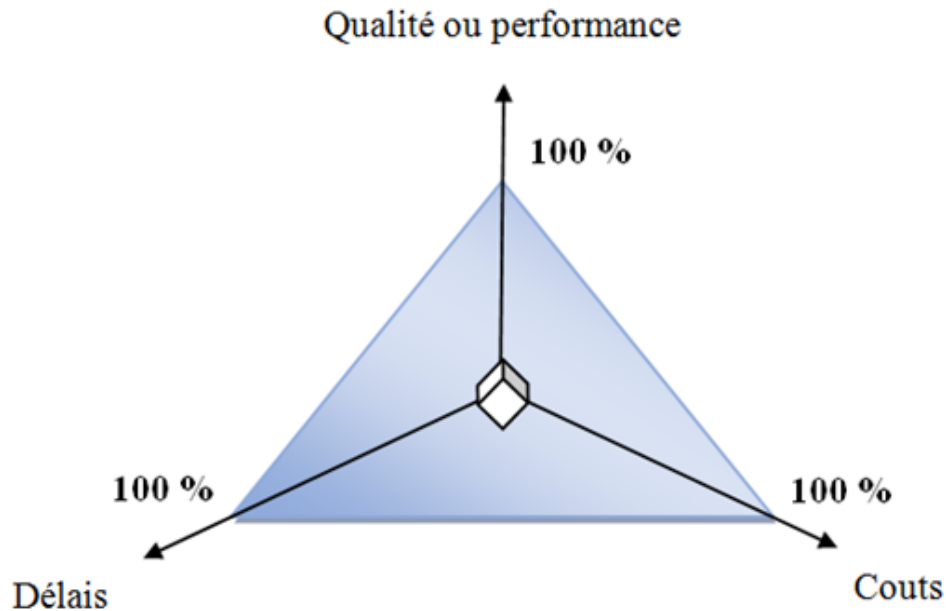


FIGURE 2.2 – Le triangle d'or.

### 2.2.3 Management de projet

Le management de projet recouvre l'ensemble des tâches qui permettent de conduire une opération quelconque à bonne fin ; il comprendra les tâches de direction, gestion, maîtrise et pilotage. Piloter un projet, c'est mener à bien et à temps les actions qui vont produire le résultat du projet. C'est une des fonctions du management de projet [40].

Selon la norme AFNOR (Association Française de NORmalisation) Le management de projets regroupe deux fonctions bien différentes :

#### La direction de projet :

Qui s'intéresse aux décisions stratégiques (décisions à long terme mettant en jeu l'avenir de l'entreprise) cette fonction est assurée par un chef de projet assisté parfois d'une équipe. Il consiste à :

- Fixer le cadre stratégique (objectifs, moyens, programmes) ;
- Prioriser les actions ;
- Coordonner les activités et les différents projets ;
- Gérer les changements stratégiques ;
- Optimiser les ressources.

**La gestion de projet :**

Qui s'intéresse aux décisions opérationnelles (décisions à court terme de gestion des équipements et du personnel), elle est assurée par un contrôleur de projet. Elle a pour objectif d'apporter à la direction de projet les informations relatives à l'avancement de l'exécution du projet, au respect de ses objectifs et de ses coûts.

Il consiste à :

- Apporter les éléments nécessaires au pilotage ;
- Gérer les délais ;
- Gérer les coûts ;
- Planifier les tâches ;
- Elaborer des tableaux de bord ;
- Evaluer le projet.

**2.2.4 Étapes de réalisation d'un projet****Première étape : Définir l'envergure du projet**

La définition du contenu du projet consiste à créer un plan de projet. D'une autre manière, il s'agit d'établir le résultat final ou la mission du projet et de définir une liste de vérification du projet qui comprend les éléments suivants [53] :

**Les objectifs du projet :** La description du contenu du projet a pour première étape d'établir les objectifs en fonction des besoins du client.

**Les livrables :** Décrire les principaux livrables, soit les résultats prévus au cours de la durée du projet. Sachant qu'un livrable est tout résultat, document, mesurable, tangible ou véritable qui résulte de l'achèvement d'une partie du projet.

Exemple : Un cahier des charges et une étude de faisabilité sont des livrables.

**Les jalons :** Ils servent à mieux diviser les principales parties d'un travail. Aussi, ils fournissent la première estimation grossière en termes de temps, de coût et de ressources.

**Les exigences techniques :** Se sont imposées pour garantir une performance conforme aux exigences du client.

**Les limites et les exclusions :** Les limites du contenu doivent être clairement établie afin d'éviter la perte de ressources et de temps attribuable à une mauvaise analyse du problème.

**La révision du contenu en compagnie du client :** Elle correspond à la dernière étape de la liste de vérification du contenu du projet.

### Deuxième étape : Etablir les priorités du projet

La quantité et le succès d'un projet dépend de la capacité à répondre aux attentes des clients, voire de les dépasser en ce qui concerne les coûts (budget), le temps et la performance (contenu). Les rapports mutuels entre ces critères varient. Il s'avère parfois nécessaire de proposer des compromis quant à la performance et au contenu du projet pour le terminer plus rapidement ou pour en diminuer les coûts, car plus la durée du projet se prolonge, plus le coût sera plus élevé.

Souvent le gestionnaire du projet devra faire un compromis en matière de temps, de coûts et de performance, et pour ce faire, il doit déterminer et comprendre les priorités du projet.

### Troisième étape : Crée une structure de découpage du projet

Une fois le contenu et les livrables sont déterminés, l'ensemble du projet peut être successivement réparti en éléments de travail de plus en plus petits. Le résultat de ce processus hiérarchique nous donne la structure de découpage du projet.

## 2.2.5 Structure de découpage de projet (Work Breakdown Structure (WBS))

Le découpage de projet consiste à fractionner les livrables principaux en éléments plus petits, mieux gérables jusqu'à un point tel que ces éléments livrables soient suffisamment maîtrisables, ainsi établir une forme de contrôle du projet.

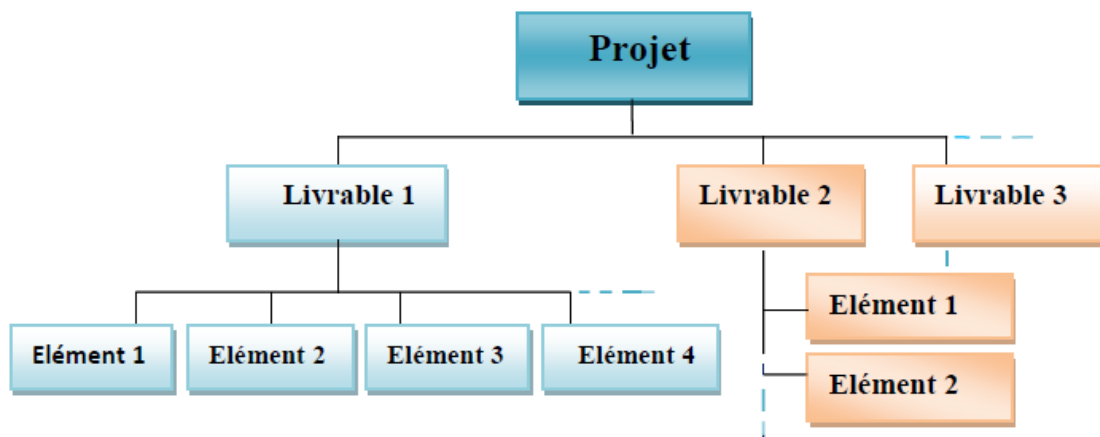


FIGURE 2.3 – Structure de découpage d'un projet (WBS).

## 2.3 Problème d'ordonnement de projet

Lors de tout projet de grande envergure (construction d'un bateau, d'un avion, d'un bâtiment, . . .), un problème crucial qui se pose est celui du calendrier d'exécution des tâches.

Le problème d'ordonnement consiste à organiser dans le temps la réalisation des activités d'un projet, compte tenu des contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement . . .) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises pour la réalisation de ce projet.

Mathématiquement, c'est un problème d'optimisation sous contraintes. Il s'agit de déterminer à l'intérieur de l'ensemble des solutions réalisables (c'est-à-dire vérifiant les contraintes du problème), un ordre de passage des tâches qui minimise une (ou parfois plusieurs) fonction objectif donnée [40].

### 2.3.1 Données d'un problème d'ordonnement

#### Ressources :

Une ressource est un moyen destiné à être utilisé pour la réalisation d'une tâche, et disponible en quantités limitées.

Dans le contexte industriel, les ressources peuvent être des machines, des ouvriers, des équipements, des locaux, des budgets, etc. La disponibilité d'une ressource peut varier dans le temps suivant une fonction  $R_k(t)$ . Cette disponibilité qui s'appelle la capacité  $R_k$  de la ressource  $k$ , est une caractéristique qui détermine la quantité de la ressource [48].

**Ressource renouvelable :** Il s'agit d'une ressource qui peut redevenir disponible en même quantité après avoir été alloué à une tâche (une machine, un fichier, . . .).

**Ressource consommable :** Il s'agit d'une ressource dont la disponibilité décroît après avoir été allouées à une tâche (argent, énergie, . . .)

**Ressource disjonctive :** Il s'agit d'une ressource qui ne peut exécuter qu'une tâche à la fois (une imprimante, une personne, . . .).

**Ressource cumulative :** Il s'agit d'une ressource qui peut être utilisée par plusieurs tâches simultanément mais en nombre limité (un four, un groupe de personnes, . . .).

### 2.3.2 Tâche / Activité :

Une tâche  $i$  est une entité élémentaire de travail localisé dans le temps par une date de début  $\underline{t}_i$  et de fin  $\bar{t}_i$ , dont la réalisation est caractérisée par [38] :

- Une durée  $d_i$  (on a  $\bar{t}_i = \underline{t}_i + d_i$ );
- $r_{ik}$  : L'intensité avec laquelle la tâche  $i$  consomme un certain moyen ou ressource  $k$ .

Exemples :

- En construction : Pose des dalles, peinture, plomberie, . . .
- En informatique : Exécution d'un programme, impression d'un document, . . .
- En transport ferroviaire : Occupation d'une portion de voie par un train, . . .

Donc, il n'y a pas de définition formelle d'une tâche, mais toute considération dépend de la nature du domaine et du problème en question.

En ordonnancement de projet, nous conservons le terme tâche pour désigner les activités constitutives d'un projet, l'ensemble des tâches 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 de début au plus tôt) ;
- La date de début au plus tard de la tâche  $i$  ;
- La date de fin au plus tôt ;
- La date échu de la tâche  $i$  (date de fin au plus tard : deadline) ;
- $t_i$  : "Date de début d'exécution de la tâche  $i$ " ;
- $\bar{t}_i$  : "Date de fin d'exécution de la tâche  $i$ " ;
- $d_i$  : "Durée d'exécution de la tâche  $i$ ".

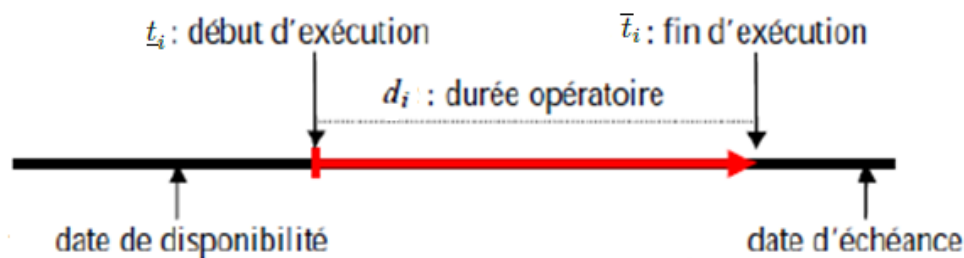


FIGURE 2.4 – Caractéristiques d'une tâche  $i$ .

### 2.3.3 Contraintes :

Les problèmes d'ordonnement sont rendus difficiles à cause des contraintes à respecter. Nous pouvons distinguer plusieurs types d'entre elles :

**Contraintes potentielles :** Elles lient les tâches entre elles c'est-à-dire que telle opération ne peut être exécutée avant telle autre, elles peuvent être :

**Localisation temporelle :** Une tâche donnée doit être terminée avant telle date, ou au contraire son exécution ne doit pas commencer avant une date précise.

**Contraintes de succession :** Dans ces contraintes, l'exécution de la tâche  $j$  ne peut commencer qu'une fois un ensemble de tâches prédéfinies est achevé.

**Contraintes disjonctives (ou non partageables) :** Ce type de contraintes est lié aux ressources utilisées par les tâches, il apparaîtra lorsque deux tâches, utilisant la même machine, ne pourront pas s'exécuter simultanément.

**Contraintes cumulatives (ou partageables) :** Elles sont aussi liées aux ressources, elles apparaissent par exemple lorsque trois processus sont disponibles pour l'exécution de quatre tâches : On ne pourra exécuter plus de trois de ces tâches en même temps sans que l'on puisse savoir à l'avance laquelle sera retardée [34].

### 2.3.4 Définition de l'ordonnancement

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

Un ordonnancement constitue une solution au problème d'ordonnancement. Il décrit l'exécution des activités et l'allocation des ressources au cours du temps, satisfaisant les contraintes et s'approchant au mieux des objectifs à atteindre.

### 2.3.5 Objectif de l'ordonnancement

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

**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.

### 2.3.6 Classification des problèmes d'ordonnancement

Selon la nature des variables mises en jeu, la nature des contraintes, ou encore la structure particulière du graphe non-conjonctif associé à un problème, plusieurs classifications des problèmes d'ordonnancement sont proposées dans la littérature dont on peut citer [33] :

- Problèmes à ressources uniques (problème à une machine et à  $m$  machines),
- Problèmes d'ordonnancement distribués,
- Problèmes cumulatifs,
- Problèmes d'ordonnancement cyclique,
- Problèmes à ressources multiples (flow-shop), job-shop et open-shop),
- Problèmes de voyageur de commerce.

## 2.4 Quelques concepts de la théorie des graphes

Les graphes sont actuellement l'outil privilégié pour modéliser des ensembles structurés complexes. C'est une tentative de visualisation concrète des faits. Dans cette partie, nous allons définir quelques concepts de la théorie des graphes qui nous seront utiles dans ce qui suit.

