

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. Mira Béjaïa  
Faculté des Sciences Exactes

Département de Recherche Opérationnelle



## *Mémoire de fin de cycle*

En vue d'obtention du diplôme de Master

Spécialité

Modélisation Mathématique et Techniques de Decision

En

Recherche Opérationnelle

## Thème

---

*Minimisation bicritère entre la durée et le coût d'ordonnancement  
d'un projet avec ressources limitées  
Cas d'un projet de Sonatrach*

---

Présenté par :

*M<sup>r</sup>* DJABOUT Mohammed Abd eldjilil

*M<sup>r</sup>* NASRI Narim

Devant le jury composé de :

Encadreur	<i>M<sup>r</sup></i> BIBI Mohand Ouamer	Professeur	Université A. Mira
Co-encadreur	<i>M<sup>r</sup></i> AIT IDIR Habib	Ingénieur	Sonatrach
Président	<i>M<sup>r</sup></i> KHIMOUM Nouredine	M.A.A	Université A. Mira
Examineur	<i>M<sup>r</sup></i> BRAHMI Belkacem	M.C.B	Université A. Mira
Examinatrice	<i>M<sup>me</sup></i> HALIMI Naouel	M.A.A	Université A. Mira

Promotion Juillet 2016

# Remerciements

Avant toute chose, nous tenons à remercier le bon Dieu tout puissant de nous avoir procuré la force et le courage nécessaire afin de mener à terme ce modeste travail.

Par la suite nous tenons à remercier nos parents et nos familles qui ont toujours été là pour nous soutenir et nous encourager durant toutes nos études.

Nous adressons notre chaleureuse reconnaissance à Mr M.O.BIBI d'avoir accepté de nous guider dans ce travail. Nous tenons sincèrement à le remercier pour sa disponibilité, ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons aussi à remercier très profondément Mr H.AIT IDIR pour son encadrement moral et sa disponibilité à nous faciliter beaucoup de choses, ainsi que les conseils et la confiance qu'il nous a prodigués, cette personne a été primordiale à l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons à présenter notre sincère reconnaissance aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Nos plus chaleureux remerciements iront à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, ma mère qui m'a encouragé et soutenu durant toute ma vie et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents ;

Mon frère Bouabdellah et ma soeur Racha ;

Ma grande mère que dieu la garde pour nous ;

Toute ma famille ;

Tous mes amis plus particulièrement : Ahmed, Salah, Azzedine, Fouad.

Mohammed Abd eldjilil

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents en premier lieu, sans eux je n'aurais jamais eu tout ce courage ou toute cette envie de réussir, eux qui m'ont toujours soutenu, partagé mes peines et mes joies ;

Mon frère Jigou qui a toujours été là au moindre besoin ;

Mon grand père que dieu le garde pour nous ;

Ma jolie fiancée Dihia ;

Ma famille, mes oncles et tantes, cousins et cousines ;

Mes frères de coeur : Massi l'Emigré, Momow, Loucif, Mehdi, Lotfi, Sota, Messi qui se sont sacrifiés pour moi.

Narim

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>9</b>
<b>1 Présentation de l'entreprise</b>	<b>11</b>
1.1 Présentation de SONATRACH . . . . .	11
1.1.1 Historique . . . . .	11
1.1.2 Activités . . . . .	11
1.1.3 Activité Transport par canalisation . . . . .	12
1.1.4 La Région Transport Centre-Béjaia(RTC) . . . . .	12
1.1.5 Organigramme de l'entreprise . . . . .	13
1.2 Présentation des différentes structures de la RTC . . . . .	14
1.2.1 Sous-direction Exploitation (SDE) . . . . .	14
1.2.2 Sous-Direction Administratif (SDA) . . . . .	15
1.2.3 Sous-Direction Finance et Juridique (SDFJ) . . . . .	16
1.2.4 Sous-Direction Technique (SDT) . . . . .	16
1.2.5 Autres structures de la RTC . . . . .	19
<b>2 Management et ordonnancement de projet</b>	<b>20</b>
2.1 Historique du management de projet . . . . .	20
2.2 Définition de gestion de projet . . . . .	22
2.3 Le Projet . . . . .	23
2.3.1 Caractéristiques d'un projet . . . . .	23
2.3.2 Acteurs du projet . . . . .	24
2.3.3 Cycle de vie d'un projet . . . . .	25
2.3.4 La planification du projet . . . . .	25
2.3.5 Les éléments du plan . . . . .	28
2.3.6 Management des coûts . . . . .	30
2.3.7 Suivi de projet . . . . .	32

2.4	L'ordonnancement de projet . . . . .	32
2.4.1	Introduction . . . . .	32
2.4.2	La fonction ordonnancement . . . . .	32
2.4.3	Définition d'ordonnancement . . . . .	33
2.4.4	Les tâches . . . . .	33
2.4.5	Les ressources . . . . .	35
2.4.6	Les contraintes . . . . .	36
2.5	Domaines d'application d'ordonnancement . . . . .	37
2.6	Les objectifs d'ordonnancement . . . . .	37
2.7	Caractéristiques générales des ordonnancements . . . . .	38
2.7.1	Ordonnements statique et dynamique . . . . .	38
2.7.2	Ordonnements admissibles . . . . .	38
2.7.3	Ordonnements actifs et semi-actifs . . . . .	38
2.7.4	Ordonnements sans retard . . . . .	38
2.7.5	Ordonnement préemptif et non préemptif . . . . .	39
2.8	Classification des problèmes d'ordonnancement . . . . .	39
2.9	Ordonnement de projets avec contraintes de ressources . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation</b>	<b>41</b>
3.1	Optimisation combinatoire . . . . .	41
3.2	Optimisation multicritère . . . . .	42
3.2.1	Définitions de base . . . . .	42
3.2.2	Approches de résolution des problèmes multicritères . . . . .	43
3.3	Les méthodes d'optimisation multicritère . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Modélisation d'ordonnancement d'un projet et approche de résolution</b>	<b>51</b>
4.1	Position de problème . . . . .	51
4.2	Modélisation du problème . . . . .	52
4.2.1	Variables de décisions . . . . .	52
4.2.2	les contraintes . . . . .	52
4.2.3	Fonction objectif . . . . .	52
4.3	Minimisation de la durée d'un projet avec ressources limitées . . . . .	52
4.3.1	Formulation du problème . . . . .	52
4.4	Minimisation d'un budget additionnel . . . . .	54
4.5	Modèle du compromis durée/coût . . . . .	56
4.6	Approche de résolution adoptée . . . . .	57
4.6.1	Recherche Tabou . . . . .	57

4.7	Adaptation de la méthode à la minimisation bicritère . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Étude de cas</b>	<b>61</b>
5.1	Collecte des données . . . . .	61
5.1.1	Description des travaux(les différents lots) . . . . .	61
5.1.2	Délai de réalisation . . . . .	61
5.1.3	Les ressources disponibles (humaines et matérielles) . . . . .	62
5.1.4	Les différentes activités constituant chaque lot . . . . .	62
5.2	Élaboration du programme des travaux . . . . .	65
5.3	Planning de réalisation . . . . .	68
5.4	Application de l'algorithme Tabou . . . . .	70
5.4.1	Interprétation des résultats . . . . .	72
5.4.2	Comparaison des résultats . . . . .	72
	<b>Conclusion générale</b>	<b>73</b>
	<b>Annexe</b>	<b>74</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>79</b>

# Table des figures

1.1	Organigramme de la RTC - Bejaia . . . . .	14
1.2	Organigramme du département travaux neufs . . . . .	17
2.1	Les objectifs du projet . . . . .	23
2.2	Cycle de vie d'un projet . . . . .	25
2.3	Vue d'ensemble du management des coûts du projet [35]. . . . .	31
2.4	Typologie des problèmes d'ordonnancement par les ressources . . . . .	35
3.1	Classification des méthodes d'optimisation combinatoire multicritère . . . . .	45
3.2	Divisé en sous-problèmes . . . . .	46
4.1	L'algorithme d'accélération avec Tabou . . . . .	59
5.1	La représentation de relation fin-début . . . . .	67
5.2	La représentation de relation fin-fin . . . . .	67
5.3	La représentation de relation début-fin . . . . .	68
5.4	La représentation de relation début-début . . . . .	68
5.5	Le diagramme de Gantt . . . . .	69
5.6	Le réseau PERT . . . . .	70
5.7	Diagramme de Gantt obtenue par l'algorithme Tabou (1 <sup>er</sup> cas) . . . . .	77
5.8	Diagramme de Gantt obtenue par l'algorithme Tabou (2 <sup>me</sup> cas) . . . . .	78



# Liste des tableaux

2.1	Exemple de contraintes cumulatives . . . . .	36
5.1	Tableau récapitulatif des tâches . . . . .	67

# Introduction générale

L'élaboration d'un outil de gestion de projet pouvant répondre à plusieurs objectifs qui peuvent être parfois complexes, est l'une des principales préoccupations de tout gestionnaire soucieux d'atteindre une politique optimale de gestion. Pour répondre à cette préoccupation, il est nécessaire de comprendre ce que signifie la gestion de projet. Cette dernière n'est pas seulement une ancienne discipline, mais c'est aussi celle que nous avons toujours appliquée sans se rendre compte. Elle n'est devenue "scientifique" que lorsque nous avons compris que pour avoir un meilleur résultat, on doit réaliser une activité où l'observation et l'expérience se combinent à la théorie.

Si on dispose d'un budget illimité et de tout le temps nécessaire à la réalisation, la gestion de projet serait plutôt facile. En réalité, le temps et l'argent sont des facteurs déterminants et, par conséquent, la gestion de projet devient une compétence importante à maîtriser. Dans la vie d'aujourd'hui, où on compte une infinité de projets qui se réalisent, on remarque que ces projets n'atteignent pas souvent leurs objectifs à cause du dépassement de délais ou des surcoûts importants.

Au niveau de la gestion de projets, il est important de bien distinguer ordonnancement et 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. Au sein de ce groupe de problèmes, l'un des plus généraux est l'ordonnancement de projet à moyens limités ou RCPS (Resource-Constrained Project Scheduling Problem), qui est l'un des problèmes d'ordonnancement cumulatif les plus connus, du fait de l'intérêt que lui ont accordé les chercheurs du domaine de la recherche opérationnelle et de ses nombreuses applications industrielles.

La résolution de ce type de problème d'optimisation combinatoire difficile a déjà fait l'objet de nombreuses études [29, 30]. Les travaux visant à résoudre ce problème portent sur les méthodes de résolution exacte et les méthodes approchées. Ces travaux s'appuient sur des outils théoriques divers comme la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE), la programma-

tion par contraintes, les heuristiques et métaheuristiques, et les méthodes exactes. En dépit de tous les travaux effectués pour la résolution de ce problème, il n'existe pas de méthodes exactes permettant de résoudre systématiquement des instances de plus de soixante activités [28].

Vu que le problème proposé par la société Sonatrach, RTC de Bejaia, comporte un nombre important de tâches, nous nous intéressons alors aux problèmes combinatoires qui comportent plusieurs objectifs. On parle alors d'optimisation combinatoire multicritère. Ce domaine possède ses sources dans les travaux d'Edgeworth [17] et de Pareto [18] dans le cadre d'études d'économie au 19<sup>me</sup> siècle. Cependant, l'optimisation multicritère connaît un intérêt croissant depuis le milieu des années 1980 et le domaine connaît une expansion importante depuis le milieu des années 1990 avec l'apparition de méthodes évolutionnaires pour l'optimisation multi-objectifs. Actuellement, l'optimisation multicritère est appliquée dans de nombreux domaines académiques et industriels. De manière formelle, un problème d'optimisation multicritère est un problème dont la solution optimale n'est pas de type classique, mais représente un ensemble de solutions de compromis, appelées aussi solutions efficaces.

Notre étude se base donc principalement sur la modélisation et la résolution du RCPSP qui consiste en l'accélération du projet en mettant l'accent sur le compromis durée/coût. Nous présentons une approche basée sur l'algorithme Tabou pour l'accélération de projets de taille importante, permettant de minimiser le temps de réalisation tout en déterminant le meilleur budget additionnel possible.

Pour la réalisation de ce mémoire, nous avons scindé notre travail en cinq chapitres.

Le premier est consacré à la présentation structurelle et fonctionnelle de l'entreprise Sonatrach, RTC de bejaia.

Le second chapitre traite du management de projet (généralité sur la gestion de projet) et des notions de base de l'ordonnancement de projet.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les éléments de l'optimisation multicritère ainsi que les approches de résolutions des problèmes d'ordonnancement.

Le quatrième chapitre présente une modélisation d'un problème d'ordonnancement avec différents critères et contraintes (temps, coût, ressource) sous forme d'un problème d'optimisation. Ensuite nous présentons la méthode de résolution basée sur l'algorithme Tabou, ainsi qu'à la position du problème.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons l'application de la méthode de résolution proposée sur un projet de réalisation d'une clôture mixte autour des sites RTC-Sonatrach de Moudjbara, wilaya Djelfa.

Notre travail s'achève par une conclusion générale.

# Présentation de l'entreprise

## 1.1 Présentation de SONATRACH

### 1.1.1 Historique

La Société Nationale pour le Transport et la Commercialisation des Hydrocarbures, Société par actions, a été créée le 31 décembre 1963 par le décret N° 63-91. Son premier défi était la réalisation de l'oléoduc Haoud EL Hamra/Arzew

### 1.1.2 Activités

Les principales activités du groupe Sonatrach se résument en trois aspects essentiels :

- L'activité amont : elle prend en charge la recherche, l'exploitation et la production des hydrocarbures. Ses missions sont axées principalement sur le développement des gisements découverts, l'amélioration du taux de récupération et la mise à jour des réserves.
- L'activité transport des hydrocarbures : L'activité transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisations a en charge le développement, la gestion et l'exploitation du réseau de transport, de stockage, de livraison et de changement des hydrocarbures.
- L'activité aval : cette activité prend en charge l'élaboration et la mise en œuvre des politiques de développement et d'exploitation de l'aval pétrolier et gazier. Elle a pour mission essentielle l'exploitation des installations existantes de liquéfaction de gaz naturel et de séparation de GPL, de raffinage ainsi que la commercialisation.

L'activité de commercialisation est celle du management des opérations de vente et de shopping dont les actions sont menées en coopération avec les filiales telles que Naftal pour la distribution des produits pétroliers, SNTM HYPROC pour le transport maritime des hydrocarbures, etc.

### 1.1.3 Activité Transport par canalisation

Pour assurer le transport du pétrole produit par les sociétés françaises (de l'époque), un premier oléoduc reliant les gisements du sud algérien (principalement les champs de Hassi Messaoud) au port de Béjaia a vu le jour en 1959 dont la gestion était confiée à la société pétrolière de gérance (SOPEG).

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 Béjaia (DRG.B), elle-même devenue Région Transport Centre (RTC). Ainsi, sept régions de l'activité transport par canalisation ont été créées à savoir :

- Région Transport Centre - Bejaia (RTC) ;
- Région Transport de Haoud el- Hamra(RTH) ;
- Région Transport d'In Amenas (RTA) ;
- Région Transport Est -Skikda (RTE) ;
- Région Transport Ouest Arzew (RTO) ;
- Gazoduc Espagne/Maroc (GEM) ;
- Gazoduc Tunisie/Italie (GTI).

### 1.1.4 La Région Transport Centre-Béjaia(RTC)

La région transport centre de Béjaia est l'une des sept directions opérationnelles composant l'activité transport par canalisation de Sonatrach. Elle est chargée du transport, du stockage et de la livraison des hydrocarbures(pétrole et gaz naturel), elle a en charge l'exploitation d'un port pétrolier, d'un gazoduc (GG1) et de deux oléoducs (OB1 et OG1).

#### 1.1.4.1 Le gazoduc Hassi Rmel - Bordj Menaiel (GG1)

Depuis 1981, ce gazoduc alimente en gaz naturel toutes les villes et pôles industriels du centre du pays avec une quantité de sept milliards de mètre-cube ( $m^3$ ) par an.

#### 1.1.4.2 Oléoduc "Haoud El Hamra - Bejaia" (OB1)

Réalisé en 1959 par SOPEG, il est le premier pipe-line qu'a connu l'Algérie. Il a une capacité de transport de dix sept (17) millions de tonnes par an de pétrole brut vers le Terminal Marin de Béjaia. Pour assurer le débit voulu, plusieurs stations de pompage intermédiaires ont été réalisées à savoir :

- Station satellite à Touggourt (SPA) ;
- Station de Pompage n° 1 à El Oued (SP1 BIS) ;

- Station satellite Biskra (SPB) ;
- Station de Pompage n° 2 à Biskra (SP2) ;
- Station satellite à Msila (SPC) ;
- Station de Pompage n° 3 à Msila (SP3) ;
- Station satellite à Béni Mansour (SPD) ;
- Station de Pompage Béni Mansour (SBM) ;
- Terminal Raffinerie d’Alger (TRA) ;
- Terminal Marin de Bejaia (TMA).

#### **1.1.4.3 L’oléoduc ”Béni Mansour - Alger / (OG1)”**

Réalisé en 1970, il sert à alimenter la raffinerie Sidi Arcine d’Alger en pétrole brut. En 2005, Sonatrach a procédé à son remplacement par un autre oléoduc dénommé DOG1.