### 2.4.1 Définition d'un graphe

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

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

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

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

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

Un graphe est noté donc par :  $G = (X, U)$ . Si les lignes  $U$  sont orientées, on les appelle des arcs et  $G$  prend le nom de "graphe orienté 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  $j$ , notée par  $\underline{t}_j$  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 :

$$\begin{cases} t_i = 0 \\ \underline{t}_j = \max(t_i + d_{ij}) \quad \text{tel que } j \neq i \end{cases}$$

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

### 2.4.3 Date au plus tard

On appelle date au plus tard d'une tâche  $i$ , notée par  $\bar{t}_i$  l'ultime date à laquelle toutes les activités antérieures à  $i$  doivent être réalisées de manière ne pas retarder le projet.

$$\begin{cases} T_N = t_N \\ \bar{t}_j = \min(\bar{t}_i + d_{ij}); \end{cases}$$

### 2.4.4 Tâche critique

Une tâche critique est une tâche dont les dates de début au plus tôt et au plus tard coïncident. Tout retard sur les tâches critiques retarde la fin des travaux.

### 2.4.5 Chemin critique

C'est le plus long chemin du sommet "début" au sommet "fin". Il est constitué des arêtes associées à des tâches critiques. Il n'est pas nécessairement unique.

### 2.4.6 Marges

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 :** La marge totale sur une tâche est le retard que l'on peut prendre dans la réalisation de cette tâche sans retarder l'ensemble du projet. Elle est obtenue, en faisant pour chaque tâche, la différence entre la date au plus tard de début d'une tâche et la date au plus tôt. Les tâches critiques sont donc les tâches de marge totale nulle.

**Marge libre :** La marge libre sur une tâche est le retard que l'on peut prendre dans la réalisation d'une tâche sans retarder la date de début au plus tôt de tout autre tâche qui suit.

## 2.5 Ordonnancement de projets sous contraintes de ressources

Les problèmes d'ordonnancement avec contraintes de ressources, appelés communément *RCPSP* (Resource-Constrained Project Scheduling Problem), ont été abondamment étudiés dans les dernières années. Ces problèmes ont été introduits par Pritsker (1969)[52]. C'est l'un des problèmes d'ordonnancement cumulatif les plus connus, du fait de l'intérêt que lui ont accordés les chercheurs du domaine de la recherche opérationnelle et de ses nombreuses applications industrielles. Depuis, de nombreuses recherches visent à optimiser la planification des activités pour minimiser la durée totale du projet.

### 2.5.1 Définition du problème d'ordonnancement sous contrainte de ressources (RCPSP)

Le problème d'ordonnancement de projets sous contraintes de ressources (RCPSP) est un problème d'optimisation combinatoire les plus difficiles à résoudre [17]. La démonstration de sa NP-difficulté au sens fort est donnée par Blazewicz et al [30], 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).

### 2.5.2 Chevauchement entre activités

Chevauchement entre tâches, cette contrainte d'ordonnancement est une généralisation des liens de précédence entre deux tâches successives, pour prendre en compte les cas où la seconde tâche peut débuter avant la fin de la première. 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)[11] qu'il permet de réduire la durée d'exécution du projet et peut être utilisé 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.

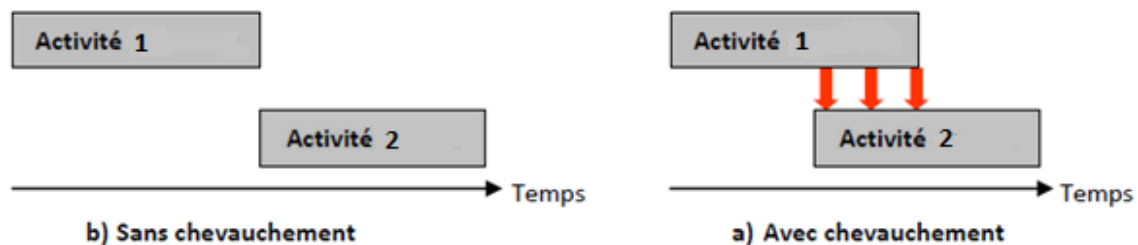


FIGURE 2.5 – Chevauchement entre activités.

### 2.5.3 Problème d'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités

Le problème d'ordonnancement de projets avec contrainte de ressources et modes de chevauchement est une extension du problème d'ordonnancement classique (Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) il se définit comme suit :

Etant donné un ensemble d'activités à réaliser, le RCPSP-OM (Resource Constrained Project Scheduling Problem with Over-lapping 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'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités s'appuie sur les hypothèses suivantes :

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.

## 2.6 Techniques d'ordonnement

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

### 2.6.1 Le diagramme de GANTT

Le graphique de GANTT n'est pas une méthode pour résoudre les problèmes d'ordonnement mais seulement une méthode pour représenter une solution. Il s'agit d'un outil élaboré en 1917 par Henry L. GANTT permettant de modéliser la planification des tâches et représenter graphiquement l'avancement du projet. Son principe est de représenter au sein d'un tableau, en ligne les différentes tâches et en colonne les unités de temps (exprimées en mois, semaines, jours, heures ...). Cette méthode est actuellement intégrée dans tous les logiciels de planification de projets (MS Project, Gantt Project...).

Ses différentes étapes de réalisation sont les suivantes :

- Définir les relations d'antériorité entre tâches ;
- Représenter les 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... ;
- Evaluer la solution : représentation de la progression réelle du travail par un trait en pointillé parallèle à la tâche planifiée.

Le diagramme de Gantt permet de visualiser dans le temps les diverses activités liées composant un projet. Il permet de représenter graphiquement l'avancement du projet. Le concept a été développé par Henry L. Gantt, ingénieur américain, vers 1910.

### 2.6.2 La méthode du Potentiel-Metra MPM

La méthode des potentiels a été développée vers la fin des années 50 parallèlement à la méthode PERT (voir 2.6.4). Dans cette méthode, le problème est représenté sous forme d'un graphe tel que les tâches sont représentées par des noeuds et les contraintes de succession par des arcs, son principe est le suivant :

- À chaque noeud 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 DEBUT 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.

### 2.6.3 La méthode PDM (Processus Diagram Method)

La méthode des antécédents, 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 :** Signifie qu'une tâche (notée  $i$ ) dépendante d'une autre tâche (notée  $j$ ) ne peut pas commencer tant que cette dernière n'ait commencé.

Exemple : La rédaction des comptes rendus de réunions doit commencer en même temps que la tenue de ces réunions.

**Le lien Début-Fin :** Signifie que la fin d'une tâche ( $i$ ) est liée au début d'une autre tâche ( $j$ ), c'est-à-dire que la tâche dépendante ne peut pas se terminer tant que la tâche dont elle dépend n'a pas commencé.

Exemple : La fin de l'exploitation d'une ancienne installation ne peut avoir lieu qu'à la mise en service de la nouvelle.

**Le lien Fin-Début :** Pour qu'une tâche ( $i$ ) puisse commencer, l'autre tâche ( $j$ ) doit être terminée. La tâche ( $j$ ) est successeur de la tâche ( $i$ ).

Exemple : les murs ne peuvent être construits que lorsque les fondations sont terminées.

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

Exemple : La rédaction des cahiers de recette doit être terminée même temps que l'application logicielle à laquelle ils s'appliquent.

### 2.6.4 La 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 noeuds 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 est une technique qui s'appuie essentiellement sur la construction d'un graphe  $R = (X; U; D)$  orienté, sans boucle défini comme suit :

- $X$  : 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.  $D = \{d_{ij} \in \mathcal{R}^+, (i, j) \in X^2\}$

### 2.6.5 La méthode CPM (Critical Path Method)

La méthode CPM ou " Méthode du chemin critique " a été créé en 1954 par la société Du Pont de Nemours.

Elle est identique à la méthode PERT quant à la définition et au traitement des graphiques. Elle ajoute une relation coût délai utilisée pour optimiser le coût du projet.

## 2.7 Méthodes de résolution du problème RCPSP

Les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation combinatoire (d'ordonnement) prennent en considération deux facteurs : la qualité des solutions et le temps de résolution. Ainsi elles peuvent être classées en deux catégories : les méthodes exactes qui garantissent l'optimalité mais avec un temps de calcul très grand, et les méthodes approchées qui peuvent perdre en optimalité pour gagner en temps d'exécution.

### 2.7.1 Les méthodes exactes

On peut définir une méthode exacte comme une méthode qui garantit l'obtention de la solution optimale pour un problème d'optimisation[37]. L'utilisation de ces méthodes s'avère particulièrement intéressante, mais elles sont souvent limitées au cas des problèmes de petite taille.

Les algorithmes exactes les plus réussis dans la littérature appartiennent aux paradigmes de quatre grandes classes :

- La programmation dynamique ;
- La programmation linéaire ;
- Les méthodes de recherche arborescente (Branch and bound).

#### La programmation dynamique

Elle se base sur le principe de Bellman (1954) : " Si  $C$  est un point qui appartient au chemin optimal entre  $A$  et  $B$ , alors la portion de ce même chemin allant de  $A$  à  $C$  est le

chemin optimal entre  $A$  et  $C$  ". C'est une méthode qui consiste donc à construire d'abord les sous-chemins optimaux et ensuite par récurrence le chemin optimal pour le problème entier. Cette méthode est destinée à résoudre des problèmes d'optimisation à vocation plus générale que la méthode de séparation et d'évaluation (branch and bound) sans permettre pour autant d'aborder des problèmes de tailles importantes.

### La programmation linéaire

C'est l'une des techniques classiques de recherche opérationnelle. Elle permet de modéliser les problèmes dont le critère et les contraintes sont des fonctions linéaires des variables de décision. Parmi les algorithmes les plus importants pour le traitement d'un programme linéaire nous citons la méthode du simplexe.

### La méthode de branch and bound

La méthode de branch and bound (procédure par évaluation et séparation progressive) consiste à énumérer ces solutions d'une manière intelligente en ce sens que, en utilisant certaines propriétés du problème en question, cette technique arrive à éliminer des solutions partielles qui ne mènent pas à la solution que l'on recherche. De ce fait, on arrive souvent à obtenir la solution recherchée en des temps raisonnables. Bien entendu, dans le pire cas, on retombe toujours sur l'élimination explicite de toutes les solutions du problème.

Pour ce faire, cette méthode se dote d'une fonction qui permet de mettre une borne sur certaines solutions pour, soit les exclure, soit les maintenir comme des solutions potentielles. La performance d'une méthode de branch and bound dépend, entre autres, de la qualité de cette fonction (de sa capacité d'exclure des solutions partielles tôt).

## 2.7.2 Les méthodes approchées

La taille des problèmes influe de façon importante sur les temps de calcul des méthodes exactes. Ce temps de calcul est raisonnable pour les problèmes de petite taille, mais il devient vite prohibitif si la taille des problèmes augmente, et par conséquent il est utile de développer des méthodes approchées. Ces méthodes qui sans garantir l'optimum absolu, peuvent fournir d'excellentes solutions.

En plus d'être beaucoup plus génériques et facilement applicables, ces méthodes possèdent l'immense avantage d'être beaucoup moins contraignantes de sorte qu'elles sont pratiquement toujours applicables. Ainsi, dans de nombreux cas, les méthodes approchées deviennent la seule option performante envisageable. Ce sont en quelque sorte des méthodes de dernier recours. Les algorithmes d'optimisation tels que les algorithmes de recuit simulé, les algorithmes tabous et les algorithmes génétiques ont démontré leurs robustesses et efficacités face à plusieurs problèmes d'optimisation combinatoires [10].

Il existe deux types de méthodes approchées : les méthodes constructives (les heuristiques) et les méthodes d'amélioration (les métaheuristiques).

### Les méthodes constructives ou heuristiques

Ce sont des méthodes très utilisées pour obtenir très rapidement une première solution pour les problèmes d'ordonnancement. La recherche d'une solution par ces méthodes commence à partir de zéro et à chaque itération une solution pour le problème est élaborée en utilisant, par exemple, des règles de priorité. Ces méthodes sont généralement très rapides.

### Les méthodes d'amélioration ou métaheuristiques

Le mot métaheuristique est dérivé de la composition de deux mots grecs :

- " heuristique " qui vient du verbe " heuriskein " et qui signifie " trouver ".
- " méta " qui est un suffixe signifiant " au-delà ", " dans un niveau supérieur ".

Les métaheuristiques sont des méthodes inspirées de la nature, ce sont des heuristiques modernes dédiées à la résolution des problèmes et plus particulièrement aux problèmes d'optimisation, qui visent à atteindre un optimum global généralement enfoui au milieu de nombreux optima locaux.

Les métaheuristiques se subdivisent en deux sous-classes :

- Les méthodes de voisinage (Recherche locale) : telle que, la recherche tabou et le recuit simulé.
- Les méthodes évolutives (population) : telle que, l'algorithme génétique et la méthode de colonies de fourmis.

Le principe de ces méthodes n'est plus de construire un ordonnancement à partir des données initiales du problème, mais de modifier le résultat d'une solution admissible en vue d'améliorer la valeur de la fonction objectif. La plupart de ces méthodes utilisent la notion de voisinage de solution, on parle aussi de méthodes par voisinage. A partir d'une solution initiale (générer aléatoirement ou avec une heuristique), une méthode par voisinage ou encore méthode de recherche locale réalise un processus itératif qui consiste à remplacer la solution courante par l'un de ses voisins en tenant compte de la fonction objectif. La méthode s'arrête et retourne la meilleure solution trouvée. Le critère d'arrêt peut être un nombre d'itération atteint ou une valeur de la fonction objectif atteinte. . . .

Dans notre cas, nous allons utiliser la méthode du recuit simulé que nous allons détailler dans le prochain chapitre.

### 2.7.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement les principales méthodes de modélisation et de résolution des problèmes d'ordonnancements. Ceci nous permettra de modéliser le problème de l'ordonnancement du projet d'aménagement divers de la station de pompage SBM-DOG1 (W. Bouira) dans le chapitre suivant.

# 3

## Modélisation et approche de résolution

Face à un problème réel, la première étape consiste à formuler le problème sous la forme d'un problème d'optimisation. La modélisation mathématique d'un problème donné, est une étape qui consiste à extraire une image aussi fidèle que possible du système à étudier. Cette étape est cruciale, car la qualification de la qualité d'une solution n'est pas toujours simple, et la formulation mathématique d'un problème influe beaucoup sur le choix de la technique de résolution à mettre en oeuvre.