#### **1.1.5 Organigramme de l’entreprise**

La région transport centre de Béjaia est composée de quatre sous-directions divisées chacune en départements.

L’organigramme suivant donne la structuration hiérarchique fonctionnelle de la région transport centre de Béjaia.

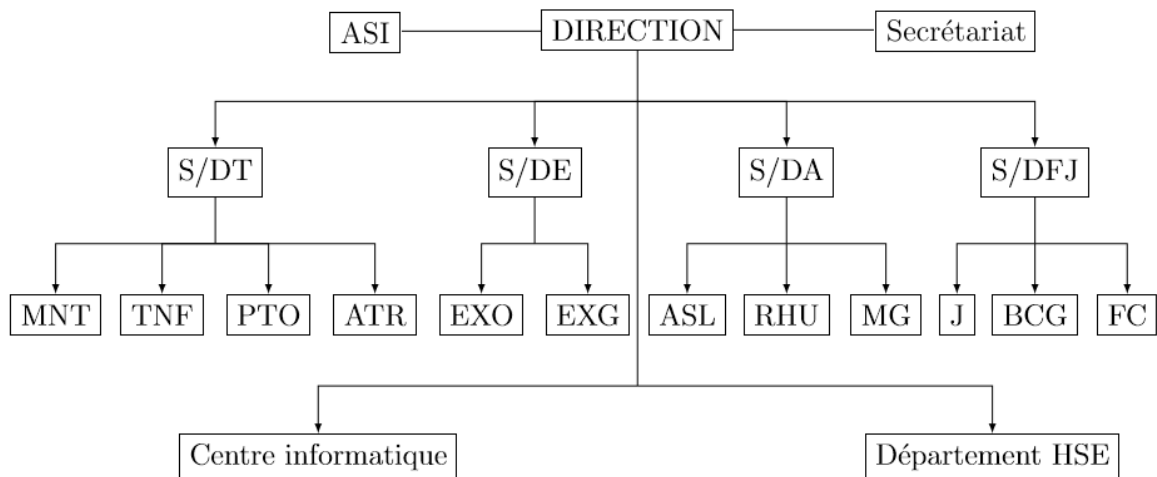


FIGURE 1.1 – Organigramme de la RTC - Bejaia

- SDT : Sous-Direction Technique ;
- SDE : Sous-Direction Exploitation ;
- SDA : Sous-Direction Administratif ;
- SDFJ : Sous-Direction Finance et Juridique
- PTO : Département Protection des Ouvrages ;
- EXL : Département Exploitation Liquide ;
- MOG : Département Moyens Généraux ;
- EXG : Département Exploitation Gaz ;
- RHU : Ressources Humaines et communication ;
- ASL : Administration et Social ;
- ART : Approvisionnement et Transport ;
- TNF : Département Travaux Neufs ;
- MTN : Département Maintenance ;
- FNC : Département Finances et Comptabilité ;
- BCG : Budget et Contrôle de Gestion ;
- JUR : Juridique ;
- HSE : Hygiène et Sécurité de l'Environnement ;
- ASI : Assistent Sécurité Intérieur.

## 1.2 Présentation des différentes structures de la RTC

### 1.2.1 Sous-direction Exploitation (SDE)

La sous-direction Exploitation chapeaute deux départements qui sont :

### **1.2.1.1 Département Exploitation Liquide (EXL)**

Ce département est chargé des missions suivantes :

- Transport de pétrole brut de Haoud El Hamra vers les terminaux de Béjaia et la raffinerie de Sidi Arcine-Alger.
- Chargement de bateaux en pétrole brut.
- Livraison de pétrole à la raffinerie de Sidi Arcine-Alger.
- Stockage de pétrole brut.
- Gestion des stations de pompage et des terminaux énumérés précédemment.

### **1.2.1.2 Département Exploitation Gaz (EXG)**

Département créé en 2004, il est chargé de l'exploitation du gazoduc allant de Hassi R'mel à Bordj Menaiel. Le gaz est livré directement à Sonelgaz pour l'alimentation des centrales électriques et pour les consommations domestiques. Il gère deux stations qui sont :

- Station de compression Medjedel.
- Terminal GG1 Bordj Menaiel.

## **1.2.2 Sous-Direction Administratif (SDA)**

La sous-direction administrative est composée de trois départements, qui sont :

### **1.2.2.1 Département ressources humaines et communication (RHC)**

La mission de ce département est d'acquérir des ressources humaines en nombre et en qualité, d'assurer l'évolution de leurs carrières et de planifier les besoins à court et moyen terme, tant en effectifs qu'en besoins de formation, de perfectionnement et de recyclage. Pour ses besoins, ce département dispose d'un cadre de communication qui anime une cellule de communication.

### **1.2.2.2 Département administratif et social (ASL)**

Ce département veille au respect des lois en vigueur qui régissent les relations de travail. Il est aussi chargé de la gestion du personnel de la RTC.

### **1.2.2.3 Département Moyens Généraux (MOG)**

Ce département assure le soutien logistique de l'entreprise (restauration, hébergement des missionnaires, entretien des bâtiments et des espaces verts, achat de fournitures de bureau, etc).



### **1.2.3 Sous-Direction Finance et Juridique (SDFJ)**

La sous-direction finance et juridique est composée de trois départements :

#### **1.2.3.1 Département Finance et Comptabilité (FIN)**

Prend en charge la gestion comptable et financière de la RTC. Il assure l'enregistrement chronologique des informations de comptabilité et la gestion de la trésorerie comme il fait des appels de fonds à la division de commercialisation des hydrocarbures.

#### **1.2.3.2 Département Budget (BDG)**

Ce département était l'un des services du département finances, devenu département dans la cadre du nouvel organigramme. Il est chargé :

- D'élaborer le budget prévisionnel de l'année à venir, en se basant sur les prévisions élaborées par chaque structure de la RTC.
- D'élaborer le plan de gestion à court et moyens termes.

#### **1.2.3.3 Département Juridique (JUR)**

Ce département veille sur la légalité des transactions, lance des appels d'offre nationaux et internationaux, traite les litiges nés entre la RTC et les tiers et s'occupe aussi des assurances du patrimoine de l'entreprise.

### **1.2.4 Sous-Direction Technique (SDT)**

La sous-direction technique se compose de quatre départements, qui sont :

#### **1.2.4.1 Département Approvisionnement et Transport (ATR)**

Ce département comme son nom l'indique assure les approvisionnements nécessaires pour la bonne exploitation des installations, le stockage des pièces de rechange nécessaires pour une année minimum d'utilisation et le transport en tout genre.

#### **1.2.4.2 Département Maintenance (MTN)**

La mission principale de ce département est de veiller au maintien du bon état de fonctionnement des équipements et des installations techniques de la région.

#### 1.2.4.3 Département Protection des Ouvrages (PTO)

Ce département est chargé de la réparation des canalisations et des ouvrages de génie civil y afférents, ainsi que de la protection cathodique des installations.

#### 1.2.4.4 Département Travaux Neufs (TNF)

Le département travaux neufs est chargé des études, de l'assistance technique et du suivi de réalisation des projets et d'investissement de la région. Il prend aussi en charge les travaux de rénovation des installations, exprimés par les différentes structures de la région.

Le département travaux neufs gère environ quatre vingt pourcent (80%) du budget global de la région.

Ce département est actuellement structuré comme suit :

- Service études industrielles,
- Service technique et suivi des réalisations ;
- Section archivages et documentation ;
- Secrétariat.

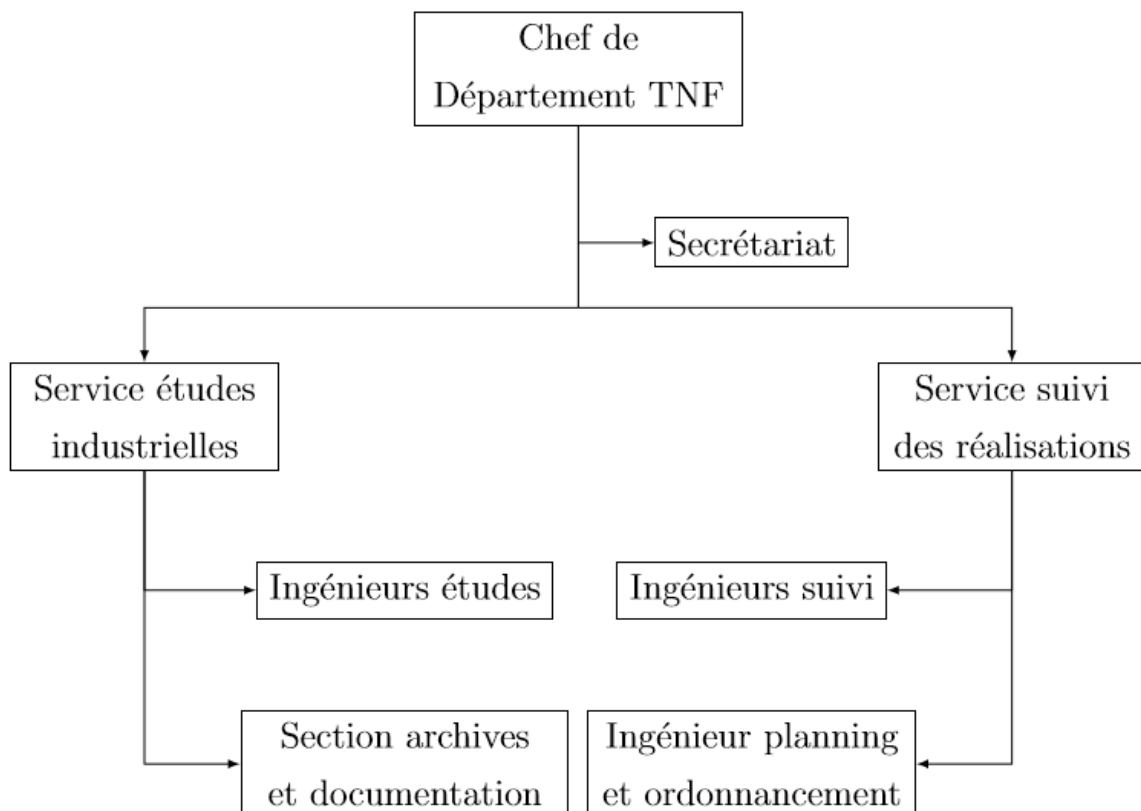


FIGURE 1.2 – Organigramme du département travaux neufs

- **Service études industrielles**

Le service études industrielles assure plusieurs tâches, dont on cite :

- ▷ L'élaboration des dossiers d'appels d'offres (DAO) relevant du département TNF relatifs aux projets inscrits au budget de la région ;
- ▷ L'établissement de bons de commande ;
- ▷ Le Contrôle, qui approuve et fait approuver par les structures internes compétentes les dossiers d'études émis ;
- ▷ Élaboration des études de faisabilité et d'opportunité des projets d'investissement ;
- ▷ Évaluation des coûts de projet et l'élaboration des budgets d'investissement et des fiches technique des projets ;
- ▷ Gestion des contrats avec les bureaux d'études et les organismes de contrôle technique ;
- ▷ Préparation des dossiers requis pour visa préalable RTC ;
- ▷ Élaboration des rapports d'avancement de projets étudiés ;
- ▷ La prise en charge de la finalisation des études d'engineering de projets en cas de défaillance des bureaux d'études conventionnées ;
- ▷ Assurer la mise à jour des plans ;
- ▷ Concrétisation des contrats de réalisation.

- **Service suivi des réalisations**

Ce service assure aussi plusieurs tâches à savoir :

- ▷ La gestion et le suivi des contrats de réalisation ;
- ▷ Approbation des attachements et factures des entreprises cocontractantes ;
- ▷ Le contrôle et supervision des travaux réalisés ;
- ▷ Participer aux réunions de chantiers ;
- ▷ Élaborer les rapports mensuels et assure le reporting à la hiérarchie ;
- ▷ Participer aux travaux des comités d'évaluation des offres ;
- ▷ Assurer l'interface vis-à-vis des organismes de contrôle technique durant la réalisation (CTC, ARH, SONELGAZ, ENACT, et autres).

- **Section archives et documentation**

Cette section relève du service études industrielles et assure plusieurs tâches, dont on peut citer :

- ▷ La gestion des archives techniques de toute la région et prend en charge, dès sa mise en place, la gestion électronique des documents (GED) ;
- ▷ La codification, classement, conservation et reproduction des documents techniques ;
- ▷ Réceptionner la documentation technique de tous les projets relevant de la région ;
- ▷ Veiller à satisfaire les demandes en matière d'apport d'ouvrages techniques nouveaux, normes, etc ;
- ▷ La mise à jour du catalogue des plans et documents disponibles.

## **1.2.5 Autres structures de la RTC**

Les structures suivantes sont rattachées directement à la direction régionale :

### **1.2.5.1 Centre informatique (CI)**

Il a pour mission de :

- ▷ Développer, installer et exploiter des applications informatiques.
- ▷ Maintenance du parc informatique de la région.

### **1.2.5.2 Département hygiène et sécurité de l'environnement (HSE)**

Le Département hygiène et sécurité de l'environnement a pour mission :

- ▷ Protection et sauvegarde du patrimoine humain et matériel de la région ;
- ▷ Veille au respect strict des normes et standards en matière d'hygiène.

### **1.2.5.3 Assistante sécurité interne (ASI)**

Veille à la sécurité et à l'intégrité des installations et des personnes de la région.

# Management et ordonnancement de projet

## Introduction

On peut presque considérer la gestion de projet comme une discipline universelle puisqu'elle englobe un large éventail d'activités : de l'élaboration de nouveaux produits et services, à l'organisation de conférences et d'ateliers, en passant par la modernisation de bureaux d'une entreprise. Si on dispose d'un budget illimité et du temps nécessaire, la gestion de projet serait plutôt facile. En réalité, le temps et l'argent sont des facteurs déterminants et, par conséquent, la gestion de projet devient une compétence importante à maîtriser. Dans la vie d'aujourd'hui où on compte une infinité de projets qui se réalisent, on remarque que ces projets n'atteignent pas souvent leurs objectifs à cause du dépassement de délais (surcoûts importants, ou bien la qualité technique du produit est insuffisante). Notons également que les projets se déroulent dans un milieu complexe (acteurs divers dans une entreprise : étude, production, marketing, environnement extérieur non maîtrisable : marché, social, politique, concurrence, etc). C'est pour ces raisons qu'il faut avoir une démarche claire et rigoureuse pour la gestion d'un projet [1].

## 2.1 Historique du management de projet

Se pourrait-il que la Grande Muraille de Chine, les pyramides, ou Stonehenge aient été construits sans management de projet ? Il est possible de dire que le concept de management de projet existe depuis le début de l'histoire. Il a permis aux leaders de planifier de grands et massifs projets et de gérer leurs financements, approvisionnements en matériaux et main-d'œuvre dans des délais impartis.

À fin du 19<sup>me</sup> siècle, aux États-Unis, des projets gouvernementaux à grande échelle fournirent l'impulsion pour prendre les décisions importantes qui sont devenues la base de la méthodologie de management de projet, comme la ligne de chemin de fer transcontinentale, dont la construction a commencé dans les années 1860. Soudain, les dirigeants d'entreprise se sont trouvés face à la tâche intimidante d'organiser le travail manuel de milliers d'ouvriers et le traitement et l'assemblage sans précédent de quantités de matières premières.

À l'approche du changement de siècle, **Frederick Taylor** a commencé ses études détaillées du travail. Il a appliqué le raisonnement scientifique en montrant que le travail peut être analysé et amélioré en se concentrant sur ses parties élémentaires, ce qui a introduit le concept de travail plus efficacement, plutôt que travailler plus dur et plus longtemps.

L'associé de Taylor, **Henry Gantt**, a étudié en détail l'ordonnancement des opérations dans le travail et il est plus célèbre pour avoir développé le Diagramme de Gantt dans les années 1910. Un diagramme de Gantt est un graphique populaire qui illustre un échéancier de projet et est devenu une technique commune pour représenter les phases et les activités d'une structure de découpage du travail de projet, donc il peut être compris par une large audience. Bien que maintenant considérés comme une technique de représentation graphique banale, les diagrammes de Gantt étaient tout à fait révolutionnaires au moment où ils ont été introduits. Les diagrammes de Gantt ont été employés sur des projets d'infrastructure majeurs incluant le Barrage Hoover et le réseau autoroutier inter-états et sont toujours acceptés aujourd'hui comme un outil important dans le projet.

Avant le milieu du vingtième siècle, les projets ont été managés de manière ad hoc en utilisant surtout les Diagrammes de Gantt et des techniques et outils informels. Pendant ce temps, le projet Manhattan a été lancé et sa complexité était devenue accessible seulement grâce aux méthodes de management de projet. Le projet Manhattan était le nom de code donné à l'effort des Alliés de développer les premières armes nucléaires pendant la deuxième guerre mondiale. Il a impliqué plus de trente différents sites de projet aux EU et au Canada et des milliers de personnes aux États-Unis, Canada et Royaume-Uni. Commencé comme un petit programme de recherche en 1939, le Projet Manhattan emploiera finalement 130,000 personnes et coûtera un total de presque 2 milliards de dollars et aboutira à la création de multiples sites de production et de recherche exploités dans le secret. Le projet réussira à développer et faire exploser trois armes nucléaires en 1945.

Les années 1950 ont marqué le début de l'ère du management de projet moderne. Deux modèles mathématiques de planification de projet furent développés :

- Le Programme d'Estimation et de Revue Technique ou PERT,
- La méthode du chemin critique (CPM).

Le management de projet sous sa forme actuelle a commencé à prendre racine il y a quelques décennies. Au début des années 1960, les organisations industrielles et d'affaires ont commencé

à comprendre les avantages à organiser le travail autour des projets. Elles ont compris le besoin critique de communiquer et d'intégrer le travail à travers des services et des professions multiples.

L'Institut de Management de Projet (PMI) a été fondé en 1969 par cinq volontaires. Leur but initial était d'établir une organisation où les membres pourraient partager leurs expériences dans le management de projet et discuter des problèmes. Aujourd'hui, PMI est une association à but non lucratif de professionnels du management de projet et l'organisation la plus largement reconnue en termes de promotion des bonnes pratiques de conduite de projet. PMI a été formée autour de l'intérêt du management de projet pour l'industrie. L'un des prémisses de PMI est que les outils et les techniques de management de projet sont communs et s'appliquent à tous les projets, du développement du logiciel à l'industrie du bâtiment. PMI a d'abord commencé par offrir l'examen de certification PMP dès 1984. Bien que cela ait pris quelque temps pour que les personnes y prêtent attention, plus de 260,000 individus dans le monde ont maintenant la certification PMP.

Pour aider à maintenir les termes et concepts du management de projet clairs et cohérents, PMI a introduit le Guide du Corpus des connaissances de Management de Projet (PMBOK) en 1987. PMI l'a mis à jour en 1996, 2000, 2004 et plus récemment en 2009 avec la quatrième édition. Actuellement, il y a plus d'un million de copies du Guide de PMBOK en circulation. L'Institut très réputé des Ingénieurs Électriciens et Électroniciens (IEEE) l'a adopté comme leur standard de management de projet.

En 1999, PMI a été reconnu comme un standard American National Standards Institute (ANSI) et il a aussi reçu la distinction d'être la première organisation à obtenir sa certification ISO 9001. En 2010, l'organisation avait plus de 400,000 membres dans plus de 171 pays. PMI a aussi des bureaux à Washington D.C. et Beijing, ainsi que des Centres de Service Régionaux à Singapour, Bruxelles et New Delhi. Récemment, Un bureau a été ouvert à Mumbai [33].

## 2.2 Définition de gestion de projet

La gestion de projet est l'utilisation d'un savoir, d'habiletés, d'outils et de techniques dans le cadre des activités d'un projet, en vue de satisfaire ou de dépasser les exigences et les attentes des parties prenantes à l'égard d'un projet [2].

Le gestionnaire de projet, parfois appelé coordonnateur ou chef de projet, en administre les détails, au jour le jour. Il s'agit là d'un défi constant qui demande une compréhension du contexte plus général du projet et la capacité de concilier des exigences contradictoires telles que :

- Les ressources disponibles et les attentes.
- Les priorités différentes des parties prenantes.

- Les besoins définis et la portée du projet.
- La qualité et la quantité.

## 2.3 Le Projet

Un projet est défini comme une démarche spécifique qui permet tant de structurer méthodiquement et progressivement une réalité à venir [3].

Selon [4], un projet est un effort complexe pour atteindre un objectif spécifique de qualité, devant respecter un échéancier et un budget. Un projet est défini et mis en œuvre pour élaborer une réponse au besoin d'un utilisateur, d'un client ou d'une clientèle et il implique un objectif et des actions à entreprendre avec des ressources données. Il est réalisé une seule fois, doté d'un début et d'une fin déterminées et qui vise à créer un produit ou un savoir unique. Il peut nécessiter la participation d'une seule ou de milliers de personnes. Sa durée peut être de quelques jours ou de plusieurs années. Il peut être entrepris par une seule organisation ou par un groupe d'organismes intéressés. Il peut s'agir de quelque chose d'aussi simple que l'organisation d'un événement d'une journée ou d'aussi complexe que la construction d'un barrage sur une rivière.

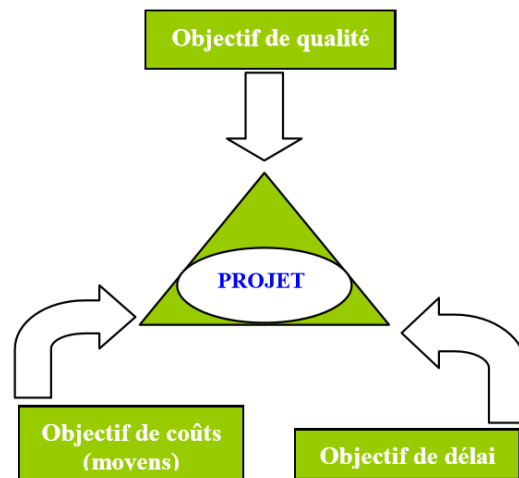


FIGURE 2.1 – Les objectifs du projet

### 2.3.1 Caractéristiques d'un projet

Un projet réussi doit contenir les particularités suivantes :

- Des objectifs précis** : Les projets les plus réussis ont des objectifs définis clairement dès le départ.
- Un plan de projet bien établi** : Un plan conçu avec minutie est utile pour deux raisons. D'abord, il permet à chaque participant de comprendre et de contribuer au projet. Il



précise les responsabilités de chacun et évalue combien d'argent, de personnes, de matériel et de temps sont nécessaires à l'achèvement du projet. Ensuite, il sert d'outil de suivi et permet d'adopter des mesures correctives tôt dans le processus si les choses tournent mal.

- La communication** : Le projet repose sur la collaboration entre toutes les personnes qui y prennent part. Une communication réelle et continue doit s'établir entre les parties, si elles veulent œuvrer ensemble à la réussite du projet [4].
- Une envergure maîtrisée** : Tout au long du projet, le chef fait face à plusieurs situations qui ne contribuent pas toutes aux objectifs tracés. Il importe que le chef de projet porte attention à ses priorités, avec une perte minimale de temps et de concentration.
- Le soutien des intervenants** : D'ordinaire, les projets sont le fait de plusieurs parties prenantes. Il importe que celles-ci accordent leur soutien pour toute la durée du projet de façon à ce que l'équipe atteigne ses objectifs.

### 2.3.2 Acteurs du projet

- Le chef de projet** : Il est responsable de l'ensemble du projet, à la fois au niveau des coûts et des délais. Il est responsable de la rédaction et du suivi du plan projet.
- Le responsable qualité** : Il est responsable de la mise en œuvre du manuel qualité sur un projet donné. Il rédige et fait appliquer le plan qualité du projet.
- Le responsable des ressources matérielles** : Il assure la disponibilité du matériel conformément à la planification.
- Le responsable de l'intégration** : Il est responsable de la mise en œuvre du plan d'intégration
- Le responsable des performances** : Il est responsable des tests de performances conformément au cahier des charges et au plan qualité. Il prend les mesures nécessaires pour atteindre les objectifs de performance définis dans le cahier des charges (simulation, prototypes).
- Le responsable de la documentation** : Il est responsable de la documentation du projet. Ceci ne veut pas dire qu'il rédige toute la documentation associée au projet, mais plutôt qu'il s'assure de sa rédaction. Il définit les normes de présentation des documents en accord avec le manuel qualité de l'entreprise. Il s'assure de la mise à jour de la documentation.

**Remarque** : *Sur les gros projets, le chef de projet pourra nommer des responsables pour les phases amont du cycle de vie (analyse des besoins, spécifications, conception, codage).*

### 2.3.3 Cycle de vie d'un projet

Un projet a également un cycle de vie précis : il débute, se réalise puis se termine. Les différentes phases du cycle de vie d'un projet sont :

1. Lancement
2. Planification
3. Exécution
4. Suivi
5. Clôture

La figure suivante (Figure 2.2) illustre le déroulement du processus de gestion d'un projet.

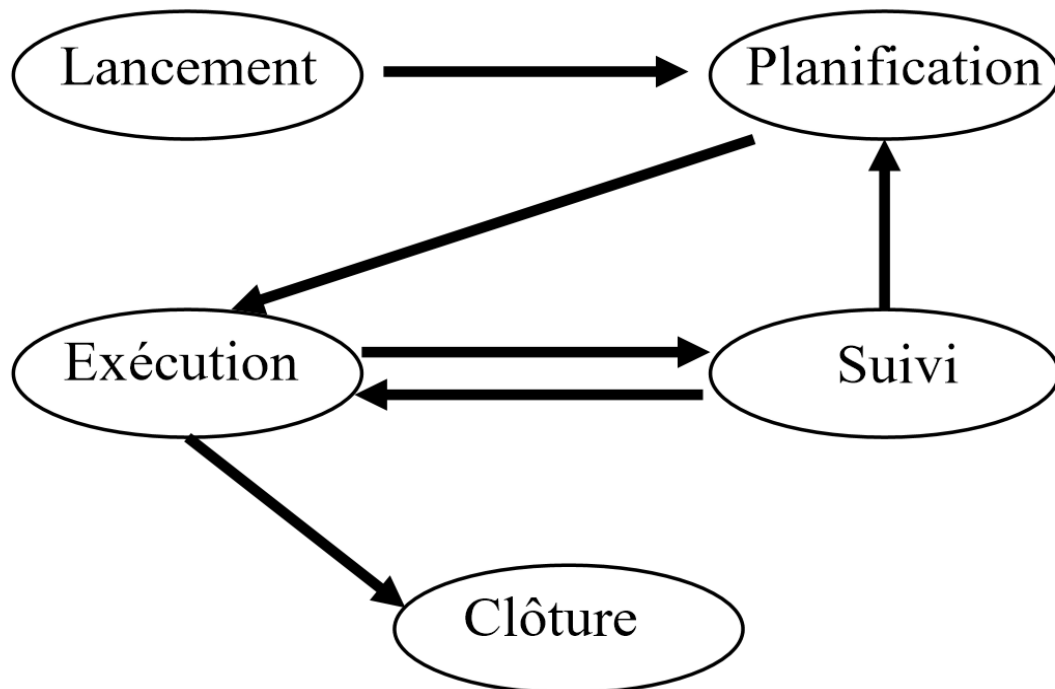


FIGURE 2.2 – Cycle de vie d'un projet

### 2.3.4 La planification du projet

Plusieurs problèmes rencontrés lors de certains projets auraient pu être évités ou minimisés si, dès le départ, un plan de projet détaillé avait été mis au point.

Le plan de projet établit les règles de base et les énonce de façon claire. C'est une étape particulièrement importante puisque les projets mettent habituellement en jeu plusieurs partenaires et intervenants ayant des intérêts et des points de vue différents [5].

La question pertinente qui se pose dans la gestion de projet est la suivante : pourquoi la planification ? . Quatre éléments de réponses confirment l'utilité et la nécessité d'une planification dans la réalisation d'un projet.

En premier lieu, selon [6], il est essentiel que tous les partenaires comprennent et acceptent les règles fondamentales qui régiront le projet. Il faut veiller à ce que les objectifs soient formulés clairement de façon à éviter tout désaccord ultérieur.

En second lieu, le plan de mise en œuvre d'un projet contribue à la maîtrise et à la mesure de son progrès. Une fois la constitution de l'équipe est faite et les possibilités de financement sont déterminées, le chef de projet devra passer en revue le plan et y ajouter les détails particuliers qui faciliteront une gestion réussie.

Troisièmement, le plan de projet aidera à faire face aux changements susceptibles de survenir ou, plutôt, qui surviendront inévitablement. Que se passera-t-il, par exemple, si l'un des intervenants ajoute un nouvel objectif au projet. Un plan de projet détaillé aide donc, à affronter ce type de situation et à tenir aux objectifs généraux du projet [4].

Enfin, le plan d'exécution d'un projet contribue à consolider le soutien des parties prenantes au cours des mois ou des années que durera le projet. Encore une fois, ce fait est particulièrement important parce que le chef de projet aura besoin du soutien de personnes appartenant à divers organismes et sur lesquelles il ne pourra exercer aucune autorité directe.

Plusieurs techniques existent, à la base de toute construction de planning :

- ▷ La technique PERT : méthode des potentiels-étapes et planning des tâches.
- ▷ La technique GANTT : planning à barres.
- ▷ Le réseau des potentiels : méthode des potentiels-tâches.

## 1. Le réseau PERT

Le Program Evaluation and Review Technic (Technique d'Evaluation et de Contrôle des Programmes) est une méthode mise au point aux USA en 1958 par Willard Frazard. Elle permit à l'US NAVY de gagner 2 ans sur la fabrication des fusées Polaris (projet établi initialement sur 7 ans). Cette technique a permis de coordonner les travaux de près de 6000 constructeurs, 250 fournisseurs et 9000 sous-traitants dans les délais imposés par le gouvernement américain. Cette méthode s'est ensuite étendue à l'industrie américaine puis à l'industrie occidentale.

Le PERT est "une méthode consistant à mettre en ordre sous forme de réseau plusieurs tâches qui, grâce à leur dépendance et à leur chronologie, concourent toutes à l'obtention d'un produit fini". La méthode PERT est le plus souvent synonyme de gestion de projet importants et à long terme. C'est pourquoi, un certain nombre d'actions sont nécessaires pour réussir sa mise en œuvre.

1. Définir de manière très précise le projet d'ordonnancement.

2. Définir un responsable de projet, auquel on rendra compte et qui prendra les décisions importantes.
3. Analyser le projet par grands groupes de tâches, puis détailler certaines tâches .
4. Définir très précisément les tâches et déterminer leur durée.
5. Rechercher les coûts correspondants, ce qui peut éventuellement remettre en cause certaines tâches.
6. Effectuer des contrôles périodiques pour vérifier que le système ne dérive pas.

### • Rôle du réseau PERT

Le PERT présente d'une façon visuelle l'enchaînement logique des tâches en vue :

- D'en faciliter la coordination et le contrôle,
- D'améliorer les prévisions de durée et de coût.

Le tracé du réseau PERT permet de connaître le chemin critique (c'est-à-dire le chemin le plus long entre la première et la dernière étape) et par conséquent :

- La durée totale du projet,
- Les tâches pour lesquelles tout retard entraîne l'allongement du projet.

## 2. Diagramme de Gantt

Le diagramme de Gantt est la plus ancienne des trois techniques de planification. Elle porte le nom de son créateur Henry Laurence Gantt, ingénieur et consultant américain, qui l'a mise au point en 1917. Désigné également sous l'appellation : Graphe à barres, graphique d'ordonnancement ou planning de charge, il a pour but de visualiser l'utilisation des ressources dans le temps afin d'optimiser leur affectation.

Le diagramme de Gantt se compose d'un tableau et d'un graphe à barre, chaque ligne du tableau affiche le nom et la durée d'une tâche du projet. En haut du diagramme se trouve une chronologie au-dessous de cet axe des barres, représenter le déroulement des différentes tâches répertoriées dans le tableau.

Les différentes étapes de réalisation d'un diagramme de Gantt sont :

- ▷ Déterminer les différentes tâches (ou opérations) à réaliser et leur durée.
- ▷ Définir les relations d'antériorité entre tâches.
- ▷ Représenter d'abord les tâches n'ayant aucune antériorité, puis les tâches dont les tâches antérieures ont déjà été représentées, et ainsi de suite . . . .
- ▷ Représenter par un trait parallèle en pointillé à la tâche planifiée la progression réelle du travail.

### 3. Méthode des potentiels

La méthode des potentiels a été développée vers la fin des années 50 parallèlement à la méthode PERT. Elle est appelée également la méthode MPM (méthode des potentiels Metra) ou encore méthode des potentiels-tâches. Chaque activité y est représentée par une boîte, et elles sont liées entre elles par des liaisons de dépendances représentées par des flèches C'est une représentation synthétique des relations logiques entre activités, construite de gauche à droite pour représenter la chronologie d'un projet.

#### 2.3.5 Les éléments du plan

Le plan du projet devrait être remis au gestionnaire du projet, au promoteur, à chaque partenaire et à tous les principaux membres du personnel du projet. Il s'agit d'un outil de grande valeur qui peut permettre d'éviter la confusion quant à la portée du projet et les malentendus sur les responsabilités, les échéanciers ou la gestion des ressources.