Cette étape requiert donc une collaboration étroite entre les spécialistes d'optimisation et ceux de l'application source du problème à résoudre. Le résultat de cette modélisation est un modèle mathématique.

La plupart des problèmes d'optimisation combinatoire font parti de la classe de problèmes difficiles, une stratégie de résolution de problèmes en plus appliquée à ce type de problèmes est l'utilisation de métaheuristiques. Ces algorithmes d'approximation ne garantissent pas toujours l'obtention de solutions optimales mais trouvent généralement de bonnes solutions dans un temps de calcul raisonnable.

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>3.1 Présentation du projet et objectif de l'entreprise</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>3.2 Modélisation du problème</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>3.3 Méthodologie de résolution</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>45</b>

---



Ce chapitre est consacré à la présentation du modèle mathématique, élaboré pour le problème d'ordonnancement posé par l'entreprise SONATRACH, et à la présentation des méthodes que nous allons utiliser afin de le résoudre.

## 3.1 Présentation du projet et objectif de l'entreprise

La RTC Sonatrach de Bejaia a pris en charge de réaliser les divers travaux d'aménagement de la station de pompage de Beni Mansour SBM-DOG1 (W.Bouira), Elle cherche à trouver un planning prévisionnel de réalisation qui prend en compte les contraintes de ressources et de chevauchement de tâches, dont l'objectif est, la réalisation de toutes les tâches composant le projet, dans le délai fixé (24 mois) sans dépasser la capacité des ressources, sachant que ces dernières sont limitées.

## 3.2 Modélisation du problème

La réalisation d'un projet consiste en l'exécution, par des ressources, d'un ensemble d'activités (ou tâches) de durées données et liées entre elles par des contraintes de précédence.

Le problème d'ordonnancement de projets sous contraintes de ressources (RCPSP), est un problème très général [36] qui possède de nombreuses applications industrielles. Dans ce problème, il s'agit d'ordonner des activités qui se définissent par une durée et des quantités de ressources nécessaires à l'exécution, ce qui implique la gestion des ressources (disponibles en quantités limitées). Les activités possèdent des relations de précédence, qui expriment que l'activité  $j$  ne peut pas commencer tant que l'activité  $i$  qui la précède n'est pas achevée.

L'objectif est de déterminer une solution qui minimise la date de fin du projet (qui est dans notre cas fixée à 24 mois), en respectant à la fois les contraintes de précédence et les contraintes de ressources. Ce dernier peut être formulé comme un programme linéaire en nombres entiers.

### 3.2.1 Données du problème :

- ◇ I : Ensemble des tâches  $i$  ;
- ◇ D : Durée du chemin critique (Durée maximale de l'ordonnancement) ;
- ◇ N : Nombre de tâches ;
- ◇ K : Ensemble des ressources ;  $K = \{r_1, \dots, r_n\}$

- ◇  $d_i$  : Durée de la tâche  $i$ .
- ◇  $r_{ik}$  : Capacité de la ressource  $k$  nécessaire à l'exécution de la tâche  $i$  ;
- ◇  $R_k$  : Capacité de la ressource  $k$  disponible pour le projet ;
- ◇  $V$  : Ensemble des couples  $(i, j)$ , tel que la tâche  $i$  précède la tâche  $j$  ;
- ◇  $t$  : Instant de début d'exécution des tâches ;
- ◇  $\underline{t}$  : Date de début au plus tôt ;
- ◇  $\bar{t}$  : Date de début au plus tard ;
- ◇  $r_{ikt}$  : L'utilisation de la capacité de la ressource  $k$  par la tâche  $i$  à l'instant  $t$  ;
- ◇  $W_l$  : Ensemble composé des sous ensembles de tâches chevauchées ;  $W_l = (w_1, \dots, w_n)$
- ◇  $P$  : Durée totale de l'ensemble des tâches du projet.

**Remarques :**

- ✓ Les dates de début au plus tôt, et au plus tard de chaque tâches sont tirées à partir du diagramme de GANTT donné par l'entreprise.
- ✓ Les valeurs  $r_{ikt}$  sont données par l'entreprise.

**Variable de décision :**

On définit la variable de décision comme suit :

$$x_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si la tâche } i \text{ débute son exécution à l'instant } t. \quad \forall i \in I \quad \text{et} \quad \forall t = (0, \dots, 24) \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

**Description des contraintes :**

Le modèle RCPSP traite deux types de contraintes essentielles à savoir, les contraintes de précédence et les contraintes de ressources.

**1. Contrainte de réalisation de toutes les tâches :**

La contrainte de non-préemption des activités, impose à chaque activité de ne débiter qu'une et une seule fois, sur toute la durée du projet. Ceci revient à interdire qu'on puisse interrompre une activité déjà en cours d'exécution pour débiter/poursuivre/achever une autre : :

$$\sum_{t=0}^D x_{it} = 32 \quad \forall i \in I. \quad (3.1)$$

**2. Contrainte de délais (Respect du délai) :** C'est-à-dire chaque tâche est exécutée sans dépasser la durée maximale de l'ordonnancement ( $D = 24$  mois) :

$$\sum_{\substack{t=0 \\ i \in C}}^D t \cdot x_{it} + d_i \leq D. \quad (3.2)$$

$$\sum_{\substack{t=0 \\ i \notin C}}^D t \cdot x_{it} + d_i \leq (P - D). \quad (3.3)$$

Avec :  $(P-D) = (61-24) = 37$  mois qui représente le retard maximal que l'on puisse faire, et  $C$  : le chemin critique.

**3. Contrainte de précedence des tâches :**

Cette contrainte définit des conditions temporelles entre les activités. Elle assure qu'une tâche  $j$ , suivant immédiatement une tâche  $i$ , ne doit commencer avant l'achèvement de cette dernière.

$$\sum_{t=0}^D t \cdot x_{it} + d_i - \sum_{t=0}^D t \cdot x_{jt} \leq 0. \quad \forall (i, j) \in V \quad (3.4)$$

**4. Contrainte de chevauchement de ressources (tâches) :**

Cette contrainte assure une répartition équilibrée de ressources utilisées par les tâches qui s'exécutent en même temps ( c'est à dire les tâches chevauchées), afin de ne pas dépasser la capacité des ressources disponibles en nombre limité. C'est une contrainte exclusive de telle sorte que l'utilisation de la première contrainte désactive la seconde.

$$\sum_{i \in W_t} r_{ikt} \cdot x_{it} \leq R_k. \quad \forall k \in K = \{r_1, \dots, r_{21}\}, \quad t = (0, \dots, 24). \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in W_t} r_{ik\bar{t}} \cdot (1 - x_{it}) \leq R_k. \quad \forall k \in K = \{r_1, \dots, r_{21}\}, \quad t = (0, \dots, 24). \quad (3.6)$$

**Remarque :** On dispose de 11 sous ensembles de chevauchement.

### Description de la fonction objectif :

L'objectif de notre étude consiste à répartir les ressources disponibles en nombre limité sur l'ensemble des tâches constituant le projet, sans qu'il y ait une surutilisation d'une quelconque ressource tout au long de la période fixée pour sa réalisation.

$$\max \sum_{i \in W_t} \sum_{t=0}^D \sum_{k \in K} r_{ikt} \cdot x_{it}. \quad (3.7)$$

### 3.2.2 Modèle mathématique

Le modèle mathématique définit deux points importants, qui sont, la fonction objectif qui spécifie le but à atteindre lors de la réalisation du problème, et les contraintes qui définissent les conditions sur l'espace d'état que les variables doivent satisfaire. À la suite des indications données ci-dessus, on peut alors formuler ce modèle sous forme d'un problème combinatoire, de la manière suivante :

$$H(x) = \max \sum_{i \in W_i} \sum_{t=0}^D \sum_{k \in K} r_{ikt} \cdot x_{it}.$$

sc

$$\sum_{t=0}^D x_{it} = 32, \quad 3.1$$

$$\sum_{t=0}^D t \cdot x_{it} + d_i = 24, \quad 3.2$$

$$\sum_{t=0}^D t \cdot x_{it} + d_i \leq 37, \quad 3.3$$

$$\sum_{t=0}^{t=D} t \cdot x_{it} + d_i - \sum_{t=0}^{t=D} t \cdot x_{jt} \leq 0, \quad 3.4$$

$$\sum_{i \in W_i} r_{ikt} \cdot x_{it} \leq R_k. \quad \forall k \in K \quad 3.5$$

$$\sum_{i \in W_i} r_{ikt} \cdot (1 - x_{it}) \leq R_k. \quad \forall k \in K \quad 3.6$$

$$i = \{1, \dots, 32\},$$

### 3.3 Méthodologie de résolution

La résolution d'un problème d'ordonnancement sous contraintes de ressources (RCPSP) 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 du projet aussi petite que possible) tout en satisfaisant certaines contraintes d'antériorité de certaines tâches par rapport à d'autres, non-simultanéité de certains travaux, disponibilité limitée de biens nécessaires à l'exécution du projet. Nous présenterons ci-dessous les méthodes avec lesquelles nous allons résoudre notre problème.

#### 3.3.1 Nivellement des ressources

Le nivellement des ressources est une technique qui consiste à répartir de façon à peu près égale l'utilisation des ressources tout au long du projet. L'objectif du nivellement est de supprimer tous les dépassements de disponibilité des ressources. C'est ce qu'on appelle aussi le "lissage à moyens bloqués". Il faut donc placer les activités de manière à ce qu'elles produisent pas un besoin supérieur à la disponibilité de chacune des ressources considérées. Cette augmentation de la durée du projet doit être minimale. Le nivellement a pour but d'éliminer les sur-utilisations. Pour cela, on décale des tâches vers l'avenir[33].

### 3.3.2 Lissage des ressources

Le lissage des ressources est une technique qui consiste à supprimer lorsque c'est le cas des dépassements de ressources. L'objectif du lissage est de répartir la charge de travail de chaque ressource dans le temps sans jamais rallonger la durée du projet. On l'appelle aussi "Lissage à délais bloqués" les activités vont être déplacées dans leurs marges totales, c'est à dire en respectant leurs dates de début au plus tôt et de fin au plus tard dans l'objectif de réduire ces écarts par rapport à la disponibilité définie. Dans le cas où aucune disponibilité n'est imposée, le même traitement pourra être effectué par rapport à une charge moyenne[33].

### 3.3.3 Recuit simulé

#### Définition et origines :

La méthode du recuit simulé (Simulated Annealing, SA) est une généralisation de la méthode Monte-Carlo, Elle a été mise au point par trois chercheurs de la société IBM : S. Kirkpatrick et al en 1983[8], et indépendamment par V. Cerny en 1985 [51] à partir de l'algorithme de Metropolis, qui permet de décrire l'évolution d'un système thermodynamique (LIACS, 2009)[31]. Son but est de trouver une solution optimale pour un problème donné.

L'origine de la méthode du recuit simulé vient de l'analogie avec la métallurgie, où la méthode, pour atteindre des états de basse énergie d'un solide, consiste à monter la température du solide à des valeurs élevées, puis à le laisser refroidir lentement. Ce processus est appelé "recuit". Le recuit est donc une opération consistant à laisser refroidir lentement un métal pour améliorer ses qualités.

L'idée physique est qu'un refroidissement trop brutal peut bloquer le métal dans un état peu favorable (alors qu'un refroidissement lent permettra aux molécules de s'agencer au mieux dans une configuration stable). C'est cette même idée qui est à la base du recuit simulé.

On commence d'abord par chauffer le métal jusqu'à une certaine température où il devient liquide (les atomes peuvent donc circuler librement). Après avoir atteint ce stade, on abaisse la température très lentement de sorte à obtenir un solide (Olivier, 2001) [14]. Si cette baisse de température est brusque on obtient alors du verre, si au contraire cette baisse de température est très lente (laissant aux atomes le temps d'atteindre l'équilibre statistique), nous obtiendrons des structures de plus en plus régulières, jusqu'à atteindre un état d'énergie minimale correspondant à la structure parfaite d'un Crystal, on dit alors que le système est "gelé". Au cas où cet abaissement de température ne se ferait pas assez lentement, il pourrait apparaître des défauts. Il faudrait alors les corriger en réchauffant de nouveau légèrement la matière de façon à permettre aux atomes de retrouver la liberté de mouvement, leur facilitant ainsi un éventuel réarrangement conduisant à une structure plus stable (Olivier, 2001)[14].

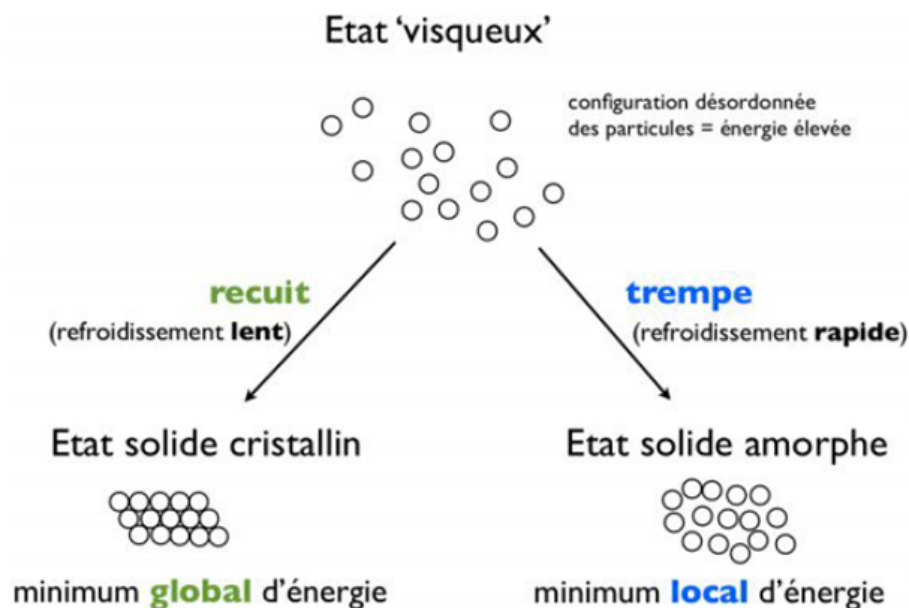


FIGURE 3.1 – Représentation des différentes configurations d'énergie.

#### Avantages et inconvénients :

##### Avantages :

- Souple vis-à-vis des évolutions du problème et facile à implémenter,
- Evite le piège des optima locaux,
- Excellents résultats pour un nombre de problèmes complexes.

##### Inconvénients :

- Nombreux tests nécessaires pour trouver les bons paramètres,
- Définir les voisinages permettant un calcul efficace des différences d'énergies.
- Pas toujours facile et propre à chaque problème.

#### Principe :

L'idée principale du recuit simulé tel qu'il a été proposé par Metropolis en 1953 est de simuler le comportement de la matière dans le processus du recuit très largement utilisé dans la métallurgie. Cette méthode doit marquer des paliers de température suffisamment longs pour que le matériau atteigne l'"équilibre thermodynamique", cet état d'équilibre (où l'énergie est minimale) représente - dans la méthode du recuit simulé - la solution optimale d'un problème ; L'énergie du système sera calculée par une fonction coût (ou fonction objectif) spécifique à chaque problème (Kendall) [19].

La méthode va donc essayer de trouver la solution optimale en optimisant une fonction objectif, pour cela, un paramètre fictif de température a été ajouté par Kirkpatrick, Gelatt

et Vecchi [18].

En gros le principe consiste à générer successivement des configurations à partir d'une solution initiale  $S_0$  et d'une température initiale  $T_0$  qui diminuera tout au long du processus jusqu'à atteindre une température finale ou un état d'équilibre (optimum global).

### Algorithmes :

**L'algorithme de Metropolis :** Dans l'algorithme de Metropolis, on part d'une configuration donnée, et on lui fait subir une modification aléatoire. Si cette modification fait diminuer la fonction objectif (ou énergie du système), elle est directement acceptée; Sinon, elle n'est acceptée qu'avec une probabilité égale à  $\exp(\Delta E/T)$  (avec  $E$ =énergie, et  $T$ =température), cette règle est appelée critère de Metropolis (Autin, 2006) [6].

### L'algorithme du recuit simulé :

1. **Initialisation de l'algorithme :** La solution initiale peut être prise au hasard dans l'espace des solutions possibles, elle peut aussi être générée par une heuristique classique, telle que la descente du gradient ou l'algorithme glouton (dans le cas du voyageur du commerce). (Kendall)[19].

La température initiale doit être assez élevée, car c'est elle qui fixe la probabilité d'accepter ou de refuser les solutions défavorables à l'optimisation de la fonction  $f$ .

#### - Règle d'acceptation :

L'essentielle caractéristique du recuit simulé par rapport à d'autres métaheuristiques est le fait d'accepter de temps en temps des configurations dégradant la fonction coût ce qui permet de s'échapper des optima locaux, la règle la plus utilisée est celle de Métropolis que nous avons cité auparavant. Ainsi pour démarrer le processus, il faut préciser les paramètres nécessaires pour chaque  $T$  et qui sont :

- $T_0$  = température initiale
- $l_{max}$  = nombre de mouvements par palier de température
- $\alpha$  = coefficient de décroissance de la loi de refroidissement
- Et finalement la loi de refroidissement ou la loi de décroissance de  $T$ .

2. **Construction du voisinage :** On part d'une solution quelconque (à priori, il n'est pas forcément intéressant de partir d'une "bonne" solution). A chaque étape, on tire au hasard une solution voisine. Si elle est meilleure, on l'adopte; sinon on calcule l'augmentation de coût  $\Delta$ ; On va adopter cette solution avec une probabilité liée à cette augmentation : plus le coût augmente, plus la probabilité de la garder sera faible. Mais cette probabilité dépend aussi du temps



écoulé depuis le lancement de l'algorithme :

Au début, on accepte facilement un changement qui produit une solution plus coûteuse à la fin on l'accepte très difficilement. Plus précisément on calcule **accept** =  $\exp(-\Delta/T)$ , T étant une quantité que nous appellerons température. On tire au hasard un réel p entre 0 et 1 : si p est inférieur à **accept**, on adopte la nouvelle solution, sinon on garde l'ancienne.

3. **Variation de la température** : Deux approches sont possibles pour décroître la température :
  - a) **Décroissance par paliers** : Pour chaque valeur de la température, on itère l'algorithme de Metropolis jusqu'à atteindre un équilibre statistique, puis on diminue la température.
  - b) **Décroissance continue** :  
On fait baisser la température d'une façon continue, le plus courant est d'utiliser la loi suivante :

$$T_{i+1} = \alpha \cdot T_i / \alpha < T_i \text{ (en général } \alpha = 0.9 \text{ à } 0.99 \text{)}.$$

**Remarque** : Le paramètre  $\alpha$  est à choisir avec précaution, En effet, s'il est choisi trop grand, la température baissera très rapidement et l'algorithme pourra être bloqué dans un minima local ; Si au contraire il est choisi trop petit, la température baissera très lentement et le temps de calcul sera très grand (Kendall)[19].

4. **Amélioration** : Cet algorithme est parfois amélioré en ajoutant une variable qui mémorise la meilleure valeur rencontrée jusqu'à présent, sans cela, l'algorithme pourrait converger vers une certaine solution, alors qu'on avait visité auparavant une solution meilleure (Autin, 2006)[6].

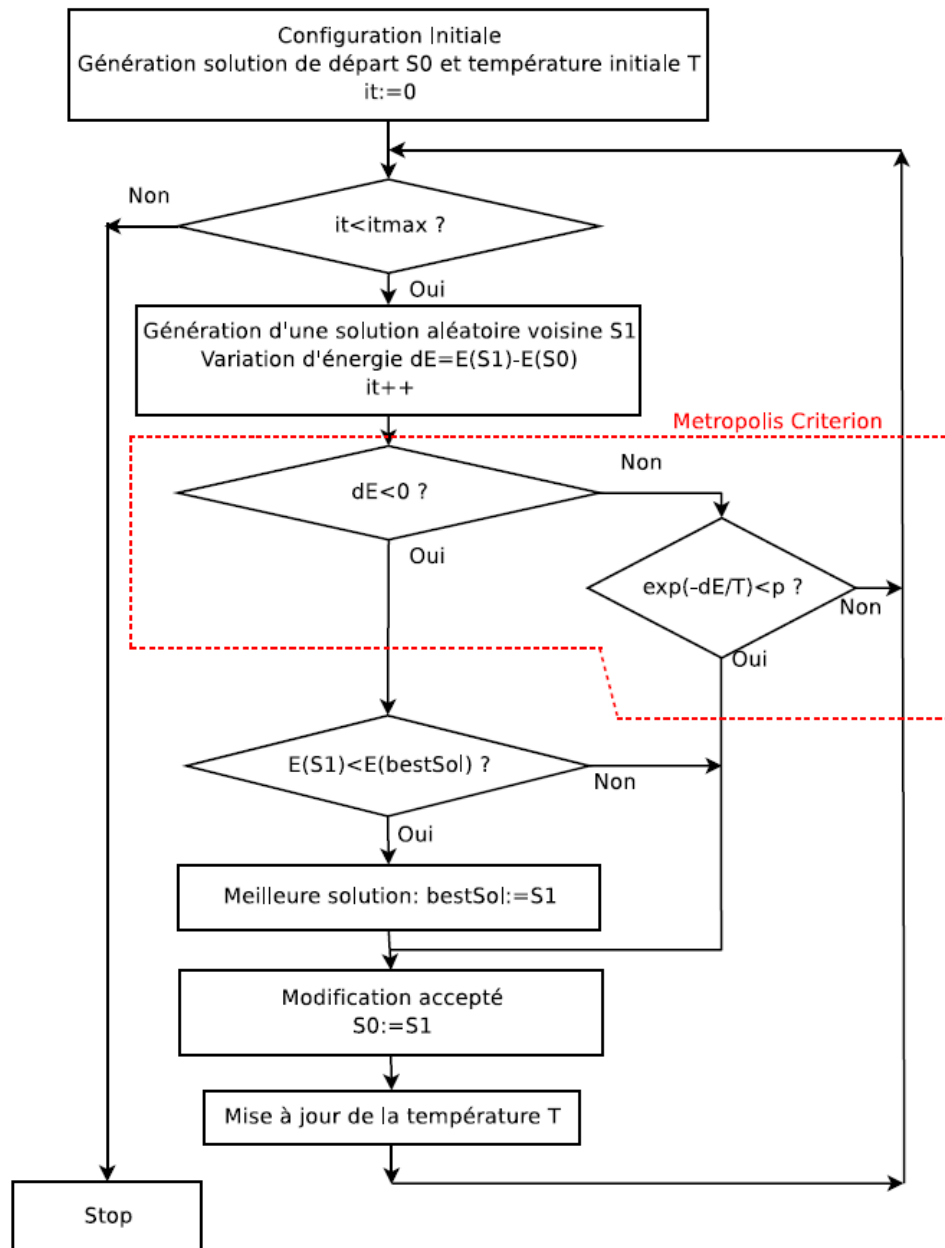


FIGURE 3.2 – Organigramme basique de l’algorithme de recuit simulé.

### 3.3.4 Illustration par le problème du voyageur de commerce :

Le recuit simulé peut être appliqué au problème du voyageur de commerce. Le but est alors de trouver le circuit hamiltonien de coût minimal dans un graphe. L’énergie représentera la distance totale à parcourir, et un état du système représentera le chemin entre les villes. L’algorithme va donc tenter de minimiser la longueur totale du chemin, en

modifiant l'ordre des villes à parcourir. Soit le graphe suivant représentant un ensemble de villes :

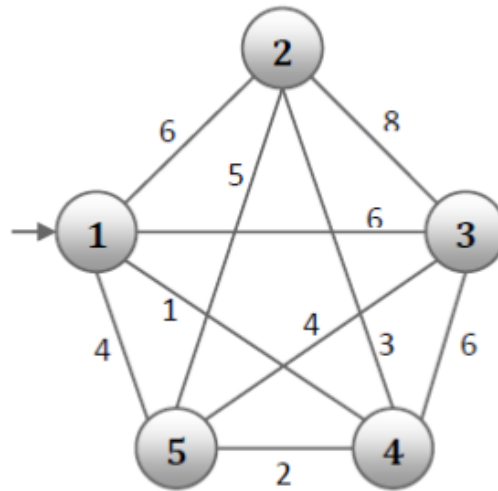


FIGURE 3.3 – Ensemble de villes (noeuds) reliés entre eux par des routes (arcs).

La solution la plus simple est de parcourir les villes dans l'ordre.



FIGURE 3.4 – Une première solution (parcours suivant l'ordre des villes).



FIGURE 3.5 – Le résultat donné par l'algorithme glouton (se décaler d'un sommet vers son plus proche voisin).

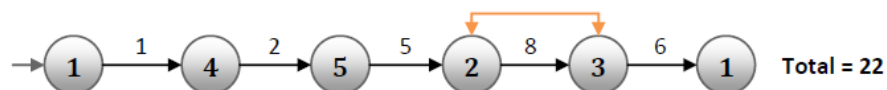


FIGURE 3.6 – Le résultat obtenu en échangeant les sommets 2 et 3.

Dans la **Figure 3.6** : Le résultat obtenu en échangeant les sommets 2 et 3, la distance totale a augmenté. Pour une heuristique classique cette solution est rejetée car la distance doit être minimisée, mais le recuit simulé pourra l'accepter si la température est encore élevée, et cette solution qui est "mauvaise" par rapport à la première va lui permettre de trouver une solution meilleure :

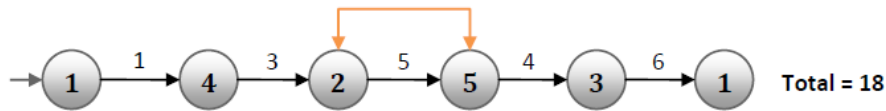


FIGURE 3.7 – Le résultat obtenu en échangeant les sommets 5 et 2.

Le graphique suivant résume les résultats trouvés :

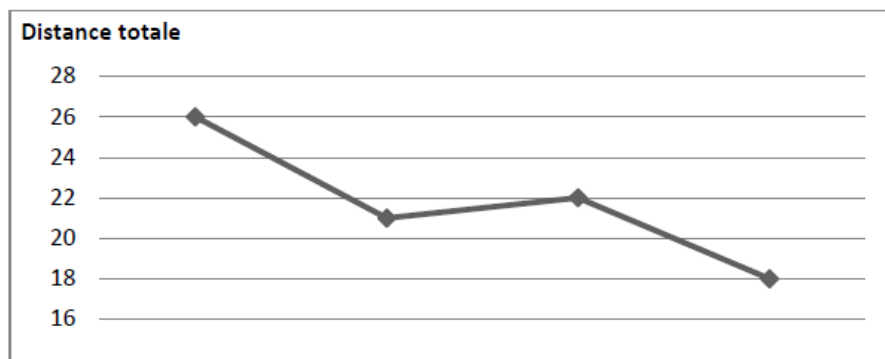


FIGURE 3.8 – les résultats obtenus dans l'exemple.

**En résumé :** Le recuit simulé, en acceptant une mauvaise solution, a réussi à échapper au minimum local et à obtenir une solution meilleure.

### Domaines d'application :

Comme pour toute méta-heuristique, la méthode du recuit simulé peut être appliquée dans de nombreux problèmes d'optimisation, les chercheurs l'ont utilisée essentiellement dans :

- La conception des circuits intégrés (Kirkpatrick, et al., 1988)[18](problème de placement et de répartition);
- Le routage des paquets dans les réseaux;
- La segmentation d'images;
- Le problème du voyageur de commerce;
- Et, le problème du sac à dos.

### 3.3.5 Etat de l'art sur le recuit simulé :

L'algorithme du recuit simulé (SA) est un algorithme d'optimisation intelligent populaire qui a été appliqué avec succès dans de nombreux domaines. Au cours des 30 dernières années, cette méthode a été utilisée pour résoudre de nombreux problèmes complexes d'optimisation, et elle est connue pour sa capacité à produire de bons résultats en un temps de calculs raisonnable.

En optimisation multiobjectif le recuit simulé (RS) a été appliqué après transformation du problème multiobjectif en un problème mono-objectif [41]. Les deux méthodes les plus populaires sont : la méthode MOSA ("Multiple Objective Simulated Annealing") proposée dans [24], ou le RS a été utilisé pour rechercher la surface de compromis, et la méthode PASA ("Pareto Archived Simulated Annealing") proposée dans [42]. Le recuit simulé est aussi adapté pour résoudre les problèmes d'optimisation continue [44].