Puisqu'il n'y a pas deux projets pareils, il n'existe pas non plus deux plans de projet qui soient identiques. Pour qu'il soit d'une utilité maximum, le plan du projet doit être pertinent, compréhensible et doit tenir compte de l'importance de sa complexité. Il devrait inclure les éléments suivants [7] :

- Le mandat du projet** : Le mandat du projet est un document qui témoigne de l'appui des cadres supérieurs, qui autorise le gestionnaire du projet à mener le projet et à attribuer les ressources nécessaires. La création d'un mandat de projet est chose facile. Il suffit d'indiquer le nom et le but du projet ainsi que le nom du gestionnaire de projet et une déclaration de soutien de la part des cadres supérieurs. Elle est signée par la haute direction de l'organisme en charge et les organismes participants.
- Le calendrier d'activités** : Le calendrier d'activités est l'un des éléments les plus importants du coffre à outils du gestionnaire de projet. L'horaire de travail précise le lien logique entre les activités du projet, assure que le personnel est disponible.
- L'horaire de travail** : Aide à gérer le temps de façon efficace afin de terminer le projet au moment prévu. Au moment d'établir l'horaire de travail, le chef de projet examine toutes les tâches et l'ordre dans lequel elles doivent être réalisées. Le projet nécessitera la collaboration d'un grand nombre de personnes et d'organismes qui travaillent à un but commun. La gestion d'une équipe variée, souvent dispersée à plusieurs endroits, peut présenter des défis particuliers.
- La matrice de responsabilités** : La matrice de responsabilités est un outil précieux de gestion de projet destiné à aider à relever ces défis. Une matrice de responsabilités attribuée à quelqu'un la responsabilité de chaque activité principale du projet, évitant ainsi que

certains éléments ”échappent à la surveillance”. Il n’est pas nécessaire qu’elle soit complexe et peut être facilement réalisée en se rapportant à l’horaire de travail du projet.

**-Le budget de plan de projet :** Il est important d’avoir l’estimation la plus détaillée et la plus précise possible des principaux coûts du projet (habituellement les salaires, les matériaux et les fournitures ainsi que les frais généraux), dès le début du projet. Avec ces renseignements, la production du budget du plan de projet est simple.

L’art de l’estimation est très difficile à maîtriser. Celle-ci est basée principalement sur des données historiques, l’expérience et le jugement. Hormis le secteur de la construction, où il existe des estimateurs professionnels, il est très compliqué d’estimer de façon précise la plupart des projets, par exemple, le développement d’un logiciel informatique.

Le chef de projet doit estimer :

- Les immobilisations corporelles (terrains, bâtiment, équipement, etc).
- Les immobilisations incorporelles (frais d’études, frais de démarrage, frais financiers, etc).
- Les dépenses d’exploitation (frais liés à l’activité, frais financiers, etc).

Il existe actuellement plusieurs techniques et méthodes d’estimation. On peut citer entre autres :

- Globale (expert/oracle)
- Par analogie
- Analytique (comme la méthode PERT qu’on verra plus tard)
- Paramétrique

**-Les étapes importantes, avec les dates cibles :** Les étapes importantes marquent un événement significatif dans le cours du projet, habituellement l’achèvement d’un produit livrable important. Dans le cadre du plan d’action du projet, le chef de projet a défini les étapes importantes et a fixé des dates cibles.

La réalisation des étapes dans les délais prévus évite le gaspillage des ressources, maintient au projet son élan et instaure une crédibilité par rapport aux partenaires potentiels.

La gestion d’un projet nécessite la conciliation constante des ressources et des priorités. Ces contraintes, auxquelles s’ajoutent les effets inattendus de circonstances qui échappent au contrôle peuvent compromettre la réalisation des étapes et le respect des dates d’échéance.

Le calendrier d’activités, l’horaire de travail et la matrice de responsabilités sont des outils privilégiés qui aident à maintenir le cap [4].

**-La stratégie de gestion du risque :** La première étape dans la création d’un plan de réponse consiste à définir les risques qui pourraient nuire au projet. Le gestionnaire du projet, les principaux membres du personnel et les partenaires du projet devraient lancer

des idées en s'inspirant de l'arrêté de projet, du calendrier d'activités, de l'échéancier et du budget afin de mettre en relief les risques possibles. Les intervenants peuvent souvent définir les risques en se fiant à leur expérience. En outre, il existe des ressources documentaires qui précisent les risques dans plusieurs domaines d'application.

Les initiatives d'apprentissage communautaires comportent souvent les sources de risques suivantes :

- Les risques techniques tels que la technologie non approuvée.
- Les risques de gestion de projet tels que les lacunes relatives à la répartition du temps et des ressources.
- Les risques organisationnels tels que les conflits de ressources par rapport à d'autres activités.
- Les risques externes tels que la modification des priorités chez les partenaires.

### 2.3.6 Management des coûts

Le management des coûts du projet comprend les processus relatifs à la planification des coûts, à l'estimation, à l'établissement du budget, au financement, à l'approvisionnement, au management et à la maîtrise des coûts, de façon à ce que le projet soit achevé dans les limites du budget approuvé.

La figure 2.3 donne une vue d'ensemble des processus de management des coûts du projet suivants :

- Planifier le management des coûts :** Ce processus consiste à établir les politiques internes, les procédures et la documentation pour la planification, le management, les dépenses et la maîtrise des coûts du projet.
- Estimer les coûts :** Ce processus consiste à évaluer les ressources monétaires nécessaires à l'accomplissement des activités du projet.
- Déterminer le budget :** Ce processus consiste à consolider les coûts estimés de chacune des activités ou de chacun des lots de travail, de façon à établir une référence de base des coûts approuvés.
- Maîtriser les coûts :** Ce processus consiste à surveiller l'état du projet dans le but de mettre à jour les coûts du projet et de gérer les modifications affectant la référence de base des coûts.

Dans certains projets, particulièrement ceux de plus petite taille, l'estimation des coûts et la budgétisation sont si étroitement liées qu'elles sont considérées comme un processus unique, pouvant être effectué par une seule personne, et en un temps relativement court.

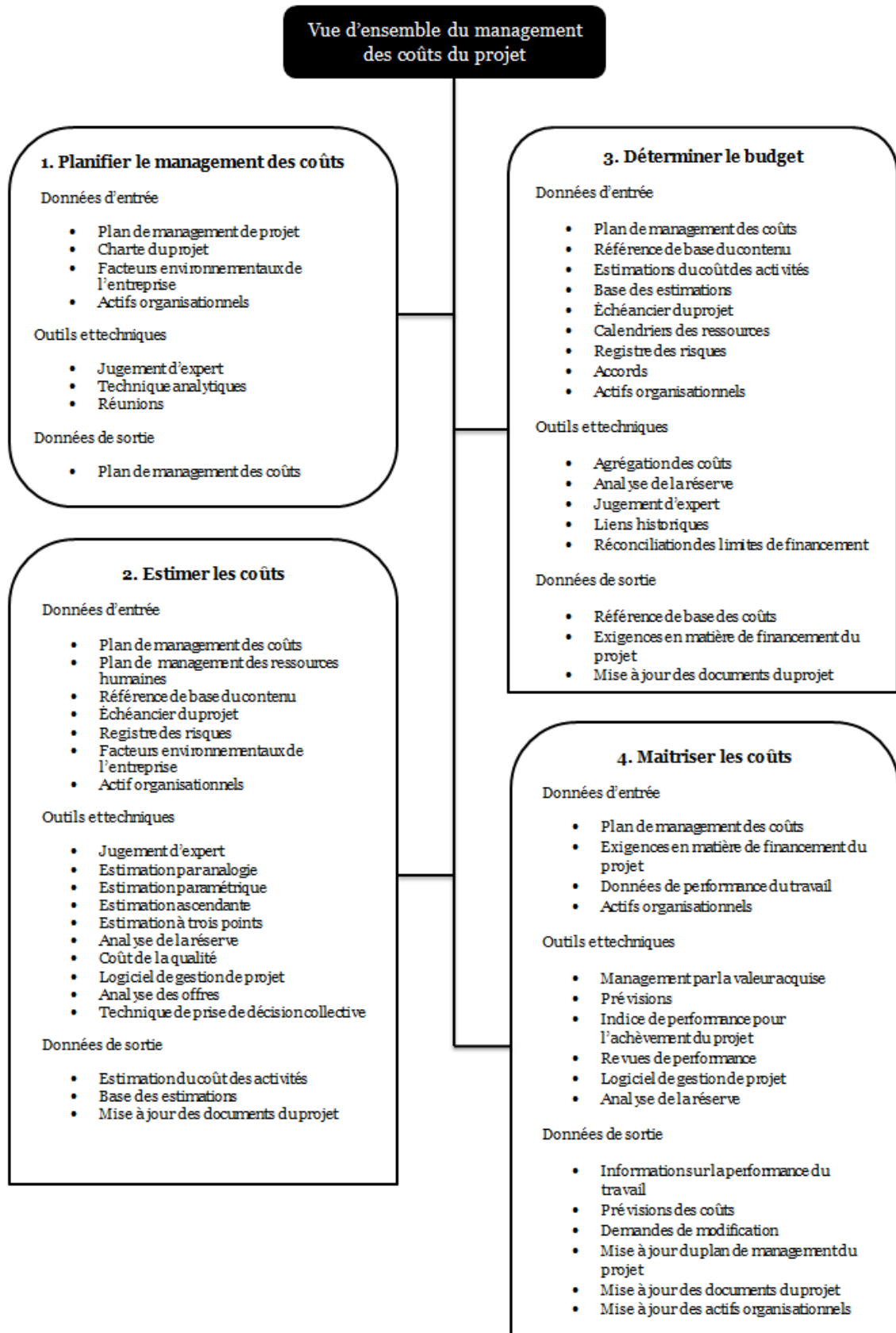


FIGURE 2.3 – Vue d'ensemble du management des coûts du projet [35].



### 2.3.7 Suivi de projet

Une fois le planning défini, il importe de le respecter. Le responsable de projet utilise des fiches de suivi (ou rapports d'activités) qui permettent d'identifier les dérives et d'assurer le contrôle budgétaire. Il en déduit :

- L'actualisation du réseau PERT.
- Le diagramme de Gantt actualisé.

#### • Rapports d'activités

Chaque membre de l'équipe fournit un rapport d'activité hebdomadaire succinct qui décrit

- L'objectif à atteindre pour la semaine
- Le temps passé sur les différentes tâches
- Si les objectifs ont été atteints, et si ce n'est pas le cas, pour quelle raison ?

A partir des rapports individuels, le chef de projet peut établir un rapport d'activité de l'équipe.

## 2.4 L'ordonnancement de projet

### 2.4.1 Introduction

L'ordonnancement se situe exactement dans la phase planification. Il réalise le suivi opérationnel du projet : gestion de ressources, suivi de l'avancement, lancement des activités. Techniquement, ordonnancer un projet consiste à programmer dans le temps l'exécution des tâches, tout en respectant les contraintes et de manière à optimiser les critères de performance retenus. C'est plus particulièrement à ce stade qu'interviennent les techniques d'ordonnancement de projet présentées dans ce qui suit.

### 2.4.2 La fonction ordonnancement

Lors de tout projet, un problème crucial se pose. C'est celui du calendrier d'exécution des tâches. Comment déterminer l'ordre dans lequel doivent s'enchaîner les diverses opérations de façon à atteindre un objectif fixé.

La conception et la gestion d'un projet, qui sont composés de multiples travaux élémentaires posent également divers problèmes :

- De planification (prévisions de déroulement des tâches, établissement d'un calendrier des travaux, etc.)
- De contrôle d'exécution de projet (coordination, réajustement des prévisions initiales, etc.)

### 2.4.3 Définition d'ordonnement

Selon Carlier et al. [8], "ordonner, c'est programmer l'exécution d'une réalisation en attribuant des ressources aux tâches et en fixant leurs dates d'exécution". Présentons une autre définition qui est plus explicite : "Un ordonnancement constitue une solution au problème d'ordonnement. Il décrit l'exécution des tâches et l'allocation des ressources au cours du temps, et vise à satisfaire un ou plusieurs objectifs. Plus précisément, on parle de problème d'ordonnement lorsqu'on doit déterminer les dates de début et les dates de fin des tâches, alors qu'on réserve le terme de problème de séquençement au cas où l'on cherche seulement à fixer un ordre relatif entre les tâches qui peuvent être en conflit pour l'utilisation des ressources. Un ordonnancement induit nécessairement un ensemble unique de relations de séquençement".

### 2.4.4 Les tâches

La définition d'une tâche n'est ni immédiate ni triviale [8]. Prenons l'exemple de réalisation d'un immeuble, où les tâches dépendent de la finesse de découpage : on pourra considérer la boiserie comme une seule tâche, ou bien comme plusieurs tâches (pose d'un placard, pose des portes, etc.). Une tâche  $i$  est donc un travail (opération ou ensemble d'opérations) concrètement identifiable, concerné par la réalisation, et dont l'exécution se trouve complètement décrite par les trois caractéristiques suivantes :

- Caractéristiques d'époques : une tâche doit avoir des limites chronologiques bien définies.
  - $d_i$  : époque de début de la tâche
  - $f_i$  : époque de fin de la tâche
- Caractéristique de durée :
  - $t_i = f_i - d_i$  : durée du travail
- Caractéristique de moyens : Il s'agit de divers moyens (matériels, personnel, fournitures, monnaie, etc.) qui sont nécessaires à la réalisation [9]. Lorsqu'on connaît à l'avance l'ensemble des tâches à exécuter et à partir de quelle date, on dit qu'on est devant un problème statique, et lorsque l'ensemble des tâches évolue avec le temps de façon indéterministe, on dit qu'on a un problème dynamique. Selon les problèmes, les tâches peuvent être exécutées par parties, ou doivent être exécutées sans interruption ; on parle alors respectivement de problèmes préemptifs et non préemptifs [10].

Quand les tâches ne sont pas liées entre elles par des contraintes qu'on détaillera plus tard, on dit qu'elles sont indépendantes.

#### 2.4.4.1 Notion de WBS

On appelle Organigramme des tâches (OT) ou Work Breakdown Structure (WBS), la décomposition exhaustive et ordonnée de l'ensemble d'un projet analysant les tâches et les moyens nécessaires pour une bonne réalisation des travaux (système, service, etc.), conformément aux exigences techniques. La WBS est donc la structure hiérarchique des tâches d'un projet [34].

La conception de la WBS passe par :

- L'établissement d'une liste des résultats de travail (livrables) les plus importants du projet ;
- La division de ces livrables en sous ensembles ;
- Pour chaque livrable et sous-livrable, le listage des activités qui sont nécessaire à sa réalisation ;
- La possibilité de diviser ces activités en sous-activités.

#### 2.4.4.2 Quelques définitions

- Date début au plus tôt** : c'est la date la plus prématurée à laquelle une activité peut commencer.
- Date début au plus tard** : c'est la date la plus tardive à laquelle une activité peut commencer sans tarder la tâche suivante.
- Date fin au plus tôt** : c'est la date plus hâtive dont une tâche peut prendre fin.
- Date fin au plus tard** : c'est la date la plus tardive dont une tâche peut prendre fin sans retarder la tâche suivante.
- La marge libre** : c'est la réserve de temps dont on dispose sur une tâche  $(i, j)$  qui permet, si elle est consommée de ne pas retarder les dates au plus tôt des tâches ultérieures. Elle est définie par :

$$m_{ij} = \theta_j - (\theta_i + d_{ij}), \quad (2.1)$$

où  $\theta_j$  : date fin au plus tôt de la tâche  $(i, j)$ .

$\theta_i$  : date début au plus tôt de la tâche  $(i, j)$ .

$d_{ij}$  : durée de la tâche  $(i, j)$ .

- La marge totale** : est la réserve du temps sur la tâche  $(i, j)$  qui si elle est consommée, fait que cette tâche se ramènera à sa date au plus tard. Elle est définie par :

$$M_{ij} = \theta_j^* - (\theta_i + d_{ij}), \quad (2.2)$$

où  $\theta_j^*$  : date fin au plus tard.

**-Le chemin critique :** est l'ensemble des tâches successives à observer au cours de la mise en œuvre d'un projet dont les marges totales sont nulles.

**-La tâche critique :** c'est la tâche dont la marge totale est nulle.

### 2.4.5 Les ressources

On distingue deux types de ressources : les ressources renouvelables et les ressources consommables. Une ressource est consommable si, après avoir été allouée à une tâche, elle n'est plus disponible pour les tâches suivantes. C'est le cas pour l'argent, la matière première, etc. Une ressource est renouvelable si, après avoir été allouée à une tâche, elle redevient disponible après la fin de cette tâche pour les tâches suivantes. C'est le cas pour les machines, les processeurs, les fichiers, le personnel, etc. Par ailleurs on distingue, principalement dans le cas de ressources renouvelables, les ressources disjonctives (ou non partageables) qui ne peuvent exécuter qu'une tâche à la fois (machine, robot, etc.) et les ressources cumulatives (ou partageables) qui peuvent être utilisées par plusieurs tâches en même temps (équipe d'ouvriers, poste de travail, etc.). Les problèmes d'ordonnancement à ressources disjonctives couvrent une classe importante d'applications qu'on appelle les problèmes d'atelier ou de machines. Les problèmes d'ordonnancement d'atelier et sous des contraintes cumulatives feront l'objet d'une étude à vol d'oiseau ultérieurement dans ce chapitre, alors que le problème central fera l'objet d'un développement. La nature des ressources prises en considération permet de dresser une typologie des problèmes d'ordonnancement (Figure 2.4).