Dans la littérature, le recuit simulé a aussi bien été utilisé comme outil de partitionnement de graphe [2][15] que comme outil d'affinage d'une partition [9][23][7][35].

Un nombre important d'articles, de conférences et de livres ont également abordé le sujet du recuit simulé dont on cite, son utilisation pour la génération de nombres aléatoires de haute qualité par (Press et al., 2002) [43]. Cher Ming Tan a édité un ouvrage résumant les différentes utilisations du recuit simulé dans diverses branches de l'ingénierie [49]. Une autre utilisation du recuit simulé sur la bifurcation, i.e : détection d'événements catastrophiques, a été présenté dans la conférence internationale [22].

M.C. Cunha et al ont consacré un chapitre explicatif des raisons pour lesquelles des méthodes heuristiques telles que le recuit simulé sont nécessaires pour résoudre les problèmes de développement des systèmes d'eau [32]. De nouveaux algorithmes de recuit simulé (SA) pour le problème de planification de projet soumis à des contraintes de ressources (RCPS) et sa version multimode (MRCPS) ont été présenté par K. Bouleimen [27].

On retrouve aussi des articles issus de conférences "2nd World Conference On Business, Economics And Management" et "ROADEF 14ième congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision" qui détaillent l'utilisation du recuit simulé pour des problèmes de routage de véhicules [21][13].

S.Zhan et al ont présentés un algorithme de recuit simulé basé sur la liste (LBSA) pour résoudre le problème du voyageur de commerce (TSP) [55].

L'article [5] propose un algorithme de recuit simulé évolutif (ESA) pour résoudre le Problème de Réaffectation de Machine Google (GMRP) proposé lors de la compétition ROADEF / EURO Challenge 2012 qui doit être résolu dans les 5 minutes.

Le principal inconvénient du recuit simulé est qu'une fois l'algorithme piégé à basse température dans un minimum local, il lui est impossible de s'en sortir. Plusieurs solu-

tions ont été proposées pour tenter de résoudre ce problème, par exemple en acceptant une brusque remontée de la température de temps en temps, pour relancer la recherche sur d'autres régions plus éloignées(Autin, 2006)[6].

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une formulation de la problématique rencontrée par l'entreprise, à savoir un modèle de gestion de ressources. puis une présentation de la méthode du recuit simulé a été abordée. Le chapitre prochain sera consacré à une résolution numérique du problème.

# 4

## Cas d'étude (Aménagement divers de la station de pompage de Beni-Mansour SBM-DOG1 (W. Bouira))

La modélisation mathématique d'un problème réel est une étape cruciale nécessaire, qui constitue l'étape initiale de la résolution du problème. L'implémentation numérique est la phase illustrative complémentaire de sa résolution. Cette dernière inclue l'utilisation des méthodes de résolution et des logiciels de programmation.

### Sommaire

---

<b>Introduction</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>4.1 Description des travaux</b> . . . . .	<b>47</b>
<b>4.2 Collecte des données</b> . . . . .	<b>48</b>
<b>4.3 L'éclatement des activités</b> . . . . .	<b>49</b>
<b>4.4 Réseau PERT</b> . . . . .	<b>50</b>
<b>4.5 Ressources mises en oeuvre</b> . . . . .	<b>52</b>
<b>4.6 Adaptation de l'algorithme du recuit simulé au problème d'ordonancement</b> . . . . .	<b>54</b>
<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>59</b>

---

Dans ce chapitre, nous allons implémenter le modèle développé sur machine, les méthodes précitées à savoir, le diagramme de Gantt, la méthode Pert et l'algorithme du recuit simulé, seront appliquées en les adoptant au cas des données de l'entreprise, les résultats obtenus seront discutés par la suite.

## 4.1 Description des travaux

Le projet d'aménagement pris en charge par l'entreprise RTC-Sonatrach de Béjaïa consiste à réaliser divers travaux d'aménagement de la station de pompage Beni-Mansour SBM-DOG1 (W. Bouira) qui doivent porter essentiellement sur des :

### ✘ Travaux de démolition et de dépose :

- Dépose de l'abri véhicules légers (10 places) en charpente métallique, situé en face de la nouvelle salle de contrôle ;
- Dépose de l'abri véhicules légers en charpente métallique, situé en face de l'ancienne salle de contrôle ;
- Démolition du magasin/atelier en charpente métallique ;
- Démolition de l'ancienne station d'essence ;
- Démolition de la coopérative et bureau de gestion ;
- Démolition du local transformateur.

### ✘ Travaux de rénovation :

- Restauration et aménagement de l'ancienne salle de contrôle en salles de conférences et archives ;
- Rénovation des peintures pour tous les bâtiments de la station ;
- Rénovation de la plomberie sanitaire pour tous les bâtiments de la station ;
- Rénovation des faux plafonds de la nouvelle salle de contrôle ;
- Rénovation de l'étanchéité des terrasses de tous les bâtiments de la station ;
- Rénovation de l'étanchéité des fenêtres au niveau de la nouvelle salle de contrôle ;
- Rénovation de l'éclairage intérieur de la station ;
- Rénovation de l'éclairage périphérique de la station.

### ✘ Travaux neufs :

- Réalisation d'un bâtiment travaux et maintenance en charpente métallique ;
- Réalisation d'un hangar pour matériels en charpente métallique ;
- Réalisation d'un abri véhicules légers dix (10) places en charpente métallique ;
- Réalisation d'un abri véhicules légers seize (16) places en charpente métallique ;
- Réalisation d'une station d'essence en charpente métallique ;
- Réalisation d'un escalier de secours pour la nouvelle salle de contrôle ;
- Réalisation d'une toiture en charpente métallique pour local transformateur ;
- Réalisation d'une plate-forme de dépôtage de brut ;
- Réalisation d'un réseau de distribution d'eau potable (AEP) à partir de l'unité de traitement des eaux vers tous les bâtiments de la station et le camp DSP ;
- Réalisation d'un réseau de distribution d'eau brut à partir du château d'eau de la station vers tous les bâtiments de la station et le camp DSP ;
- Réalisation de grillage autour de l'abri pompes principales et pompes boosters ;
- Réalisation d'un réseau d'évacuation des eaux usées y compris fosse septique ;



- Réalisation du réseau d'évacuation des eaux pluviales ;
- Réalisation des voiries ;
- Réalisation des espaces verts.

Cet aménagement apportera une modernisation au point de vue aspect architectural et une amélioration dans les conditions de travail et de vie du personnel de la base de vie Beni Mansour (SBM) de Sonatrach.

## 4.2 Collecte des données

Ce projet est constitué de 22 activités dont les noms et les durées estimées par le maître d'oeuvre sont résumées dans le tableau suivant :

La représentation des activités de ce projet sur le diagramme de Gantt est comme suit (voir

Désignation des activités	Description des activités	Prédécesseurs	Durées (en mois)
A	Installation de chantier	/	1/2
B	Dépose et démolition	A	4
C	Terrassement	B	8
D	Infrastructure	C	9
E	Assainissement intérieur	C-D	2
F	Charpente métallique	E	7
G	Maçonnerie	D-F	2
H	Enduis	G	3/2
I	Revêtement	G	3
J	Étanchéité	I	2
K	Ménuiserie	I	1
L	Cuve à carburant	C-D	6
M	Electricité	G	4
N	Plomberie sanitaire	R	1
O	Peinture	F-G-H	2
P	Climatisation	O	1/2
Q	VRD	L-R-S-T	3
R	Réseau AEP	G	2
S	Eaux usées + brachement aux réseaux	E	3/2
T	Eaux pluviales	O	1
U	Nettoyage de chantier	O	2/3
V	Réception des travaux	U	1/3

TABLE 4.1 – Tableau des activités du projet.

la figure 4.1) [47] :

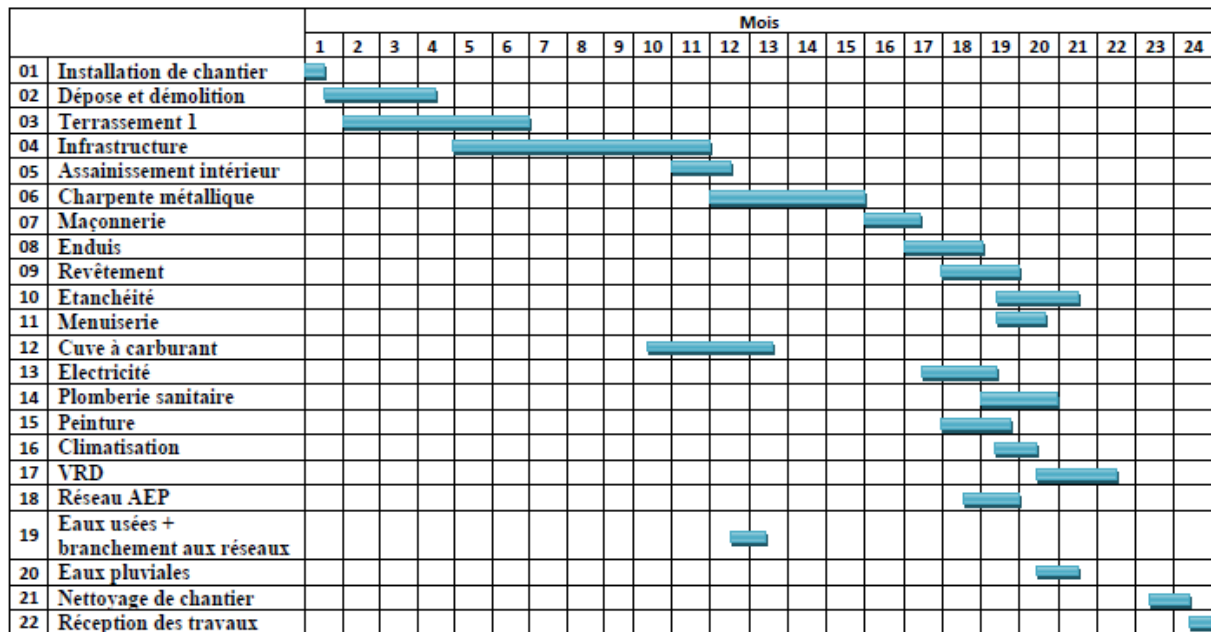


FIGURE 4.1 – Diagramme de Gantt.

Néanmoins, certaines activités n'ayant pas des relations d'antériorités strictes, pour cela, on est obligé de les éclater en sous-activités pour mettre en évidence des relations d'antériorités strictes, afin de pouvoir tracer le réseau PERT.

### 4.3 L'éclatement des activités

On divise les activités n'ayant pas des relations d'antériorités strictes suivantes :

- (B) Dépose et démolition en deux sous activités ;
- (C) Terrassement en trois sous activités ;
- (D) Infrastructure en trois sous activités ;
- (E) Assainissement intérieur en deux sous activités ;
- (F) Charpente métallique en deux sous activités ;
- (G) Maçonnerie en deux sous activités ;
- (H) Enduis en deux sous activités ;
- (J) Etanchéité en deux sous activités.

Après l'éclatement de ses activités, on obtient alors 32 activités. Le tableau suivant représente les 32 activités, les prédécesseurs et leurs durées.

Désignation	Activités	Prédécesseurs	Durées (en mois)
A	Installation de chantier	/	1/2
$B_1$	Dépose et démolition	A	3/2
$B_2$	Dépose et démolition	$B_1$	3/2
$C_1$	Terrassement	$B_1$	3/2
$C_2$	Terrassement	$C_1 + B_2$	3/2
$C_3$	Terrassement	$C_2$	2
$D_1$	Infrastructure	$C_2$	2
$D_2$	Infrastructure	$C_3 + D_1$	4
$D_3$	Infrastructure	$D_2$	1
$E_1$	Assainissement intérieur	$D_2$	1
$E_2$	Assainissement intérieur	$D_2$	1/2
$F_1$	Charpente métallique	$D_3 + E_1$	1/2
$F_2$	Charpente métallique	$E_1$	7/2
$G_1$	Maçonnerie	$E_2 + F_1$	1
$G_2$	Maçonnerie	$F_2$	1/2
$H_1$	Enduis	$G_1$	1/2
$H_2$	Enduis	$G_1$	1/2
I	Revêtement	$G_2 + H_1$	3/2
$J_1$	Étanchéité	$H_2$	1
$J_2$	Étanchéité	I	1
K	Menuiserie	$J_1$	1
L	Cuve à carburant	I	3
M	Electricité	$D_3 + E_1$	2
N	Plomberie sanitaire	$H_1 + G_2$	1
O	Peinture	$H_2$	3/2
P	Climatisation	O	1
Q	Voirie et réseaux divers (VRD)	P	2
R	Réseau AEP	$G_2$	3/2
S	Eaux usées + branchement aux réseaux	$E_2$	1
T	Eaux pluviales	O	1
U	Nettoyage de chantier	Q	1
V	Réception des travaux	U	1/2

TABLE 4.2 – Tableau des activités du projet.