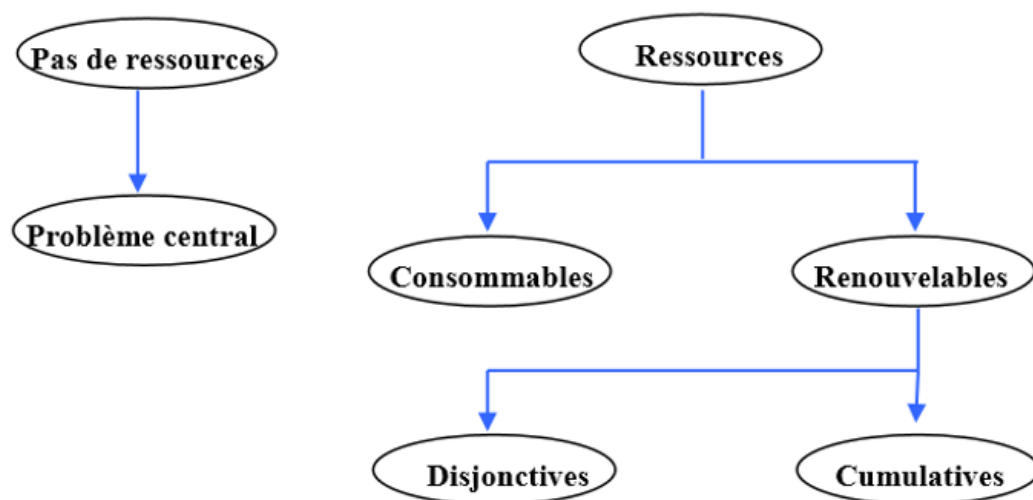


FIGURE 2.4 – Typologie des problèmes d'ordonnancement par les ressources

## 2.4.6 Les contraintes

Une contrainte est une restriction sur les valeurs que peuvent prendre une ou plusieurs variables de décision sur le temps (variable d'ordonnancement) ou bien sur les ressources (variables d'affectation) [11].

Les contraintes auxquelles sont soumises les diverses tâches qui concourent à la réalisation du projet sont de divers types [12]. On distingue :

### 2.4.6.1 Les contraintes potentielles

Elles peuvent être de deux sortes :

- Les contraintes d'antériorité selon lesquelles une tâche  $j$  ne peut commencer avant qu'une tâche  $i$  ne soit terminée, par exemple, la construction des piliers suit les fondations.
- Les contraintes de localisation temporelle impliquant qu'une tâche donnée  $i$  ne peut débuter avant une date imposée, ou qu'elle ne peut s'achever après une date imposée.

### 2.4.6.2 Les contraintes disjonctives

Une contrainte disjonctive impose la non-réalisation simultanée de deux tâches  $A$  et  $B$ . On trouve de telles contraintes dans le cas d'utilisation d'une ressource présente en un seul exemplaire (une grue, une équipe, etc.) ou pour formuler des interdictions de réalisation simultanée pour des raisons de sécurité ou des problèmes de place. Arbitrer une contrainte disjonctive consiste à décider si  $A$  sera faite avant  $B$  ou l'inverse [13].

### 2.4.6.3 Les contraintes cumulatives

Selon [14], on parle de contraintes cumulatives lorsque les tâches demandent une partie d'une ou plusieurs ressources présentes en quantité limitée. Le problème est beaucoup plus combinatoire que pour les contraintes disjonctives. Considérons l'exemple où nous avons cinq intervenants et cinq tâches à effectuer. Chaque tâche demande la présence d'un certain nombre de ces intervenants (voir Tableau 2.1)

Tâche	A	B	C	D	E
Nombre d'intervenants	4	3	2	1	1

TABLE 2.1 – Exemple de contraintes cumulatives

Pour que l'ordonnancement soit réalisable, il faut qu'on utilise, à tout moment, au plus cinq intervenants. Cette contrainte va interdire les ordonnancements réalisant en parallèle :  $(A//B)$ ,  $(A//C)$ ,  $(A//D//E)$ ,  $(B//C//D)$ ,  $(B//C//E)$ . Ces configurations sont minimales au

sens que, si  $(A//B)$  est interdit, toute configuration contenant  $(A//B)$  l'est aussi (par exemple :  $(A//B//D)$ ,  $(A//B//C//D)$ , etc. Lorsqu'une configuration minimale porte sur deux tâches (ici  $A//B$  ou  $A//C$ ), on peut la remplacer par une contrainte disjonctive entre ces deux tâches [13].

## 2.5 Domaines d'application d'ordonnement

Les problèmes d'ordonnement sont très variés. On peut les rencontrer dans de très nombreux domaines comme :

- Projets : gestion de projets, par exemple : la conception (de bâtiments, de produits, de systèmes, etc.)
- Production : ateliers de production, ayant pour objet la recherche d'une organisation efficace de la production des biens et des services.
- Administration : gestion des ressources humaines, emploi du temps.
- Informatique : exécution des programmes, optimisation de code.

## 2.6 Les objectifs d'ordonnement

Résoudre un problème d'ordonnement, c'est avant tout choisir ce que l'on veut optimiser. Selon le critère que l'on cherche à minimiser ou maximiser, on peut choisir entre deux grands types de stratégies, visant respectivement à l'optimalité des solutions par rapport à un critère ou même à plusieurs critères, ou plus simplement à leur admissibilité par rapport aux contraintes.

L'approche d'optimisation suppose que les solutions proposées sont classées dans un certain ordre par rapport à un ou plusieurs critères d'évaluation. Ce classement permet de mesurer la qualité des solutions.

Donc, selon le domaine d'application, la fonction ordonnancement peut avoir d'autres objectifs que celui de veiller au simple respect des contraintes de temps et de ressource. Il peut s'agir de satisfaire des objectifs économiques, de respecter une législation du travail en vigueur dans une entreprise ou de gérer au mieux le risque en présence d'incertitudes.

Lorsque ces objectifs sont quantifiables et exprimables en fonction des variables d'ordonnement, ils sont injectés dans le problème d'ordonnement, soit par ajout de nouvelles contraintes, soit par ajout d'un ou plusieurs critères d'optimisation .

Comme critères, on notera particulièrement :

- Critères liés au temps :
  - Le temps total d'exécution ou le temps moyen d'achèvement d'un ensemble de tâches ;
  - Le stock en cours de traitement ;
  - Différents retards (maximum, moyen, somme, nombre, etc.) ou avances par rapport aux dates limites fixées.

- Critères liés aux ressources :
  - La quantité totale ou pondérée de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches ;
  - la charge de chaque ressource.
- Critères liés à une énergie ou un débit
- Critères liés aux coûts de lancement, de production, de transport, etc. Mais aussi aux revenus, aux retours d'investissements.

## 2.7 Caractéristiques générales des ordonnancements

### 2.7.1 Ordonnements statique et dynamique

Si l'ensemble des informations nécessaires à la résolution d'un ordonnancement est fixé au départ (ensembles des tâches, des contraintes, des ressources, etc.), on est alors devant un problème d'ordonnement statique.

Il y a une nuance entre la solution proposée, qui est généralement accompagnée d'un plan prévisionnel d'exécution des tâches, et l'exécution réelle de ces tâches. Si le plan n'est pas respecté et les objectifs sont modifiés, on est devant un problème d'ordonnement dynamique qui nécessite une résolution d'une série de problèmes statiques et chaque étape doit débiter par une prise d'informations permettant d'actualiser le modèle à résoudre.

### 2.7.2 Ordonnements admissibles

Un ordonnancement est dit admissible s'il respecte toutes les contraintes du problème (dates de début, dates de fin, précédence, contraintes de ressources, etc.).

### 2.7.3 Ordonnements actifs et semi-actifs

Dans un ordonnancement actif, aucune tâche ne peut commencer au plus tôt et qui entraîne l'ordre relatif entre au moins deux tâches.

Dans l'ordonnement semi actif, on ne peut pas avancer une tâche sans modifier la séquence sur la ressource.

### 2.7.4 Ordonnements sans retard

Dans un ordonnancement sans retard, on doit exécuter la tâche qui est en attente à condition que la ressource soit disponible.

### 2.7.5 Ordonnancement préemptif et non préemptif

Selon les problèmes, les tâches peuvent être exécutées sans interruption, c'est-à-dire si on commence l'exécution d'une tâche, elle n'est pas interrompue jusqu'à son achèvement. On parle alors d'un ordonnancement préemptif. Par contre, si les tâches sont exécutées par parties, l'ordonnancement est appelé non préemptif.

## 2.8 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 :

- 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 du voyageur de commerce.

## 2.9 Ordonnancement de projets avec contraintes de ressources

Les problèmes d'ordonnancement de projet avec contraintes de ressources, appelé aussi RCPSP (Resource-Constrained Project Scheduling Problems) est un domaine particulier de l'optimisation combinatoire, formalisé pour la première fois en 1969 par Pritsker et al [30]. Les problèmes ont été abondamment étudiés depuis plus de trente ans et de nombreuses recherches ont été menées dans le but d'optimiser la planification d'activités sujettes à des contraintes de précedence et de ressources afin de minimiser la durée totale du projet, et ce, dans différents contextes. Ce type de problème est dit NP-difficile au sens fort (Blazewicz et al., 1983), du fait de la nature cumulative de la consommation des ressources, qui permet l'exécution d'activités en parallèle. Durant les dernières décennies, le RCPSP est d'ailleurs devenu un problème standard de planification de projets (Hartmann et Briskorn, 2010) et de nombreuses approches ont été développées, ce qui a poussé certains auteurs à les répertorier (Brucker et al., 1999 ; Demeulemeester et Herroelen, 2002 ; Hartman et Briskorn, 2010).



## Conclusion

L'ordonnancement est généralement décrit comme une fonction particulière de prise de décision au sein d'un système de gestion d'un travail concernant la construction d'un ouvrage, la production d'un bien ou d'un service.

# Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation

## Introduction

L'optimisation mathématique consiste à minimiser ou à maximiser une fonction souvent appelée fonction coût, d'une ou plusieurs variables soumises à des contraintes. L'optimisation combinatoire occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématiques discrètes et en informatique. Son importance se justifie d'une part par de nombreuses applications pratiques, ayant un aspect combinatoire et d'autre part par la grande difficulté de ce type de problèmes d'optimisation. Bien que les problèmes d'optimisation combinatoire soient souvent faciles à définir, ils sont généralement difficiles à résoudre. En effet, la plupart de ces problèmes appartiennent à la classe des problèmes NP-difficiles et ne possèdent donc pas à ce jour de solution algorithmique efficace valable pour toutes les données [16].

## 3.1 Optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire est le domaine des mathématiques discrètes, qui traite de la résolution du problème suivant :

Soit  $X \subset R^n$  un ensemble de solutions admissibles, Soit  $f$  une fonction permettant d'évaluer chaque solution admissible. il s'agit de déterminer une solution  $x^* \in X$  qui minimise  $f$ , telle que :

$$f(x^*) = \min_{x \in X} f(x). \quad (3.1)$$

L'ensemble  $X$  des solutions admissibles, supposé fini, est en général défini par un ensemble  $C$  de contraintes.

## 3.2 Optimisation multicritère

L'optimisation multicritère trouve ses racines dans les travaux en économie de Edgeworth [17] et de Pareto [18]. De nombreux secteurs de l'industrie sont concernés par des problèmes multicritères complexes de grande dimension et pour lesquels les décisions doivent être prises de façon optimale. Les problèmes d'optimisation rencontrés en pratique sont rarement monocritères et c'est à ce type de problèmes que l'optimisation multicritère s'intéresse [19].

### 3.2.1 Définitions de base

#### Définition 1

Un problème d'optimisation multi-objectifs est un problème de la forme suivante :

$$(PMO) \quad \text{minimiser}_{x \in X} F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_r(x)), \quad (3.2)$$

où  $r \geq 2$  est le nombre de fonctions objectifs,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$  un vecteur de variables de décision ou solution,  $X$  est l'ensemble des solutions réalisables et  $F(x)$  est le vecteur objectif. L'ensemble  $O = F(X)$  correspond aux images des solutions réalisables dans l'espace des objectifs et  $y = (y_1, y_2, \dots, y_r)$ , avec  $y_i = f_i(x)$ , est le point de l'espace des objectifs correspondant à la solution  $x$ .

La principale différence avec l'optimisation mono-objectif vient de la définition d'optimalité. Il s'agit de l'optimalité de Pareto qui est définie par la dominance de Pareto [18].

#### Définition 2

$x^0 \in X$  est une solution efficace ou minimale au sens de Pareto si :

$\nexists x \in X$  tel que  $f_i(x) \leq f_i(x^0)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , et  $\exists$  au moins  
 $j \in \{1, \dots, n\}$  Tel que  $f_j(x) < f_j(x^0)$ .

#### Définition 3

Une solution  $y = F(x)$  domine ( $\preceq$ ) au sens de Pareto une solution  $t = F(z)$  si et seulement si :

$\forall i \in \{1, \dots, r\}, f_i(x) \leq f_i(z)$  et  $\exists i_0 \in \{1, \dots, r\}$  Tel que  $f_{i_0}(x) < f_{i_0}(z)$ .

## 3.2.2 Approches de résolution des problèmes multicritères

### 1. Approches scalaires

Le principe est de revenir à un problème mono-objectif via un ensemble de paramètres (poids ou contraintes sur les objectifs par exemple). Nous présentons ici deux méthodes scalaires : la somme pondérée et la méthode  $\epsilon$ -contrainte [20, 19]. Il en existe d'autres telles que la méthode de Benson [21] qui impose des contraintes sur les objectifs à l'instar de la méthode  $\epsilon$ -contrainte ou des méthodes cherchant à minimiser l'écart avec un point de référence.

#### 1.1. Somme pondérée (méthode d'agrégation)

L'approche scalaire couramment utilisée est la somme pondérée. Elle consiste à transformer un problème multi-objectifs en un problème qui combine les différentes fonctions objectifs du problème en une seule fonction  $U$  de façon linéaire :

$$U(x) = \sum_{i=1}^r \lambda_i f_i(x), \quad (3.3)$$

où les poids  $\lambda_i$  sont compris dans l'intervalle  $[0, 1]$  et vérifient  $\sum_{i=1}^r \lambda_i = 1$ . Différents poids fournissent différentes solutions ; une même solution pouvant être générée en utilisant des poids différents. Il existe d'autres approches agrégatives, mais l'agrégation linéaire est la plus couramment utilisée.

L'avantage de cette méthode est sa facilité d'implémentation et le fait qu'elle puisse être utilisée avec les méthodes et mécanismes définis pour l'optimisation mono-objectif.

#### 1.2. Méthode $\epsilon$ -contrainte

Dans cette méthode, une seule fonction objectif  $f_k$  est optimisée tandis que les autres fonctions objectif sont sujettes à des contraintes. Le problème d'optimisation s'écrit alors :

$$(PMO_\epsilon) \begin{cases} \min f_k(x), \\ t.q \\ x \in D \\ f_i(x) \leq \epsilon_i, i = 1, \dots, r, i \neq k. \end{cases}$$

L'objectif  $f_k$  représente l'objectif primaire ou l'objectif préféré. L'ensemble Pareto optimal est généré en faisant varier les valeurs des  $\epsilon_i$ . Il est ainsi possible de générer l'ensemble Pareto optimal en n'ayant à résoudre qu'un ensemble de problèmes d'optimisation mono-objectif. Il est à noter que cette méthode est capable de générer les solutions non-supportées à la différence de la méthode d'agrégation. Cependant, l'ajout des contraintes modifie le polyèdre, ce qui peut avoir un effet négatif sur le calcul d'une borne inférieure par exemple.

## 2. Approches Pareto

Les approches Pareto utilisent la notion de dominance pour comparer les solutions et leur affecter un score ou sélectionner des solutions. Les algorithmes évolutionnistes multi-objectif affectent un score à une solution selon qu'elle est dominée ou non par d'autres solutions de la population courante et éventuellement si elle domine d'autres solutions. Ces algorithmes utilisent une méthode de *ranking* qui attribue aux solutions non-dominées de la population courante le meilleur score. Puis les solutions, qui ne sont dominées que par les solutions potentiellement efficaces, reçoivent le second meilleur score et ainsi de suite. De cette manière, la population est organisée en couches où chaque couche contient des solutions non comparables entre elles (Annexe 1).

## 3. Approches non scalaires

La méthode non scalaire ne transforme pas le problème en un problème mono-objectif. Elle utilise des opérateurs de recherche qui traite séparément les différents objectifs. Les méthodes les plus courantes sont :

- La sélection parallèle dans les algorithmes évolutionnaires.
- La sélection lexicographique.

L'inconvénient de ces approches est qu'elles tendent à générer des solutions qui sont largement optimisées pour certains objectifs au détriment des autres objectifs. Les solutions de compromis sont donc négligées [19].

### 3.3 Les méthodes d'optimisation multicritère

Les méthodes d'optimisation peuvent être réparties en deux grandes classes de méthodes pour la résolution des problèmes :

- ▷ Les méthodes exactes ;
- ▷ Les méthodes approchées.

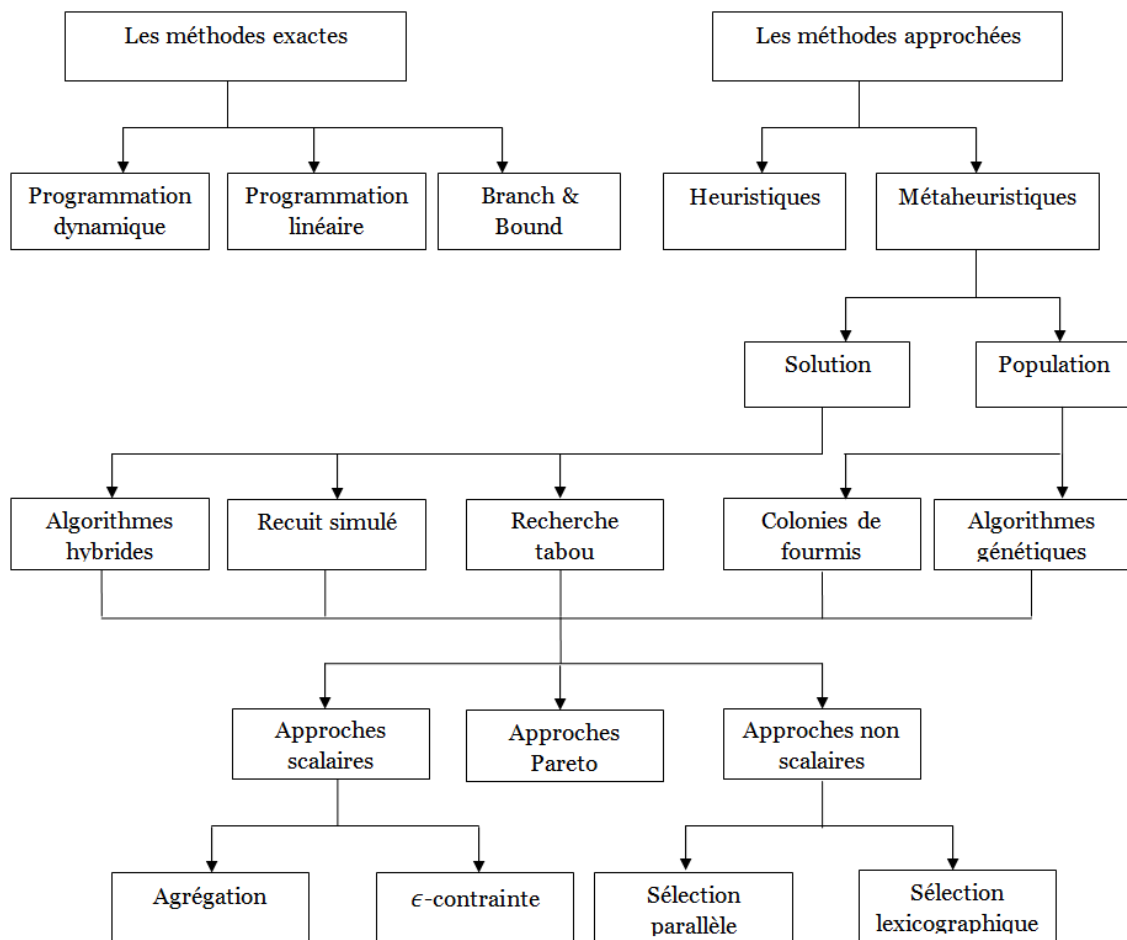


FIGURE 3.1 – Classification des méthodes d’optimisation combinatoire multicritère

## 1. Les méthodes exactes

Les algorithmes exacts sont utilisés pour trouver au moins une solution optimale d’un problème [22]. Les algorithmes exacts les plus réussis dans la littérature appartiennent aux paradigmes de trois grandes classes :

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

### 1.1 Programmation dynamique

La programmation dynamique a été appelée comme cela depuis 1940 par Richard Bellman et permet d’appréhender un problème de façon différente de celle que l’on pourrait imaginer au premier abord. Le concept de base est simple : une solution optimale est la somme de

solutions de sous-problèmes résolus de façon optimale. Il faut donc diviser un problème donné en sous-problèmes et les résoudre un par un.

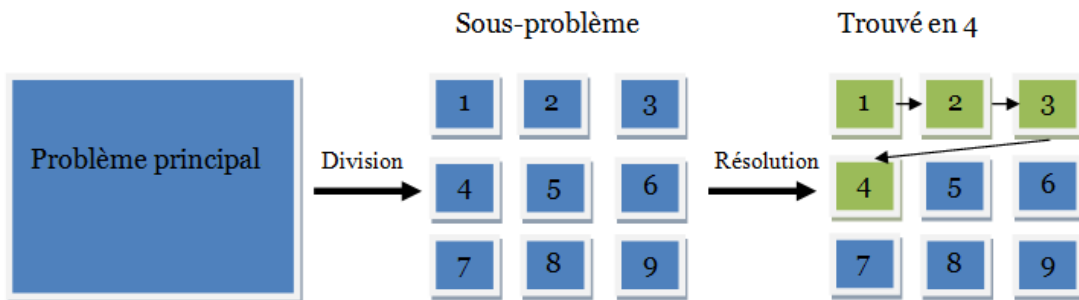


FIGURE 3.2 – Divisé en sous-problèmes

## 1.2 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. Bien entendu, 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. Les méthodes approchées

Une méthode approchée est une méthode d'optimisation qui a pour but de trouver une solution réalisable du problème d'optimisation en un temps raisonnable, mais sans garantie d'optimalité. L'avantage principal de ces méthodes est qu'elles peuvent s'appliquer à n'importe quelle classe de problèmes, faciles ou très difficiles. En effet, les algorithmes d'optimisation tels que les algorithmes de recuit simulé, les algorithmes tabous et les algorithmes génétiques ont démontré leur robustesse et efficacités face à plusieurs problèmes d'optimisation combinatoires [23].

Les méthodes approchées englobent deux classes :

- ▷ Les heuristiques ;
- ▷ Les métaheuristiques.

## 2.1. Les heuristiques

Ce sont des méthodes itératives qui construisent pas à pas une solution. Partant d'une solution partielle initialement vide, ils cherchent à étendre à chaque étape la solution partielle de l'étape précédente, et ce processus se répète jusqu'à ce que l'on obtienne une solution complète.

**Utilisation :** Les méthodes constructives sont généralement utilisables quand la qualité de solution n'est pas un facteur primordial ou la taille de l'instance est raisonnable, en l'occurrence pour générer une solution initiale dans une métaheuristique, méthode rapide et facile d'implémentation.

## 2.2. Les 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 préfixe 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 de problèmes et plus particulièrement de problèmes d'optimisation, visant 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 ;
- ▷ Les méthodes évolutives.

### 2.2.1. Les méthodes de voisinage

Ces méthodes partent d'une solution initiale (obtenue de façon exacte, ou par tirage aléatoire) et s'en éloignent progressivement, pour réaliser une trajectoire, un parcours progressif dans l'espace des solutions. Dans cette catégorie, se rangent :

- ▷ Le recuit simulé ;
- ▷ La méthode Tabou (le terme de recherche locale est de plus en plus utilisé pour qualifier cette méthode).

#### 2.2.1.1. Le recuit simulé

La méthode du recuit simulé est une généralisation de la méthode Monte-Carlo ; son but est de trouver une solution optimale pour un problème donné. Elle a été mise au point par trois chercheurs de la société IBM : S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt et M.P. Vecchi en 1983, et indépendamment par V. Cerny en 1985 à partir de l'algorithme de Metropolis, qui permet de décrire l'évolution d'un système thermodynamique [24].



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. Le but est d'atteindre un état d'équilibre thermodynamique, où l'énergie est minimale et l'état d'équilibre 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). 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. 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).

#### **2.2.1.2. La recherche tabou**

La méthode de recherche tabou, ou simplement méthode tabou, a été formalisée en 1986 par F. Glover. Sa principale particularité tient dans la mise en œuvre de mécanismes inspirés de la mémoire humaine. L'idée consiste à garder la trace du cheminement passé dans une mémoire et de s'y référer pour guider la recherche.

##### **- Notion de base**

À chaque itération, l'algorithme tabou choisit le meilleur voisin non tabou, même si celui-ci dégrade la fonction de coût. Pour cette raison, on dit de la recherche avec tabou qu'elle est une méthode agressive.

##### **- La liste tabou (mémoire)**

L'idée de base de la liste tabou consiste à mémoriser les configurations ou régions visitées et à introduire des mécanismes permettant d'interdire à la recherche de retourner trop rapidement vers ces configurations.

#### **2.2.1.3. Les algorithmes génétiques**

Les algorithmes génétiques sont inspirés de la théorie de l'évolution et des processus biologiques qui permettent à des organismes de s'adapter à leur environnement. Ils ont été inventés dans le milieu des années 60 (Holland, 1962; Rechenberg, 1965; Fogel et al, 1966) [25].

La sélection naturelle, que Darwin appelle l'élément "propulseur" de l'évolution, favorise les individus d'une population qui sont le mieux adaptés à un environnement. La sélection est suivie de croisements et de mutations au niveau des individus, constitués d'un ensemble de gènes. Ainsi deux individus "parents", qui se croisent, transmettent une partie de leur patrimoine génétique à leurs descendants.

La mise en œuvre des algorithmes génétiques nécessite plusieurs étapes à détailler. La première est le codage d'un individu représenté par un chromosome. La seconde est le calcul de la qualité. La troisième est de définir les opérateurs de reproduction.

#### **2.2.1.4. Algorithmes de colonies de fourmis**

Les algorithmes de colonies de fourmis sont particulièrement appliqués aux problèmes qui peuvent être modélisés sous la forme d'un graphe. On peut notamment retenir des performances particulièrement intéressantes dans le cas de l'affectation quadratique, de problème de planification, de l'ordonnancement (PVC), coloriage de graphe, affectation de fréquence, affectation généralisée, sac à dos multi-dimensionnel, satisfaction de contraintes, etc.

Un algorithme basique peut être résumé en trois étapes :

- Génération des solutions par les fourmis en fonction des propriétés locales et de la phéromone.
- Utilisation d'une optimisation locale pour améliorer les résultats fourmis par les fourmis (cette étape n'est pas présente dans la nature, mais elle est nécessaire à l'obtention de résultats compétitifs).
- Mise à jour de la phéromone. L'application des algorithmes de colonies de fourmis sur de nombreux problèmes d'optimisation a identifié des propriétés de base importantes [26].

#### **2.2.1.5. Algorithmes Hybrides**

L'optimisation combinatoire doit donner un aperçu de l'immensité du domaine à explorer pour chercher la meilleure solution. Dans ces cas là, les méthodes exactes sont inadaptées à la résolution de ces problèmes. Si l'analyse des paramètres n'a pas pu fournir une heuristique spécifique, nous devons orienter nos travaux sur les métaheuristiques et notamment sur les techniques hybrides. Ces techniques consistent à combiner plusieurs heuristiques ou métaheuristiques pour leurs avantages et leurs facultés à résoudre les problèmes [27].

Par exemple on peut hybrider la programmation par contraintes et les algorithmes génétiques de la manière suivante :

- Utiliser la programmation par contraintes pour calculer des solutions admissibles sur des sous-espaces de l'espace de recherche ;
- Utiliser un algorithme génétique pour explorer l'espace formé par la collection de ces sous-espaces et effectuer l'optimisation.

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre plusieurs méthodes de résolution exactes et approchées. Il est nécessaire de faire appel à des heuristiques permettant de trouver de bonnes solutions approchées. Donc pour résoudre un problème, on doit choisir les méthodes adéquates qui peuvent lui être adaptées. Après la présentation du problème qu'on va traiter dans le dernier chapitre, on va choisir alors une méthode adéquate vue dans ce chapitre pour sa résolution.

# Modélisation d'ordonnancement d'un projet et approche de résolution

## Introduction

La résolution d'un problème commence par la modélisation du système et de son fonctionnement, il faut donc définir un ensemble de paramètres représentant le système étudié. Dans ce chapitre, nous présentons d'abord deux modèles mathématiques d'ordonnancement d'un projet, le premier minimise la durée de projet et le second a pour objectif la minimisation du coût additionnel. Ensuite, en combinant les deux modèles, on a abouti au modèle du compromis durée/coût.

## 4.1 Position de problème

L'entreprise Sonatrach à l'instar de toute entreprise économique se voit confronter quotidiennement au problème de sélection d'entreprise pour l'octroi du marché de réalisation. Les critères fondamentaux de sélection sont : la durée, le coût et la qualité, cette dernière ne pose aucun problème pour Sonatrach, sachant qu'elle est très exigeante en matière de norme et de réglementation en vigueur. Les critères restants sont primordiaux dans l'établissement de plannings prévisionnels qui répondront efficacement aux exigences du maître de l'ouvrage.

Sonatrach RTC de Bejaia se voit dans l'obligation de rechercher un compromis délai/coût dans la limite du budget, car l'utilisation des méthodes classiques ne répondent plus efficacement aux attentes exprimées par l'entreprise. Ainsi, on se trouve dans l'obligation de proposer une approche meilleure que celles utilisées jusque là.

Pour concrétiser cette étude, RTC Sonatrach de Bejaia nous a confié de prendre en charge l'un de ses projets, en l'occurrence celui relatif à la réalisation d'une clôture mixte autour des

sites de Sonatrach RTC de Moudjebara dans la wilaya Djelfa (Annexe 2).

## **4.2 Modélisation du problème**

Face à un problème réel dont on pense qu'il s'agit d'un problème d'optimisation, la première étape consiste à reformuler le problème sous la forme mathématique d'un problème d'optimisation. Cette modélisation est cruciale, car quantifier la qualité d'une solution n'est pas toujours simple, et la formulation mathématique appelée aussi codage d'un problème influe sur le choix de la technique de résolution à mettre en œuvre. 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 étape est un modèle mathématique, généralement défini par :

### **4.2.1 Variables de décisions**

Il faut identifier correctement toutes les inconnues de problème.

### **4.2.2 les contraintes**

Les contraintes sont représentées sous forme d'équations et d'inéquations. Elle déterminent les conditions auxquelles on doit se plier au vu des exigences et des moyens dont on dispose. Ce sont elles qui délimitent l'espace des solutions réalisables (possibles).

### **4.2.3 Fonction objectif**

A chaque variable de décision qui a été identifiée dans le modèle, correspond un coefficient économique indiquant la contribution unitaire de la variable correspondante à l'objectif poursuivi. Par la suite, on déduit la fonction objectif que l'on veut optimiser (à maximiser ou à minimiser).

## **4.3 Minimisation de la durée d'un projet avec ressources limitées**

### **4.3.1 Formulation du problème**

#### **1. Modèle RCPSP (Resource-Constrained Project Scheduling Problems)**

Le modèle de base est donc un modèle d'ordonnancement de projet avec contraintes de ressources.

## 2. Notation

$T$	Durée totale du projet.
$d_i$	Durée de l'activité $i$ .
$V$	Ensemble des activités (tâches).
$n$	Nombre d'activités.
$Pred(j)$	Ensemble des prédécesseurs directs de $j$ .
$Succ(i)$	Ensemble des successeurs directs de $i$ .
$R$	Ensemble des ressources renouvelables.
$R_k$	Nombre de ressources renouvelables disponibles de la catégorie $k$ .
$r_{ki}$	Nombre de ressources renouvelables $k$ requises lors de l'activité $i$ .
$S_i$	L'instant où l'activité $i$ est planifiée pour commencer.

## 3. Fonction objectif

L'objectif est de minimiser la durée d'exécution du projet en assurant que toutes les activités vont être réalisées :

$$T = \sum_{i=1}^n d_i \longrightarrow \text{Minimiser.} \quad (4.1)$$

## 4. Contrainte

Le modèle RCPSP traite deux types de contraintes : les contraintes de précédence et les contraintes de ressources. Les contraintes de précédence définissent des conditions temporelles entre les activités. Ainsi, un successeur ne peut débuter que lorsque tous ses prédécesseurs sont terminés :

$$S_i + d_i \leq S_j \quad \forall (i, j) \in V^2, \quad \text{Tel que } j \in Succ(i). \quad (4.2)$$

Pour les contraintes de ressources, il est nécessaire au préalable de définir la variable de décision binaire :

$$y_i^t = \begin{cases} 1, & \text{Si l'activité } i \text{ débute au temps } t, \\ 0, & \text{Sinon,} \end{cases} \quad (4.3)$$

avec :

$$\sum_{t=1}^T t.y_i^t = S_i \quad \forall i \in V. \quad (4.4)$$

Quant à l'unicité de  $S_i$  elle est assurée par

$$\sum_{t=1}^T y_i^t = 1 \quad \forall i \in V. \quad (4.5)$$

La contrainte de ressources peut ensuite être définie. Elle assure que le nombre de ressources  $k$  utilisée par les activités en cours à un instant  $t$  est inférieure ou égale au nombre de ressources disponibles à cet instant :

$$\sum_{i \in V} \sum_{k_i = \text{Max}(1, t - d_i + 1)}^t r_{ki} \cdot y_i^t \leq R_k, \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad \forall k \in R_k. \quad (4.6)$$

## 4.4 Minimisation d'un budget additionnel

Ce modèle mathématique a pour objectif de calculer le coût total du projet. Nous décrivons, ci-dessous, les paramètres, variables et fonction objectif du modèle.