## 4.4 Réseau PERT

On représente ci-dessous le réseau P.E.R.T qu'on a réalisé en utilisant le logiciel "Dia" dont on précise pour chaque activité ; sa date de début au plus tôt, et sa date de début au plus tard :

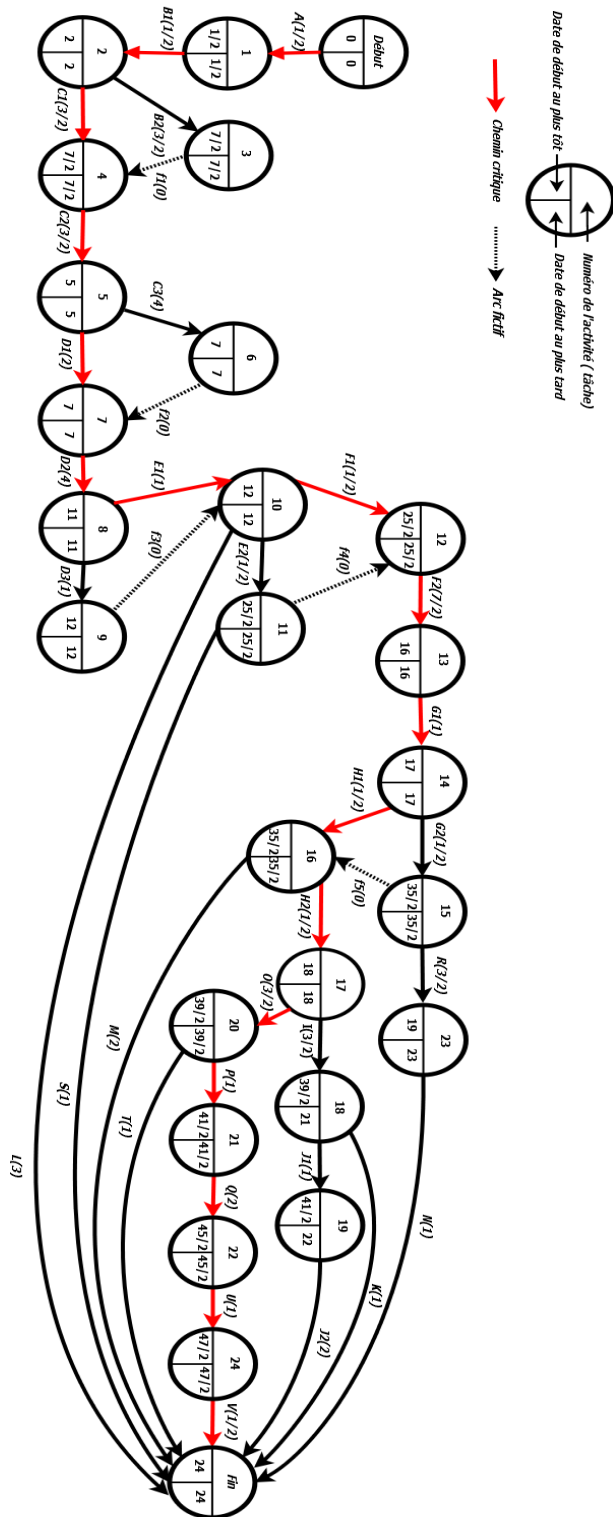


FIGURE 4.2 – Réseau PERT.

L'application de la méthode pert, nous a permis de constater, que la durée du chemin

critique constitué des tâches critiques (  $A, B_1, C_1, C_2, C_3, D_1, D_2, E_1, F_1, F_2, G_1, H_2, O, P, Q, U, V$ ), qui est la durée minimal de réalisation du projet, est de 24 mois (le délai imposer). Ainsi nous obtenons également notre solution de départ qu'on utilisera lors de la résolution avec l'algorithme du recuit simulé.

**Remarque :** Le chemin critique, n'est pas unique.

## 4.5 Ressources mises en oeuvre

Pour l'exécution des activités du projet, l'entreprise de réalisation doit déployer des moyens humains et matériels importants qui devraient être disponibles en quantité. Leurs capacités sont mentionnées dans le tableau suivant :

Notation de la ressource	Ressources	Capacités
$r_1$	Maçon	4
$r_2$	Coffreur	3
$r_3$	Ferrailleur	5
$r_4$	Manoeuvre	4
$r_5$	Peintre	3
$r_6$	Plombier	1
$r_7$	Electricien	2
$r_8$	Chauffeur	3
$r_9$	Conducteur d'engin	5
$r_{10}$	Etanchéiste	2
$r_{11}$	Monteur charpente	5
$r_{12}$	Camion 10 tonnes	2
$r_{13}$	Camion grue	1
$r_{14}$	Grues (20T, 40T)	2
$r_{15}$	Chariot élévateur	1
$r_{16}$	Soudeur charpente	2
$r_{17}$	Ménuisier	2
$r_{18}$	Grutiers	2
$r_{19}$	Retrochargeur	2
$r_{20}$	Compacteur	1
$r_{21}$	Finisher	1

TABLE 4.3 – Tableau des ressources et leurs capacités.

### 4.5.1 Affectation des ressources aux tâches

Les ressources et les capacités nécessaires pour la réalisation de chaque tâche sont résumées dans le tableau suivant (voir le gantt-ressources dans l'annexe) :

N°	Activités	Ressources nécessaires avec leurs capacités
1	Installation de chantier	$r_4(4), r_8(2), r_9(2), r_{12}(2), r_{19}(2)$
2	Dépose et démolition	$r_4(4), r_8(2), r_9(2), r_{12}(2), r_{14}(2), r_{19}(2)$
3	Dépose et démolition	$r_4(2), r_8(2), r_9(1), r_{12}(2), r_{19}(2)$
4	Terrassement	$r_4(2), r_9(1), r_{19}(1)$
5	Terrassement	$r_4(4), r_9(2), r_{19}(2)$
6	Terrassement	$r_4(1), r_9(1), r_{19}(1)$
7	Infrastructure	$r_1(3), r_2(3), r_3(3), r_4(1), r_9(2), r_{13}(1), r_{14}(2), r_{15}(1), r_{18}(1), r_{19}(1)$
8	Infrastructure	$r_1(2), r_2(2), r_3(2), r_4(1), r_9(2), r_{13}(1), r_{14}(2), r_{15}(1), r_{18}(2), r_{19}(2)$
9	Infrastructure	$r_1(3), r_2(3), r_3(3), r_4(1), r_9(2), r_{13}(1), r_{14}(2), r_{15}(1), r_{18}(2), r_{19}(1)$
10	Assainissement intérieur	$r_1(3), r_4(2), r_6(1)$
11	Assainissement intérieur	$r_1(2), r_4(2), r_6(3)$
12	Charpente métallique	$r_4(4), r_8(1), r_{11}(5), r_{13}(1), r_{14}(2), r_{16}(3), r_{18}(2)$
13	Charpente métallique	$r_4(4), r_8(1), r_{11}(5), r_{13}(1), r_{14}(2), r_{16}(3), r_{18}(2)$
14	Maçonnerie	$r_1(3), r_4(4)$
15	Maçonnerie	$r_1(3), r_4(6)$
16	Enduis	$r_1(3), r_4(6)$
17	Enduis	$r_1(4), r_4(4)$
18	Revêtement	$r_1(1), r_4(4)$
19	Étanchéité	$r_4(2), r_{10}(1)$
20	Étanchéité	$r_4(2), r_{10}(1)$
21	Menuiserie	$r_4(2), r_{17}(2)$
22	Cuve à carburant	$r_1(3), r_2(3), r_3(3), r_4(4), r_6(1), r_9(2), r_{19}(1)$
23	Electricité	$r_4(4), r_7(2)$
24	Plomberie sanitaire	$r_4(4), r_6(1)$
25	Peinture	$r_4(2), r_5(2)$
26	Climatisation	$r_4(2), r_7(2)$
27	VRD	$r_1(3), r_4(2), r_9(2), r_{20}(1), r_{21}(1)$
28	Réseau AEP	$r_1(2), r_2(3), r_3(3), r_4(4), r_6(1), r_9(2), r_{19}(2)$
29	Eaux usées	$r_1(3), r_4(4)$
30	Eaux pluviales	$r_4(2), r_6(1)$
31	Nettoyage de chantier	$r_4(2), r_8(2), r_9(1), r_{12}(2), r_{19}(2)$
32	Réception des travaux	/

TABLE 4.4 – Capacités des ressources nécessaires pour chaque activité.

Après l'affectation des ressources nécessaires pour l'exécution de chaque tâches, on voit bien d'après le GANTT ressource (voir l'annexe) qu'il y a une surcharge au niveau des trois ressources, à savoir :

- ✓ **Maçon** ( $r_1$ ) : On a besoin de 6 maçon, mais réellement la capacité de cette ressource est limitée qui est égale à 4 (Voir le diagramme dans l'annexe).
- ✓ **Manoeuvre** ( $r_4$ ) : On a besoin de 12 manoeuvre, mais réellement la capacité de cette ressource est limitée qui est égale à 4 (Voir le diagramme dans l'annexe).
- ✓ **Plombier** ( $r_6$ ) : On a besoin de 4 manoeuvre, mais réellement la capacité de cette ressource est limitée qui est égale à 1 (Voir le diagramme dans l'annexe).

Pour palier à ce problème de surcharge de ressources, nous avons opté pour l'application de l'algorithme du recuit simulé (voir l'organigramme de notre algorithme dans l'annexe).

## 4.6 Adaptation de l'algorithme du recuit simulé au problème d'ordonancement

La formulation du problème d'ordonancement comme présenté précédemment nous amène à résoudre un problème combinatoire NP-dur. Ainsi, certains auteurs ont proposé une énumération des différents chemins possibles pour résoudre ce problème. Dans cette partie nous allons résoudre ce problème en appliquant un algorithme du recuit simulé.

On part du principe que toutes les tâches soient affectées à leurs dates de débuts au plus tôt, on prend la solution initiale  $X_0$  à partir du réseau PERT. Ainsi l'algorithme teste au fur et à mesure l'amélioration de la solution de départ, en créant des chevauchements par rapport aux tâches non critiques. C'est à dire qu'à chaque fois, l'algorithme fait en sorte de changer aléatoirement la date de début d'une tâche non critique, ou autrement dit les tâches dont la marge totale est non nulle (i.e de la date de début au plus tôt à la date de début au plus tard, et vice versa).

Les dates de début au plus tôt et au plus tard de l'ensemble des tâches du projet sont représentées comme suit :

$N^\circ$ d'activité	Désignation d'activité	Dates de debut au plus tôt(en mois)	Dates de début au plus tard (en mois)
1	A	0	0
2	$B_1$	1/2	1/2
3	$B_2$	2	2
4	$C_1$	2	2
5	$C_2$	7/2	7/2
6	$C_3$	5	5
7	$D_1$	5	5
8	$D_2$	7	7
9	$D_3$	11	11
10	$E_1$	11	11
11	$E_2$	12	12
12	$F_1$	12	12
13	$F_2$	25/2	25/2
14	$G_1$	16	16
15	$G_2$	17	17
16	$H_1$	17	17
17	$H_2$	35/2	35/2
18	I	18	18
19	$J_1$	39/2	21
20	$J_2$	41/2	22
21	K	39/2	21
22	L	12	12
23	M	35/2	35/2
24	N	19	23
25	O	18	18
26	P	39/2	39/2
27	Q	41/2	41/2
28	R	35/2	35/2
29	S	25/2	25/2
30	T	39/2	39/2
31	U	45/2	45/2
32	V	47/2	47/2

TABLE 4.5 – Dates de début au plus tôt et au plus tards de toutes les tâches du projet.

### 4.6.1 Ensemble des tâches chevauchées

L'ensemble des tâches chevauchées tel que présenté sur le gantt-ressource (voir l'annexe) et composé des sous ensembles suivants : correspond à un sous ensemble. On dispose



de 11 sous ensemble qui sont composés comme suit :

$w_1=(3;4)$  : C'est à dire que l'activité 3 est chevauchée avec l'activité 4 ;

$w_2=(6;7)$  : C'est à dire que l'activité 6 est chevauchée avec l'activité 7 ;

$w_3=(9;10)$  : C'est à dire que l'activité 9 est chevauchée avec l'activité 10 ;

$w_4=(11;12;22)$  : C'est à dire que les activités 11, 12 et 22 sont chevauchées entre elles ;

$w_5=(13;22;29)$  : Les tâches 13, 22 et 29 sont chevauchées entre elles ;

$w_6=(15;16)$  : Les activités 15 et 16 sont chevauchées entre elles ;

$w_7=(17;23;28)$  : Les activités 17, 23 et 28 sont chevauchées entre elles ;

$w_8=(18;23;25;28)$  : Les activités 18, 23, 25 et 28 sont chevauchées entre elles ;

$w_9=(18;23;24;25)$  : Les activités 18, 23, 24 et 25 sont chevauchées entre elles ;

$w_{10}=(19;21;24;26;30)$  : Les activités 19, 21, 24, 26 et 30 sont chevauchées entre elles ;

$w_{11}=(20;27)$  : Les activités 20 et 27 sont chevauchées entre elles.

**Activités chevauchables** : Les activités qu'on peut chevaucher dans notre cas (délai fixe), sont les activités non critiques (ou les activités ayant la marge totale non nulle i.e la date de début au plus tôt et au plus tard sont différentes), et elles sont représentées dans le tableau suivant :

$N^\circ$ d'activité	Désignation d'activité	Dates de debut au plus tôt(en mois)	Dates de début au plus tard (en mois)
19	$J_1$	39/2	21
20	$J_2$	41/2	22
21	$K$	39/2	21
24	$N$	19	23

TABLE 4.6 – Les tâches chevauchables.

## 4.6.2 Influence des paramètres

L'influence des paramètres est importante, en termes de qualité de la solution mais aussi de performance de l'algorithme. Il convient donc de les choisir avec circonspection.

Quand on résout un problème d'optimisation combinatoire avec une approche heuristique, il s'agit de trouver un bon compromis entre deux objectifs relativement duaux : d'une part il s'agit d'intensifier la recherche autour des zones de l'espace de recherche les plus prometteuses, qui sont généralement proches des meilleures solutions trouvées ; d'autre part il s'agit de diversifier la recherche et favoriser l'exploration afin de découvrir de nouvelles et si possible meilleures zones de l'espace de recherche.

Le comportement de l'algorithme du recuit simulé par rapport à cette dualité entre intensification et diversification peut être influencé en modifiant les valeurs des paramètres. En particulier, la diversification peut être augmentée, soit en diminuant le paramètre de refroidissement  $\alpha \in [0;1]$  soit en augmentant le paramètre de température  $T$ , et de cette façon

la température baissera très lentement, afin d'éviter que l'algorithme puisse être bloqué dans un minimum local, soit en faisant les deux à la fois ( i.e Augmenter le paramètre de température  $T$  et diminuer le paramètre de refroidissement  $\alpha$ ).

### 4.6.3 Paramétrage et résultats obtenus par l'algorithme du Recuit simulé

Les paramètres de l'algorithme du recuit simulé sont variés comme suit :

- **Construction du voisinage** : On choisit aléatoirement le voisinage  $Y$  à partir de la solution initiale  $X$  de façon à ce que toutes les activités soient affectées à leurs dates de début au plus tôt (voir l'annexe), et à chaque étape, on tire au hasard une solution voisine, et ce en créant des chevauchement, en changeant la date de début au plus tôt des tâches non critiques. Si elle est meilleure, on l'adopte ; sinon on cherche d'autres voisinages.
- **Variation de la température** : Par décroissance continue, on fait baisser la température de façon continue.