### 1. Notation

$S_i$	L'instant où l'activité $i$ est planifiée pour commencer.
$T_m$	La durée de projet après la $m^e$ itération, avec $m = 1, 2, \dots, M$ .
$T_M = T_a$	La durée optimale atteignable en accélérant le projet.
$r_{ki}$	Nombre de ressources renouvelables $k$ requises lors de l'activité $i$ .
$x_i$	Le nombre d'unités de temps dont l'activité $i$ est accélérée.
$c_i$	Le coût unitaire pour accélérer l'activité $i$ .
$u_i$	Le nombre maximum d'unités de temps que l'activité $i$ peut être accélérée.
$c_{ki}$	Le coût normal de la ressource $k$ par unité de temps assignée à l'activité $i$ .
$a_{ki}$	Le coût de la ressource $k$ par unité de temps pour accélérer l'activité $i$ d'une unité de temps.
$N_a$	Le nombre total de tâches pouvant être accélérées.
$B$	Budget additionnel disponible pour accélérer le projet.
$C_{net}$	Coût net pour accélérer l'activité $i$ de $x_i$ unités de temps.
$C_n$	Coût total normal pour réaliser le projet.
$C_{Max}$	Coût total à ne pas dépasser avec l'accélération.
$C_{aTOT}$	Coût additionnel net total pour accélérer le projet.

### 2. Fonction objectif

L'objectif est de minimiser le coût additionnel net pour accélérer le projet :

$$C_{aTOT} = \sum_{i=1}^{N_a} \alpha_i x_i \sum_{ki=1}^{r_{ki}} (a_{ki} - c_{ki}) \longrightarrow \text{Minimiser}, \quad (4.7)$$

assujetti à :

Pour les contraintes de ressources, il est nécessaire de définir la variable de décision binaire :

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & \text{Si } i \text{ est sélectionnée pour être accélérée,} \\ 0, & \text{Si } i \text{ n'est pas sélectionnée pour être accélérée} \end{cases} \quad (4.8)$$

Quant aux contraintes de précédence, l'instant où l'activité  $j$  est planifiée pour commencer doit toujours être supérieure ou égale à l'instant où l'activité  $i$  est planifiée à commencer après l'accélération :

$$S_j \geq S_i - x_i \quad \forall (i, j) \in V^2, \quad \text{Tel que } i \in \text{Pred}(j). \quad (4.9)$$

La dernière activité doit commencer avant la fin du projet :

$$S_n \leq T. \quad (4.10)$$

La durée optimale atteignable en accélérant le projet est inférieure ou égale à la durée du projet après la  $m^e$  itération :

$$T_M \leq T_{m+1} \leq T_m. \quad (4.11)$$

Le nombre d'unités de temps dont l'activité  $i$  est accélérée doit être inférieure ou égale au nombre maximum d'unités de temps dont l'activité  $i$  peut être accélérée :

$$0 \leq x_i \leq u_i. \quad (4.12)$$

Le coût additionnel net total pour accélérer le projet n'excède pas le budget additionnel disponible pour accélérer le projet :

$$C_{aTOT} \leq B, \quad (4.13)$$

avec :

$S_1 = 0$ , début de la première activité du projet ;

$S_i \geq 0$ ,  $\forall i \in V$ , contrainte de non négativité ;

Le coût total à ne pas dépasser avec l'accélération est donnée par l'équation ci-dessous :

$$C_{Max} = C_n + B. \quad (4.14)$$

Le coût total normal pour réaliser le projet est donné par l'équation ci-dessous :



$$C_n = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r_{ki}} c_{ki} d_i. \quad (4.15)$$

Le coût net pour accélérer l'activité  $i$  de  $x_i$  unités de temps est calculé comme suit :

$$C_{net} = \sum_{k=1}^{r_{ki}} c_{ki} (d_i - x_i) + \sum_{k=1}^{r_{ki}} a_{ki} x_i = \sum_{k=1}^{r_{ki}} c_{ki} d_i - \sum_{k=1}^{r_{ki}} c_{ki} x_i + \sum_{k=1}^{r_{ki}} a_{ki} x_i = \sum_{k=1}^{r_{ki}} c_{ki} d_i + x_i \sum_{k=1}^{r_{ki}} (a_{ki} - c_{ki}). \quad (4.16)$$

## 4.5 Modèle du compromis durée/coût

La procédure logique usuelle utilisée pour résoudre le problème de minimisation bicritère durée/coût d'ordonnancement d'un projet consiste à la recherche du compromis durée/coût.

Le temps de réalisation des tâches dépend de la relation de précedence et de la durée des tâches, tandis que le coût dépend des ressources assignées à chaque tâche et bien attendu de la durée des tâches. Ainsi, nous proposons le modèle suivant :

### 1. Fonction objectif

$$\lambda_1 T + (1 - \lambda_1) C_{aTOT} \longrightarrow \text{Minimiser}, \quad (4.17)$$

avec  $\lambda_2 = 1 - \lambda_1$  et  $\lambda_i$  paramètre d'importance, tels que  $\lambda_i \in ]0, 1[$ ,  $i = \overline{1, 2}$ .

### 2. Variables de décisions

$$y_i^t = \begin{cases} 1, & \text{Si l'activité } i \text{ débute au temps } t, \\ 0, & \text{Sinon.} \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & \text{Si } i \text{ est sélectionnée pour être accélérée,} \\ 0, & \text{Si } i \text{ n'est pas sélectionnée pour être accélérée.} \end{cases} \quad (4.19)$$

### 3. Contraintes

$$\sum_{t=1}^T t \cdot y_i^t = S_i, \quad \forall i \in V, \quad (4.20)$$

$$\sum_{t=1}^T y_i^t = 1, \quad \forall i \in V, \quad (4.21)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{k=i=Max(1,t-d_i+1)}^t r_{ki} \cdot y_i^t \leq R_k, \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad \forall k \in R_k, \quad (4.22)$$

$$S_n \leq T, \quad (4.23)$$

$$0 \leq x_i \leq u_i, \quad (4.24)$$

$$T_M \leq T_{m+1} \leq T_m, \quad (4.25)$$

$$C_{aTOT} \leq B. \quad (4.26)$$

## 4.6 Approche de résolution adoptée

### 4.6.1 Recherche Tabou

La meilleure analogie sans doute pour expliquer l'idée derrière l'algorithme RT serait la fable des randonneurs [32]. Imaginons un randonneur malchanceux perdu dans la montagne. Il voudrait rejoindre le point de plus basse altitude puisqu'il sait qu'une équipe de secours passe régulièrement par ce point. Il ne sait pas qu'elle est l'altitude de son objectif et un brouillard l'empêche de voir loin. Face à un tel problème, la méthodologie de la recherche Tabou lui permettrait d'atteindre son objectif. Partant de n'importe quelle position du randonneur, la RT lui proposera de se déplacer vers le point qui le mènera à la plus basse altitude que le brouillard lui permette de voir. Une fois arrivé, il devra chercher de nouveau parmi toutes les positions qu'il peut apercevoir, la prochaine plus basse position pourvu qu'il ne l'ait pas déjà visitée. Il arrive dans certains cas que la position choisie soit de plus haute altitude que la position actuelle du randonneur. Le fait de remonter à cette nouvelle position peut s'avérer une bonne décision puisque cette action peut mener le randonneur à de nouvelles positions encore plus basses que celle qu'il a trouvé depuis son départ. En poursuivant ainsi de suite, le randonneur se déplacera d'un point à un autre tout en mémorisant les T dernières positions qui lui seront taboues. Il est vrai que la fable des randonneurs favorise la compréhension de l'algorithme Tabou. Mais dans le cadre d'un travail de recherche, il est impératif de passer à une description formelle et rigoureuse de cet algorithme. Dans cette optique, on s'est inspiré de la description d'Alain Hertz [31] de l'algorithme Tabou qu'on présente comme suit :

## 1. Définition du problème

Soit  $X$  l'ensemble de toutes les solutions possibles, et  $F$  une fonction à optimiser et qui détermine la valeur  $F(x)$  de toute solution  $x$  dans  $X$ . Le problème à résoudre est donc le suivant :

$$\text{Min}F(x),$$

Sous contraintes :  $x \in X$ .

## 2. Principe

L'algorithme Tabou est une métaheuristique de recherche locale qui explore le voisinage d'une solution au-delà de l'optimum obtenu. Cette méthode de recherche se déplace de la solution actuelle vers une solution voisine ayant une meilleur objectif à travers un processus itératif. Dans chaque itération, notre algorithme Tabou explore d'abord tout l'espace de solutions (tout le réseau du projet) et définit la meilleure zone dans laquelle il intensifie ensuite la recherche de l'activité à accélérer. Les résultats (durées, coûts) obtenus après cette intensification permettent d'actualiser l'information du projet tant sur la configuration en réseau que sur le coût total, suite à l'accélération de l'activité considérée. l'algorithme Tabou établit une liste appelé "liste taboue". Cette liste permet de mémoriser durant un nombre limité d'itérations (mémoire à court terme), les dernières solutions visitées et d'interdire tout déplacement vers ces solutions. On appelle toute solution figurant dans la liste une solution taboue. Les conditions d'arrêt sont relatives à l'atteinte d'une valeur de coût du projet selon les disponibilités budgétaires prédéfinies et/ou le manque d'activités pouvant être accélérées dans la zone globale de recherche (Figure 4.1)

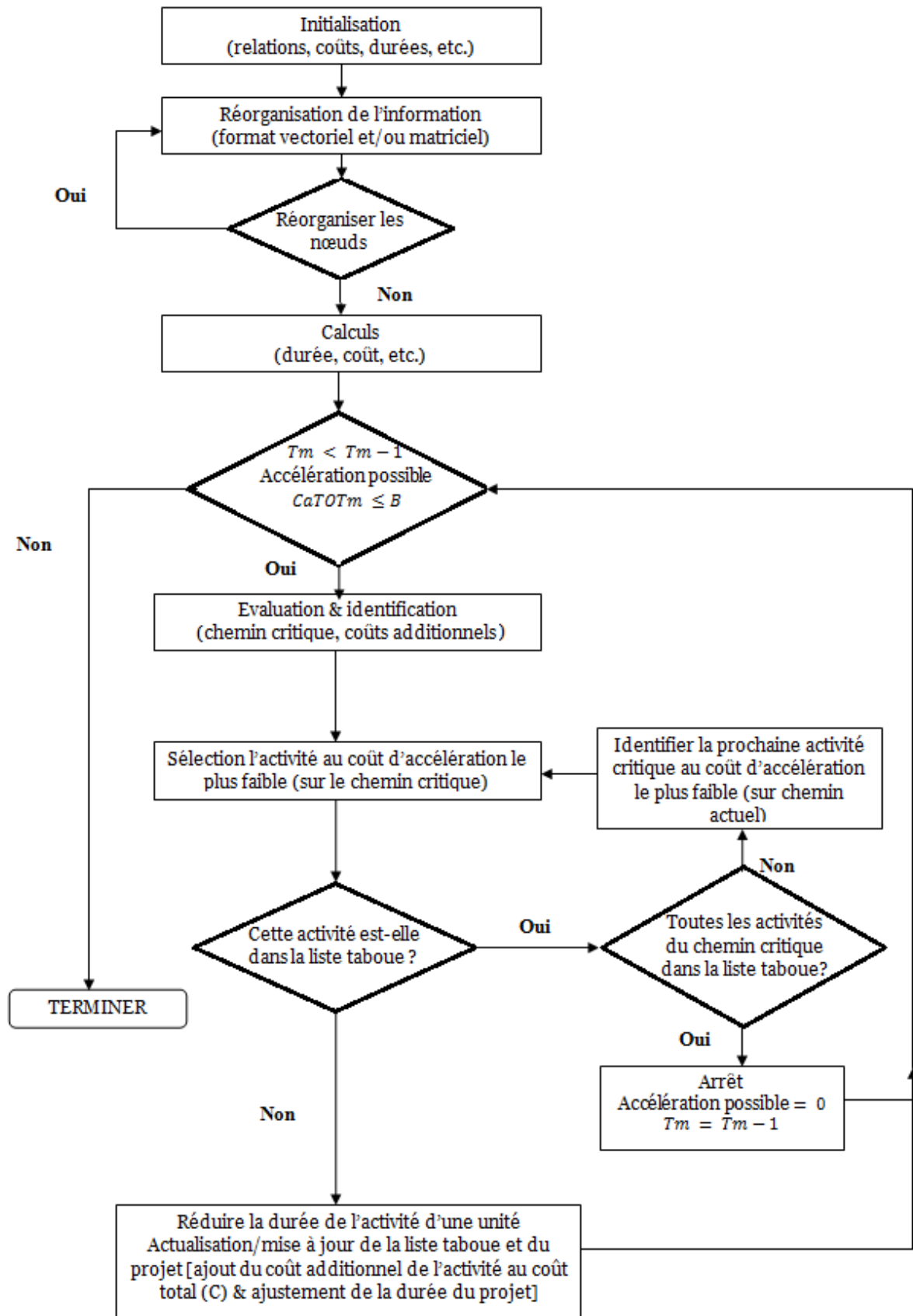


FIGURE 4.1 – L'algorithme d'accélération avec Tabou

## 4.7 Adaptation de la méthode à la minimisation bicritère

Les premiers travaux portant sur l'utilisation de la Recherche Tabou pour l'optimisation multiobjectifs opéraient par transformation vers le mono-objectif. Des approches ultérieures étendent les principes de la Recherche Tabou afin de produire une bonne approximation de la frontière Pareto.

Dans le cas de notre étude, on s'est basé sur une approche d'agrégation dont la formulation a été détaillé dans le chapitre 3, qui consiste à la transformation d'un problème multiobjectifs en un problème qui combine les différentes fonctions objectifs du problème en une seule fonction.

Dans notre étude, on est face à la résolution d'un problème bicritère, l'objectif est donc de minimiser la fonction suivante :

$$\lambda_1 T + (1 - \lambda_1) C_{aTOT} \longrightarrow \text{Minimiser}, \quad (4.27)$$

avec  $\lambda_2 = 1 - \lambda_1$  et  $\lambda_i$  sont introduits pour signaler l'importance d'un critère par rapport à l'autre, tels que  $\lambda_i \in [0, 1]$ ,  $i = \overline{1, 2}$ .

Ainsi nous appliquons le principe de la recherche tabou formulé auparavant.

## Conclusion

La combinaison des modèles minimisation de la durée et minimisation du coût additionnel, nous a permis d'élaborer un modèle de compromis durée/coût, qui a pour objectif l'amélioration à la fois de la durée et du coût additionnel.

# Étude de cas

## Introduction

Afin de concrétiser cette étude, Sonatrach RTC de Bejaia nous a confié de prendre en charge l'un de ses projets, en l'occurrence celui relatif à la " réalisation de la clôture mixte autour des sites de Sonatrach RTC à Moudjebara, wilaya de Djelfa ". Vu que ce projet traite soixante dix (70) tâches, l'obtention d'une solution initiale s'avère délicate, la mise en place d'une solution logicielle adaptée à ce besoin s'impose alors. Ensuite nous appliquons l'algorithme Tabou pour optimiser la solution trouvée et répondre à la préoccupation de l'entreprise Sonatrach.

## 5.1 Collecte des données

### 5.1.1 Description des travaux(les différents lots)

1. Clôture mixte d'une longueur de  $3470m^2$ , d'une hauteur de  $3m$  ;
2. (16) seize guérites équipées des projecteurs ;
3. Piste de servitude carrossable autour de la clôture mixte ;
4. Gabionnage sur une longueur de  $450m^2$  ;
5. Réalisation des caniveaux sur une longueur de  $450m^2$  ;
6. Éclairage extérieur.

### 5.1.2 Délai de réalisation

Le planning prévisionnel de l'entreprise indique que la durée de réalisation de ces travaux est fixée à vingt quatre (24) mois (Annexe 3).