Les paramètres de l'algorithme du recuit simulé qu'on a testé sont variés comme suit :

Paramètre $T$	Paramètre $\alpha$
10	0.2
100	0.2
1000	0.3
10000	0.5

TABLE 4.7 – Valeurs des paramètres testés.

On a effectué différents tests avec ces paramètres, et on a trouvé une seule amélioration qui a créé un changement quant aux deux sous ensembles de chevauchement  $w_{10}=(19;21;24;26;30)$  tel que l'activité 19 ( $J_1$ ) débute son exécution à sa date de début au plus tard  $\bar{t}=21$ . et le sous ensemble  $w_{11}=(20;27)$  tel que l'activité 20 ( $J_2$ ) débute son exécution à sa date de début au plus tard  $\bar{t}=22$ , chose qui nous a permis d'atténuer la surcharge de la ressource manoeuvre( $r_4$ ) qui est passée de 12 à 8 durant la période du 21<sup>ème</sup> mois jusqu'au 22<sup>ème</sup> mois. Cependant, ceci a créé de nouveaux sous ensembles de chevauchement à savoir ;  $w_{10}\setminus=(21;24;26)$  et le sous ensemble  $w_{11}\setminus=(19;21;26;30)$ .

la nouvelle solution obtenue déterminant le nouveau calendrier d'exécution des tâches est définie comme suit :

$N^\circ$ d'activité	Désignation d'activité	Dates de debut au plus tôt(en mois)	Dates de début au plus tard (en mois)
1	A	0	0
2	$B_1$	1/2	1/2
3	$B_2$	2	2
4	$C_1$	2	2
5	$C_2$	7/2	7/2
6	$C_3$	5	5
7	$D_1$	5	5
8	$D_2$	7	7
9	$D_3$	11	11
10	$E_1$	11	11
11	$E_2$	12	12
12	$F_1$	12	12
13	$F_2$	25/2	25/2
14	$G_1$	16	16
15	$G_2$	17	17
16	$H_1$	17	17
17	$H_2$	35/2	35/2
18	I	18	18
19	$J_1$	21	22
20	$J_2$	22	23
21	K	39/2	21
22	L	12	12
23	M	35/2	35/2
24	N	19	23
25	O	18	18
26	P	39/2	39/2
27	Q	41/2	41/2
28	R	35/2	35/2
29	S	25/2	25/2
30	T	39/2	39/2
31	U	45/2	45/2
32	V	47/2	47/2

TABLE 4.8 – Le calendrier d'exécution des tâches obtenu par le recuit simulé.

#### 4.6.4 Interpretation des résultats

L'application de la méthode du recuit simulé nous a permis de réaliser un calendrier d'exécution des tâches du projet avec une diminution du taux de surcharge de la ressource

( $r_4$ ) qui est passée de 12 à 8 manoeuvres, durant la période du 21<sup>ème</sup> mois jusqu'au 22<sup>ème</sup> mois, sans dépasser la capacité des autres.

Les autres surcharges des ressources maçon et plombier n'ont pas été éliminées, car on a exploiter tous les chevauchements possibles, sachant qu'on dispose de peu de tâches chevauchables.

La différence entre le nouveau calendrier d'exécution des activités et l'ancien, se situe au niveau des dates de début au plus tôt et au plus tard des deux activités  $J_1$  et  $J_2$ . Cette nouvelle solution est réalisable car elle vérifie les contraintes du modèle mathématique, et il ne peut y avoir une autre amélioration que celle-ci, car on a testé tous les chevauchements possibles avec le peu d'activités chevauchables dont on dispose. De ce fait, on valide cette dernière; tout en envisageant d'augmenter les capacités des ressources ayant une surcharge (Maçon, Manoeuvre et plombier).

Pour la valeur de la fonction objectif, c'est à dire la capacité globale des ressources (somme des capacités globale de chaque ressource) affectées aux tâches par rapport au temps, on a obtenu  $H(x) = 284$ .

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier lieu, le cas d'étude (Aménagement divers de la station de pompage de Beni-Mansour SBM-DOG1 (W. Bouira) que la RTC-Béjaia nous a confié, en faisant une description de l'ensemble des travaux à réaliser. Par la suite, nous avons essayer de résoudre le problème avec les approches de résolution appropriées à savoir, la méthode pert et le recuit simulé. Nous avons pu en résumé réaliser le calendrier d'exécution de toutes les activités constituants le projet, et diminuer la surcharge de la ressource manoeuvre ( $r_4$ ) qui est passée de 12 à 8 manoeuvres durant la période du 21<sup>ème</sup> mois jusqu'au 22<sup>ème</sup> mois sans dépasser la capacité des autres; et ce, en créant de nouveaux chevauchements possible.

Cependant afin d'éliminer toutes ces surcharges de ressources et réaliser le projet dans le délai fixé, une augmentation de la capacité de ces dernières est envisageable (à savoir, la ressource maçon, la ressource manoeuvre, et la ressource plombier).

# Conclusion Générale

” Il n’y a pas de problèmes qu’on se pose, il y a des problèmes qui se posent, il n’y a pas de problèmes résolus, il y a des problèmes plus ou moins résolus.”  
[Henri Poincaré]

La recherche en ordonnancement a beaucoup approfondi ses résultats ces dernières années. Les contraintes prises en compte dans les travaux récents sont de plus en plus complexes. Dans notre étude, nous avons essayé de traduire les objectifs des dirigeants de l’entreprise RTC-Sonatrach de Béjaïa, ainsi que les différentes contraintes rencontrées dans l’ordonnancement du projet ”Aménagement divers de la station de pompage de Beni-Mansour SBM-DOG1 (W. Bouira)”, en équations mathématiques, qui résument à la fois les contraintes temporelles et de chevauchement des ressources limitées, liées aux différentes tâches ainsi que la contrainte imposée, par les dirigeants de l’entreprise, afin de réaliser le projet dans le délai imposé.

L’objectif de ce travail était de présenter une solution au problème d’ordonnancement de projet sous contraintes de ressources (RCPSP), solution qui prendra en compte aussi bien l’aspect temps que l’aspect ressource. En effet, ces critères sont importants dans la planification des projets aux entreprises de réalisation.

Dans un premier temps, nous avons centré notre étude sur la modélisation du problème sous forme d’un problème d’ordonnancement en maximisant l’utilisation des ressources ; tout en respectant la durée totale du projet, pour résoudre ce modèle nous avons utilisé la méthode P.E.R.T afin d’avoir la situation de départ et vérifier le délai qui est fixé à 24 mois. Pour l’application de cette dernière, nous avons dû faire un éclatement de tâches pour satisfaire les relations d’antériorités afin de construire le réseau pert, autrement dit, on a supprimé quelques chevauchements d’activités. Néanmoins, ayant un nombre limité de ressources, quelques surcharges de ressources se sont créées.

Pour palier à ce problème de surcharge de ressources, on a appliqué une métaheuristique qui est l’algorithme du recuit simulé, avec lequel quelques conflits des charges de travail ont pu être atténués, et ce en créant des chevauchements, et en diminuant la surcharge de quelques ressources sans dépasser la capacité des autres ressources.

Globalement, l'application de cette méthode nous a permis de réaliser le calendrier d'exécution de l'ensemble des activités du projet tout en diminuant le taux de quelques surcharges de ressources, notamment la ressource manoeuvre ( $r_4$ ) qui est passée de 12 à 8 manoeuvres durant la période du 21<sup>ème</sup> mois jusqu'au 22<sup>ème</sup> mois.

Jean Orizet a dit :” Un poème n'est jamais terminé, il est abandonné.” Il en va de même pour ce travail, car il reste beaucoup de chemin à explorer. Notre étude peut être continuée dans plusieurs directions.

Parmi les perspectives envisagées :

- Augmenter la capacités des ressources en surcharge.
- Appliquer l'heuristique de lissage "Burgess-Killebrew", afin d'éliminer les surcharges de ressources.
- Recherche d'une méthode performante d'ordonnancement des tâches d'un projet dans le but d'optimiser les délais des projets mis en appel d'offre afin d'éviter d'éventuelles surprise lors de la réalisation.
- Etude comparative parmi toutes les méthodes déjà vue dans le but d'implémenter la plus efficace pour l'entreprise.

# Bibliographie

- [1] A. BOUFADENE, AND A. BOUCHILAOUNE. L'algorithme de colonies de fourmis pour l'ordonnancement des tâches d'un projet. cas de la cité béni mansour, sonatrach. Memoire de fin d'étude, Université A.Mira, 2014/2015.
- [2] A. MCGEOCH, D. S. C. R. L., AND SCHEVON, C. *Optimization by simulated annealing : an experimental evaluation*. graph partitioning. Operations Research Society of America, 1989.
- [3] ARTIGUES, AND DEMASSEY. Gestion de projet, dans gestion de production et ressources humaines : Méthodes de planification dans les systèmes productifs.
- [4] A. SARMIENTO, AND R. NAGI. *review of integrated analysis of production-distribution systems*. 1999.
- [5] AYAD, T., NASSER, S., AND ANDY, S. An evolutionary simulated annealing algorithm for google machine reassignment problem (2016). 431–442.
- [6] B. AUTIN. Les métaheuristiques en optimisation combinatoire. Mémoire de fin d'études, Conservatoire National Des Arts et Metiers. -PARIS, 2006.
- [7] B. MONIEN, R. R., AND C. SPRÄNER. *Combining Helpful Sets and Parallel Simulated Annealing for the Graph-Partitioning Problem*. *Parallel Algorithms and Applications*. 1996, pp. 50, 62.
- [8] C. GELATT, S., AND M. VECCHI. *Optimization by simulated annealing*. Science. 1983.
- [9] C. MARTIN, O., AND W. OTTO, S. *Combining Simulated Annealing with Local Search Heuristics*. 1996.
- [10] C. REEVES. *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. Advances topics in computer science. Mc Graw-Hill, 1995.
- [11] C. TERWIESCH, AND LOCH. *Measuring the effectiveness of overlapping development activities*. Management Science. 1999.
- [12] DAYAN, A. *Manuel de Gestion*, 1999.
- [13] D. C. DANG, S., AND A. MOUKRIM. Un algorithme de recuit simulé pour le problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps et contraintes de synchronisation (2013). ROADEF.
- [14] D. OLIVIER. Méthode du recuit simulé. Rapport, 2001.
- [15] D. WILLIAMS, R. *Performance of Dynamic Load Balancing Algorithms for Unstructured Mesh Calculations*. 1991. Concurrency.

- [16] EL-D.TALBI. *Sélection et réglage de paramètres pour l'optimisation de logiciels d'ordonnancement industriel*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, France, 2004.
- [17] GAREY, M., AND JOHNSON, D. *A guide to the theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman and Company, 1979.
- [18] GELATT, K., AND VECCHI. Optimization by simulated annealing. *Science, New Series* (13 Mai 1988), 671–680.
- [19] G.KENDALL. Ai methods -simulated annealing. Rapport :complément de cours, Nottingham University, 2013.
- [20] HARTMANN, AND KOLISCH. Experimental investigation of heuristics for resource constrained project scheduling. *European Journal of Operational Research* (2006).
- [21] İLKER KÜÇÜKOĞLU, N. O. Simulated annealing approach for transportation problem of cross-docking network design. *2nd World Conference On Business, Economics And Management- WCBEM* (2013).
- [22] I.ZELINKA, D.DAVENDRA, R. R. Evolutionary techniques and its possibility to identify catastrophic events - an extended study (2011). 17th International Conference on SoftComputing, Brno University of Technology, pp. 73–79.
- [23] J.ORTEGA, R. C., AND F.G.MONTOYA. *Heuristic Algorithm for Graph Partitioning*. n Proceedings of the European Workshop on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization : Multilevel, 2003, pp. 50, 62, 173.
- [24] J.TEGHEM, E., AND D.TUYTTENS. Mosa method : a tool for solving multiobjective combinatorial optimization problems. *Journal of Multicriteria Decision Analysis* 20 (1999), 221–236.
- [25] J.TURNER. Do you manage work, deliverables or resources ? *International Journal of Project Management* (2000), 18.
- [26] KADI, S. Ordonnancement de projet à l'aide d'un algorithme génétique. Mémoire de fin de cycle en recherche opérationnelle., Université A.Mira Béjaia, 2013.
- [27] K.BOULEIMEN, AND H.LECOCQ. A new efficient simulated annealing algorithm for the resource constrained project scheduling problem and its multiple mode version. *European Journal of Operational Research* (2003), 268–281.
- [28] K.NEUMANN, AND J.ZIMMERMANN. *Project Scheduling with Time Windows and Scarce Resources*. Berlin, 2003.
- [29] K.ZIDI. *Système interactif d'aide au déplacement multimodal(Siad)*. Thèse de doctorat, Ecole centrale de lille, France, 2006.
- [30] LENSTRA, J. B. J., AND KAN, A. R. *Scheduling subject to resource constraints : Classification and complexity*. 1983.
- [31] LIACS. Simulated annealing. Rapport, Leiden University, 2009.
- [32] M.C.CUNHA, AND A.ANTUNES. *Simulated Annealing Algorithms For Water Systems Optimization*. Transaction WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering, 2012, ch. 10.



- [33] M.DJABOUT, AND N.NASRI. Minimisation bicritère entre la durée et le coût d'ordonancement d'un projet avec ressources limitées, cas de sonatrach. These, université A.Mira Béjaia, Juillet 2016.
- [34] MESGHOUNI, K. *Application des algorithmes évolutionnistes dans les problèmes d'optimisation en ordonnancement de la production*. PhD thesis, Ingénieur électronicien de l'université de Constantine. se présentée à l'université des sciences et technologies de lille pour obtenir le titre de docteur.
- [35] M.G.MONTOYA, C. R., AND J.GOMEZ. *Performance of Simulated Annealing, Tabu Search, and Evolutionary Algorithms for Multi-objective Network Partitioning*. 2006, pp. 18, 62.
- [36] MICHELON, C. P., AND REUSSER, S. Insertion techniques for static and dynamic resource constrained project scheduling. *Eu. Journal. of Op. Res* (2003), 149, 249–267.
- [37] M.PALPANT. *Recherche exacte et approchee en optimisation combinatoire : schemas d.integration et applications*. These de doctorat, Universite d.Avignon, 2005.
- [38] NASSEREDDINE, M. *Algorithmes de construction de graphes dans les problèmes d'ordonnancement de projet*. Thèse de doctorat, Université Farhat abbas-setif, 2011.
- [39] N.DERADRA, AND N.KEDJAR. Ordonnancement du projet de rénovation de la base de vie de la station de pompage sp3-ob1 (w. m'sila). Mémoire de fin d'étude, Université A.Mira, Béjaia, 2017.
- [40] N.MAHFOUF, AND B.RAMDANI. Planification et ordonnancement d'un projet à moyens limitées au sein de l'engtp. Master's thesis, 2016/2017.
- [41] N.SRIVINAS, AND K.DEB. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. Tech. rep., Institute of Technology,India, Departement of Mechanical Engineering, 1993.
- [42] P.ENGRAND. A multi-objective approach based on simulated annealing and its application to nuclear fuel management (1997). 5th International Conference on Nuclear Engineering, pp. 416–423.
- [43] P.RUSSEL, AND J.NORVIG, S. Artificial intelligence :a modern approach (2nd edition). *Prentice Hall* (2002).
- [44] P.SIARRY ;, AND G.BERTHIAU. Fitting of tabu search to optimize functions of continuous variables. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 40 (1997), 2449–2457.
- [45] R.AÏM. *les fondamentaux de la gestion de projet*. 2011.
- [46] S.DOUAR. La programmation linéaire multiobjectif. Mémoire de magister, Université A.Mira, Béjaia, 2001.
- [47] SONATRACH, BEJAIA. *Dossier d'appel d'offres, aménagement de la station de pompage Beni-Mansour SBM-DOG1 (W. Bouira)* (2017).
- [48] É.TAILLARD, J. A., AND P.SIARRY. *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. Paris, septembre 2003.

- 
- [49] TAN, C. M., Ed. *Simulated Annealing*. InTech Published, september 2008.
- [50] T.H.NGUYEN. *Contribution à La Planification de projet : Proposition d'un modèle d'évaluation des scénarios de risque-projet (2011)*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, septembre 2011.
- [51] V.CERNY. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem : An efficient simulation algorithm. *JOURNAL OF OPTIMIZATION THEORY AND APPLICATIONS* 45 (JANUARY 1985), pp 41–51.
- [52] WATERS, P., AND WOLFE. *Multi-project scheduling with limited resources : a zero-one programming approach*. Management Science, 1969.
- [53] W.LARSON, E., AND F.GRAY, C. *Management de projet*, dunod, paris ed. 2007.
- [54] Z.L.CHEN. *Integrated Production and Outbound Distribution Scheduling : Review and Extensions*. Oper. Res. 2010.
- [55] Z.ZHANG, S. J., AND Y.ZHONG. List-based simulated annealing algorithm for traveling salesman problem. *Computational Intelligence and Neuroscience* (2016), 12.

## Annexe

Les trois diagrammes suivants représentent l'évolution des ressources (Maçon, Manoeuvre, Plombier) par rapport aux temps :

**Diagramme d'utilisation de la ressource Plombier avant et après résolution :**  
On représente le diagramme d'utilisation de la ressource plombier avec surcharge comme suit :

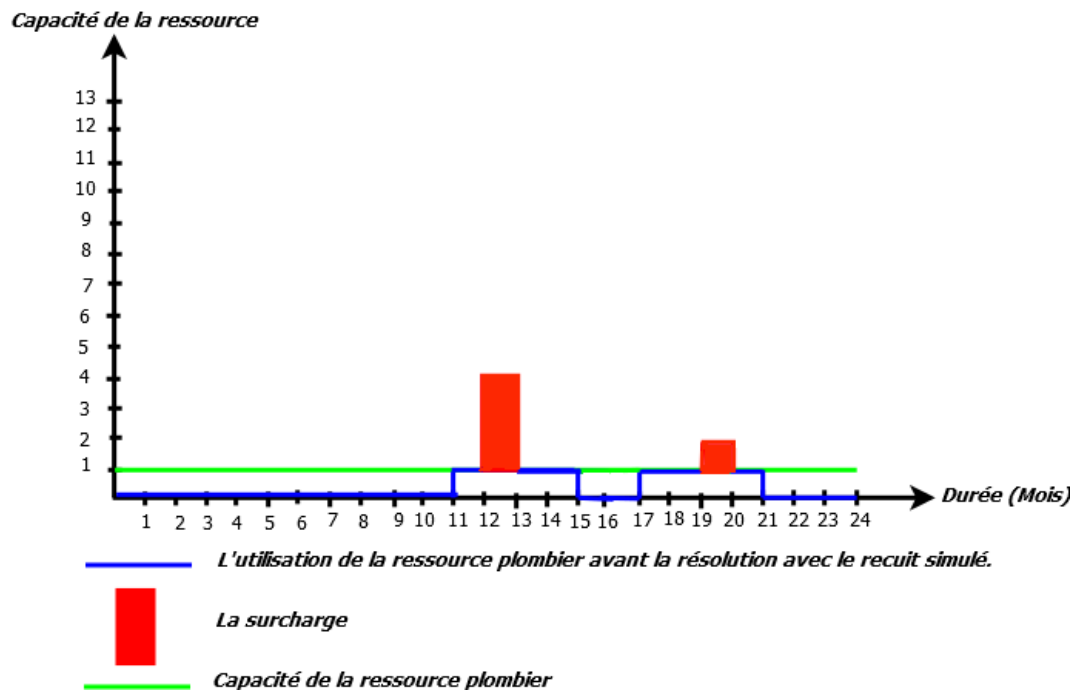


FIGURE 4.3 – Diagramme de la ressource plombier avant et après résolution.

**Diagramme d'utilisation de la ressource Maçon avant et après résolution :** On représente le diagramme d'utilisation de la ressource maçon avec surcharge comme suit :

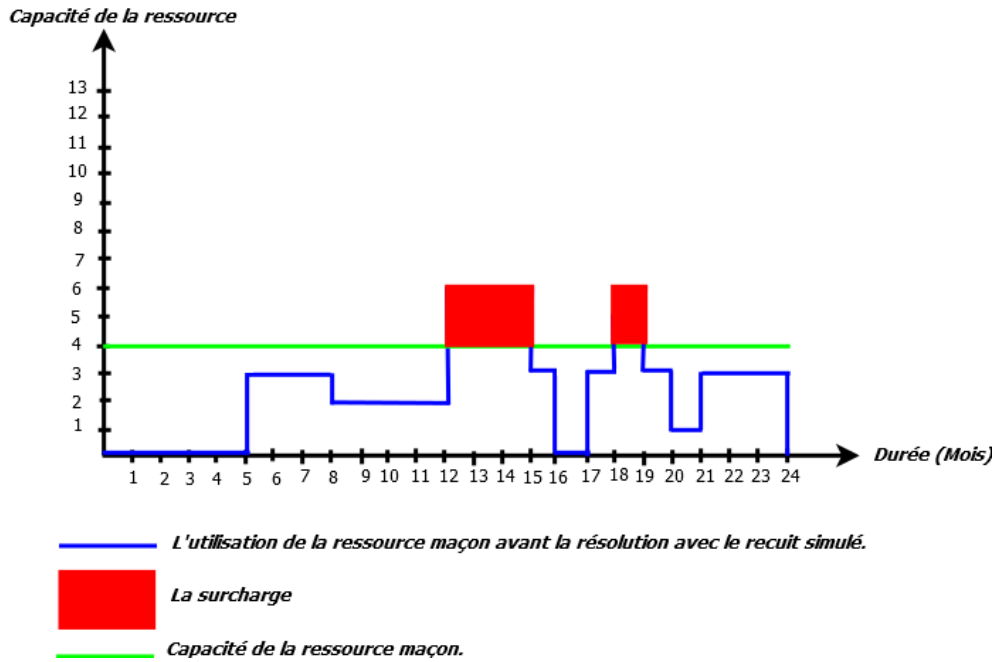


FIGURE 4.4 – Diagramme de la ressource maçon avant et après résolution.

**Diagramme d'utilisation de la ressource Manoeuvre avant et après résolution :**  
 On représente le diagramme d'utilisation de la ressource manoeuvre avec surcharge, et après diminution du taux de la surcharge comme suit :

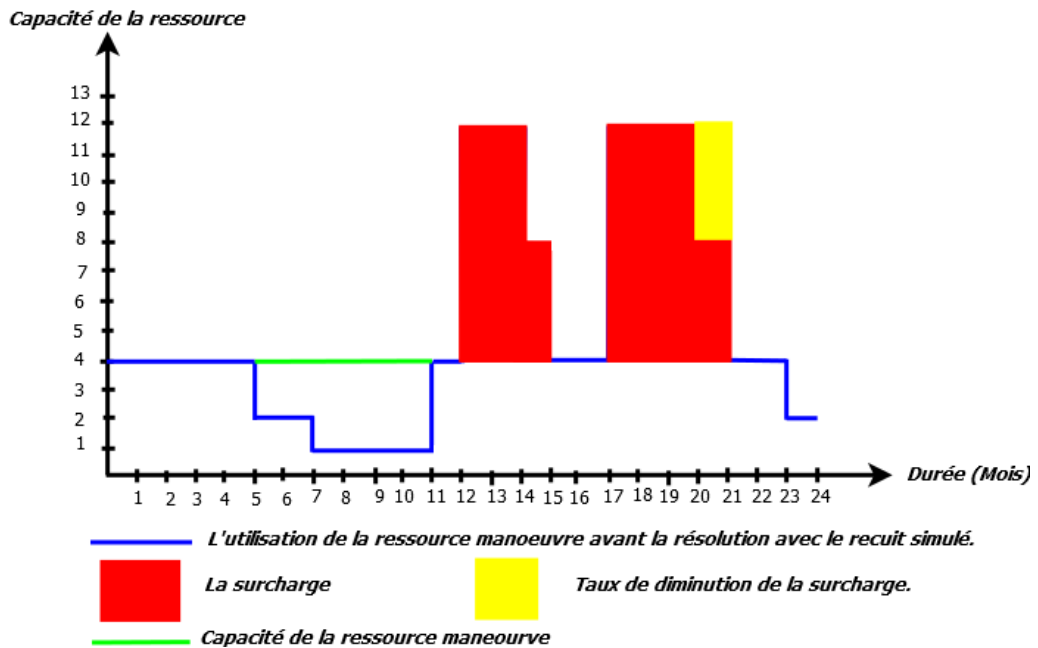


FIGURE 4.5 – Diagramme de la ressource manoeuvre avant et après résolution.

**Organigramme du recuit simulé :** Nous décrivons le principe de notre algorithme dans l'organigramme suivant :

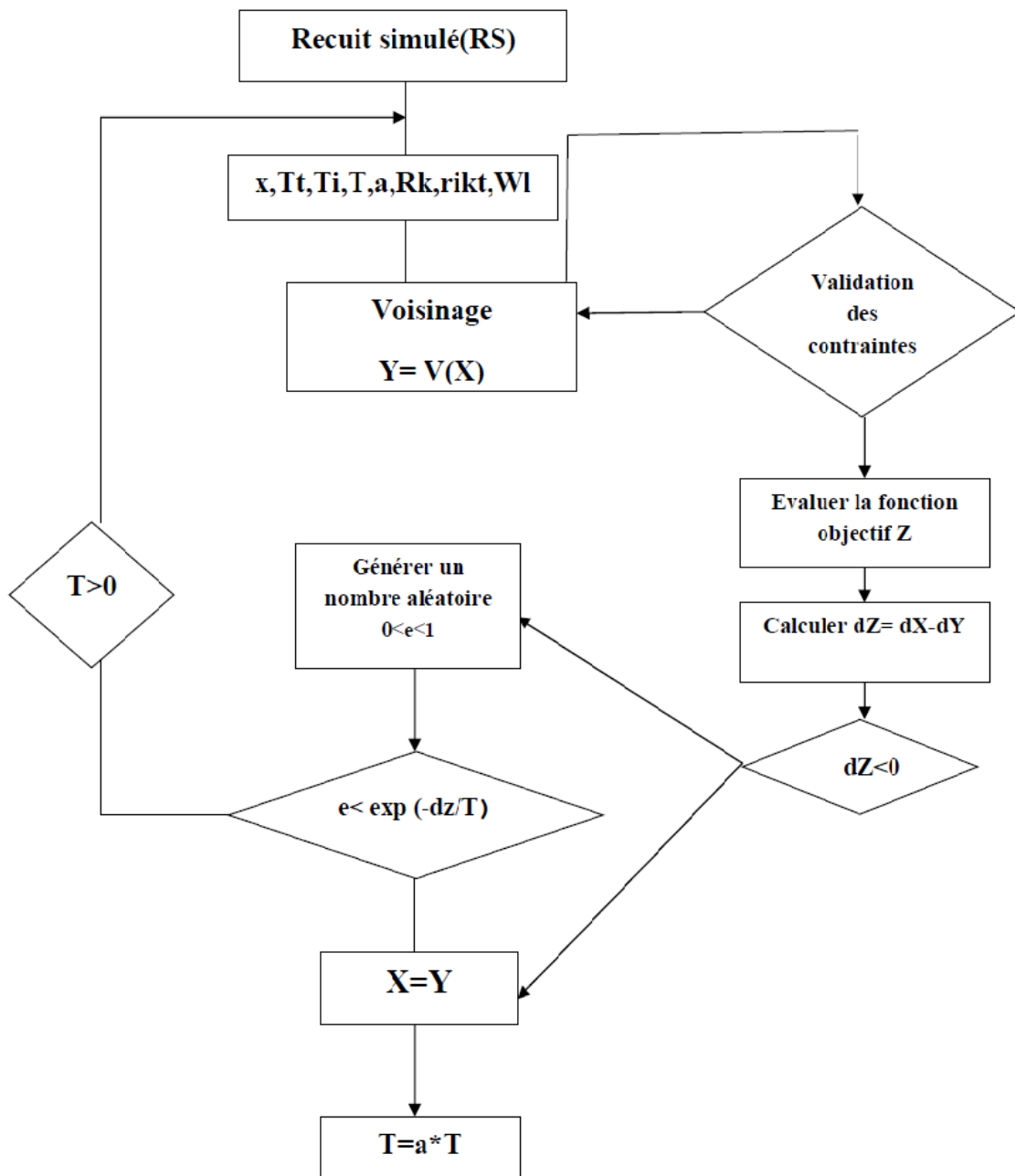


FIGURE 4.6 – Organigramme du recuit simulé