### **5.1.3 Les ressources disponibles (humaines et matérielles)**

- (06) Ferrailleurs
- (05) coffreurs
- (05) maçons
- (02) Peintres
- (04) Électriciens
- (05) Soudeurs
- (15) Manœuvres
- Conducteurs d'engins :
- (03) Chas pentière
- (01) Grue
- (06) Camion
- (02) Rétro chargeur
- (01) Dumper
- (01) Compresseur
- (01) Bétonnière
- (02) Pompe a béton
- (01) Groupe électrogène
- (01) Vibreur
- (01) Compacteur
- (01) Camion arroseur
- (01) Niveleuse

### **5.1.4 Les différentes activités constituant chaque lot**

#### **Clôture mixte**

1. Fouilles en puits pour semelles isolées (dénommée : A1)
2. Fouilles en tranche pour semelles filantes (A2)
3. Remblai par couche susceptible (A3)
4. Transport des terres excédentaires (A4)
5. Béton de propreté pour semelles isolées (A5)
6. Béton armé pour semelles isolées (A6)
7. Béton armé pour semelle filantes (A7)
8. Béton armé pour fûts (A8)
9. Béton armé pour voile périphérique (A9)

10. Préparation pour pose charpente métallique (A10)
11. Béton de remplissage (A11)
12. F/P ossature métallique (A12)
13. F/P grillage métallique (A13)
14. F/P Bavolet (A14)
15. F/P fils barbelé (A15)
16. F/P Pestaille métallique (A16)

### **Guérites**

1. Décapage de la terre végétale + évacuation (B1)
2. Fouille en puits pour semelles isolées et fouilles en tranchée (B2)
3. Remblai avec des terres et évacuation des terres excédentaires (B3)
4. Béton de propreté pour semelles isolées et longrines (B4)
5. Béton armé pour semelle isolées (B5)
6. Béton armé avant poteaux (B6)
7. Béton armé pour longrines (B7)
8. Dalle flottement (B8)
9. Superstructure (B9)
10. Maçonnerie (B10)
11. Menuiserie métallique + peintures (B11)
12. Étanchéité (B12)
13. Électricité (B13)

### **Piste de servitude**

1. Décapage de la terre végétale + évacuation à la décharge publique (C1)
2. Déblai en grande masse (C2)
3. Remblai des vides provenant des déblais (C3)
4. Remblai en provenance d'emprunt en tuf (C4)
5. Évacuation des terres excédentaires (C5)
6. F/P d'une couche de fondation en tuf (C6)



## **Gabionnage**

1. Décapage de la terre végétale (D1)
2. Fouilles en tranche (D2)
3. Délai de talus et étalage (D3)
4. Évacuation des terres excédentaires (D4)
5. Réalisation d'un gabion en grillage métallique (D5)
6. Réalisation d'un gabion en grillage métallique murs (D6)

## **Caniveaux**

1. Fouilles en tranchée (E1)
2. Remblaiement des fouilles (E2)
3. Remblaiement des vides provenant des terrassements(E3)
4. Évacuation des terres excédentaires (E4)
5. F/P de sable (E5)
6. F/P conduite en béton armée (E6)
7. Réalisation des regards (E7)
8. Délai en grande masse (E8)
9. Remblai des vides provenant des déblais (E9)
10. Évacuation des terres excédentaires (E10)
11. Réalisation des caniveaux (E11)
12. F/P grille en fonte (E12)
13. Réalisation d'un dallage de protection (E13)

## **Éclairage**

1. Fouilles en tranchées (F1)
2. Remblaiement des fouilles (F2)
3. Remblai des vides provenant des terrassements (F3)
4. Évacuation des terres excédentaires (F4)
5. F/P lit de sable de grillage avertisseur (F5)
6. F/P massif en béton armé (F6)
7. F/P candélabre octogonal (F7)

8. F/P câble électrique (F8)
9. F/P câble de mise à la terre (F9)
10. F/P puits de terre avec piquets en cuivre (F10)
11. Mise en place de balise en béton (F11)
12. Réalisation niche pour armoires électriques (F12)
13. F/P armoire d'éclairage (F13)
14. 14. Mise en service de l'installation et service en état des lieux (F14)

## 5.2 Élaboration du programme des travaux

À partir de la collecte des données, nous avons procédé à l'établissement du tableau qui suit illustrant les durées et relations entre les différentes tâches énumérées ci-dessus :

Tâches	Durée (jours)	Prédécesseurs
A1	100	-
A2	50	A1dd+20jours
A3	45	A8 ; A9
A4	32	A3
A5	47	A2
A6	64	A5dd+21jours
A7	85	A5dd+21jours
A8	60	A6
A9	70	A6
A10	50	A9
A11	40	A9 ; A10
A12	80	A11
A13	33	A12
A14	30	A11 ; A13
A15	19	A14
A16	3	A12
B1	16	A8fd+2jours
B2	32	B1dd+14jours
B3	21	B8
B4	30	B2dd+10jours
B5	30	B4dd+15jours
B6	45	B5dd+25jours

B7	30	B5dd+30jours
B8	25	B6 ; B7
B9	65	B8
B10	45	B8fd+30jours
B11	48	B10dd+20jours
B12	55	B10dd+25jours
B12	55	B10dd+25jours
B13	40	B11dd+35jours
B14	20	B10dd+20jours
C1	70	-
C2	70	C1dd+28jours
C3	70	C2dd+16jours
C4	80	C3dd+16jours
C5	75	C4
C6	65	C5
D1	60	C3dd+21jours
D2	28	D1dd+18jours
D3	100	D2
D4	14	D3
D5	230	D4dd+24jours
D6	100	D5dd+26jours
E1	15	B2fd+20jours
E2	18	E6
E3	15	E7
E4	10	E3
E5	20	E1
E6	50	E5dd+5jours
E7	25	E6dd+10jours
E8	30	E6 ; E7
E9	25	E8dd+10jours
E10	12	E9
E11	30	E5 ; E10dd+20jours
E12	20	E11dd+20jours
E13	18	E11 ; E12
F1	70	D3dd+63jours
F2	15	F10

F3	25	F11
F4	10	F12
F5	30	F1dd+10jours
F6	45	F5dd+20jours
F7	66	F6
F8	40	F7
F9	30	F8dd
F10	20	F9dd+35jours
F11	40	F10
F12	4	F11fd+10jours
F13	30	F11dd+15jours
F14	17	A15, B13, C6, D5, E13, F13

TABLE 5.1 – Tableau récapitulatif des tâches

*Remarque* : on distingue quatre types de liaisons entre deux tâches :

- Fin-début (fd) : C'est la plus classique, la fin d'une tâche coïncide avec le démarrage d'une autre.



FIGURE 5.1 – La représentation de relation fin-début

- Fin-fin (ff) : Dans le cas où deux (ou plusieurs) tâches doivent terminer en même temps.



FIGURE 5.2 – La représentation de relation fin-fin

- Début-fin (df) : Dans ce cas, la fin d'une tâche est calculée par apport au début d'une autre.



FIGURE 5.3 – La représentation de relation début-fin

- Début-début (dd) : Le démarrage d'une ou plusieurs tâches s'effectue en même temps.



FIGURE 5.4 – La représentation de relation début-début

### 5.3 Planning de réalisation

En raison du nombre important de tâches (70) que comporte le projet étudié, un logiciel spécifique a été utilisé, en l'occurrence MS Project. Ce dernier représente un puissant outil pour les gestionnaires et les planificateurs désirant l'établissement d'un planning prévisionnel des travaux (ordonnancement).

Après l'introduction de l'ensemble des données globales du projet (tâches, durées, ressources, etc.), on obtient les deux figures suivantes du diagramme de Gantt ainsi que le réseau PERT permettant d'illustrer le chemin critique :

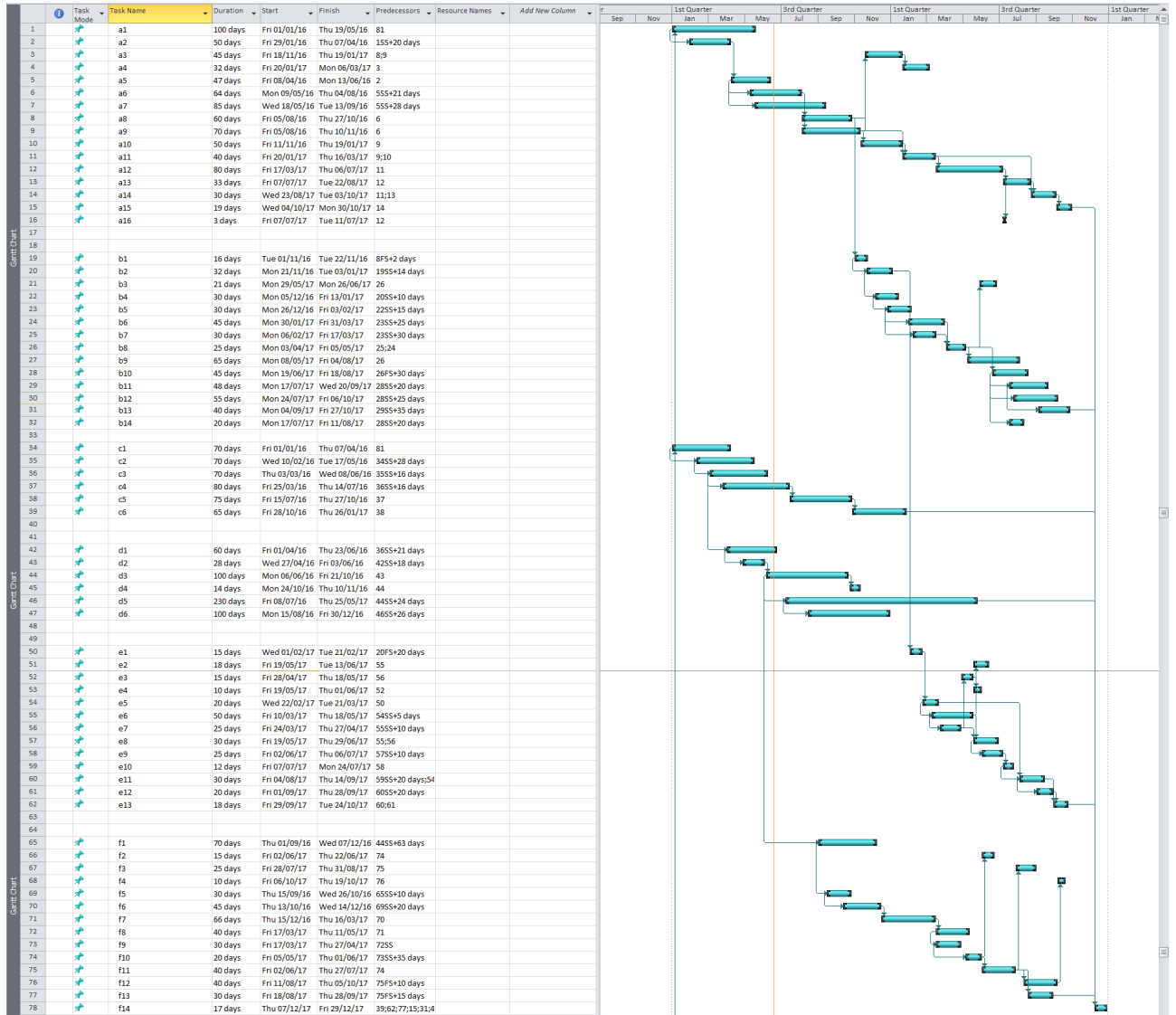


FIGURE 5.5 – Le diagramme de Gantt

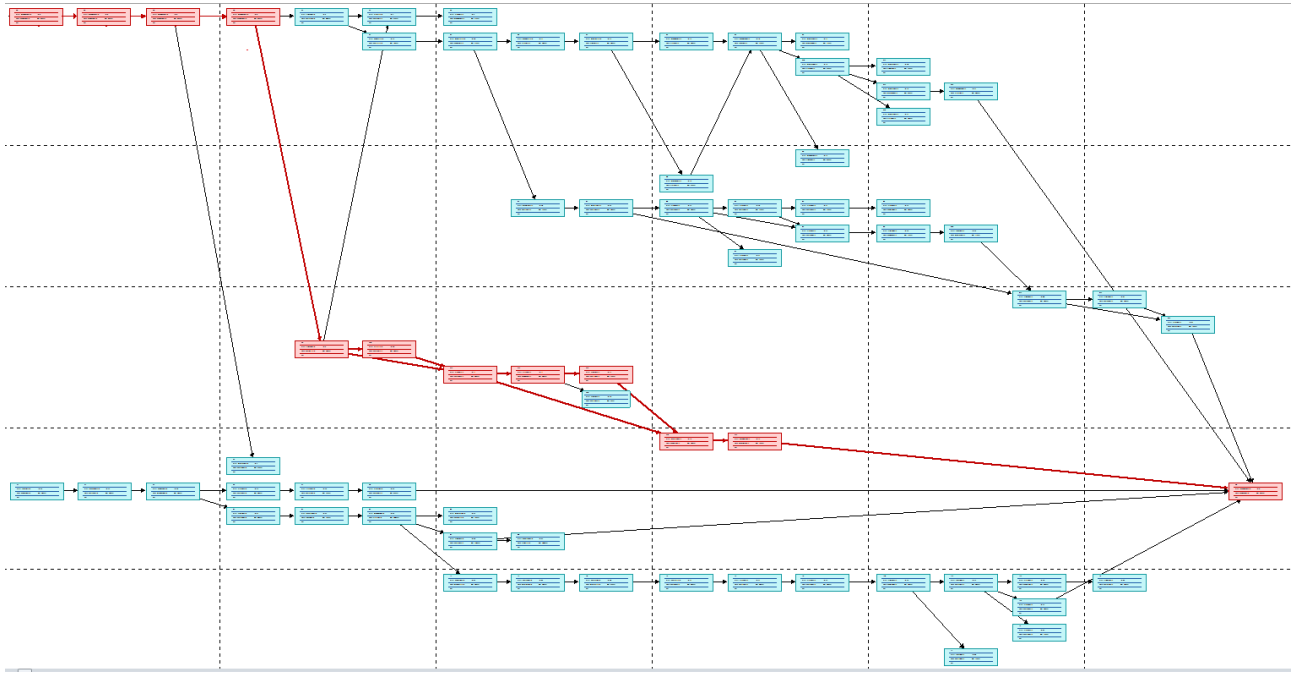


FIGURE 5.6 – Le réseau PERT

## 5.4 Application de l’algorithme Tabou

L’objectif étant de minimiser la durée totale de l’exécution du projet tout en minimisant le coût additionnel induit par l’accélération des tâches (compromis durée/coût), nous avons sélectionné les tâches dont on a la possibilité de réduire la durée moyennant un surcoût comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Tâches	Accélération maximum (jours)	Coût additionnel (DA)
A2	18	900 000,00
A6	20	3 000 000,00
A10	10	1 000 000,00
A12	15	3 500 000,00
A13	8	740 000,00
B1	8	102 500,00
B2	11	150 000,00
B4	16	200 000,00
B6	13	4 000 000,00
B8	10	100 000,00
B13	15	250 000,00
E6	20	100 000,00
E8	19	500 000,00
E9	10	10 000,00
E10	14	600 000,00
E11	7	800 000,00
F6	15	800 000,00
F7	20	1 100 000,00
F11	10	200 000,00
F13	7	200 000,00
F14	3	10 000,00

Sachant qu'un problème d'optimisation multicritère est un problème dont la solution n'est pas unique, mais représente un ensemble de solutions appelé ensemble non-dominé, nous avons, de ce fait, accordé de l'importance alternativement à la minimisation de la durée de réalisation, puis au coût additionnel, et ceci, afin d'illustrer l'importance de chaque critère dans l'obtention de la solution recherchée. Mathématiquement, cela se traduit par les deux cas suivants :

1<sup>er</sup> cas :  $\lambda_1 = 0.75$  : on donne plus d'importance à la minimisation de la durée ( $\lambda_2 = 0.25$ )

2<sup>e</sup> cas :  $\lambda_2 = 0.75$  : on donne plus d'importance à la minimisation du coût additionnel ( $\lambda_1 = 0.25$ )

**Remarque :** nous avons fixé le budget additionnel à 6% du budget total fixé par l'entreprise de réalisation (226 082 100,00 DA), soit :  $C_{max} = 239\ 647\ 026,00$  DA .



### 5.4.1 Interprétation des résultats

Après l'application de l'algorithme Tabou énuméré au chapitre 4 dont l'implémentation a été effectuée sur le langage de programmation MATLAB, on obtient les solutions ci-dessous :

1<sup>er</sup> cas :

Accélération obtenue	Coût additionnel (DA)
90 jours	12 070 000,00 (5%)

Pour  $\lambda_1 = 0.75$ , la durée du projet obtenu est : 21 mois et le coût total de la réalisation est : 238 152 100,00 DA (Annexe 4)

2<sup>er</sup> cas :

Accélération obtenue	Coût additionnel (DA)
40 jours	2 912 500,00 (1.3%)

Pour  $\lambda_2 = 0.75$ , la durée du projet obtenu est : 22 mois et 20 jours, le coût total de la réalisation est : 228 994 600,00 DA (Annexe 5)

### 5.4.2 Comparaison des résultats

Objectifs	Prévision de l'Entreprise et réseau Pert	Algorithme Tabou	
		$\lambda_1 = 0.75$	$\lambda_2 = 0.75$
T (mois)	24 mois	21 mois	22 mois et 20 jours
$C_n + C_{aTOT}$ (DA)	226 082 100,00	238 152 100,00	228 994 600,00

Il est clair que l'algorithme Tabou fournit un meilleur résultat que ceux obtenus par les prévisions de l'entreprise et le réseau Pert, ceci en se basant sur la même disponibilité de ressources. On remarque aussi que le choix des paramètres d'importance a une grande influence sur la qualité de la solution fournie par l'algorithme Tabou.

## Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus par le réseau Pert, ainsi que l'algorithme Tabou, et cela, après avoir fixé alternativement les paramètres d'importance de chaque critère.

Vu que l'objectif principal fixé par la société Sonatrach est la sécurisation du site en question dans les plus brefs délais, alors le choix de la solution obtenue en donnant plus d'importance à la durée de réalisation de projet paraît la plus logique à retenir.

# Conclusion générale

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.

Le but de ce travail est de présenter un problème d'ordonnancement pratique bicritère relevé au sein de l'entreprise Sonatrach, RTC de Bejaia.

Pour résoudre ce problème d'optimisation bicritère, il existe plusieurs méthodes de résolution exactes et approchées, ayant traité ce problème et vu sa complexité, il est nécessaire de faire appel à des heuristiques permettant de trouver de bonnes solutions approchées.

En premier lieu, nous nous sommes attachés à la description de ce problème, qui sera ensuite modélisé sous forme d'un problème mathématique d'optimisation bicritère. Pour terminer, nous avons présenté une approche adéquate pour résoudre le problème de compromis durée/coût dans un contexte de ressources limitées.

Le modèle de compromis durée/coût a été obtenu en combinant des modèles consistant à minimiser la durée totale du projet et le coût additionnel induit par l'accélération.

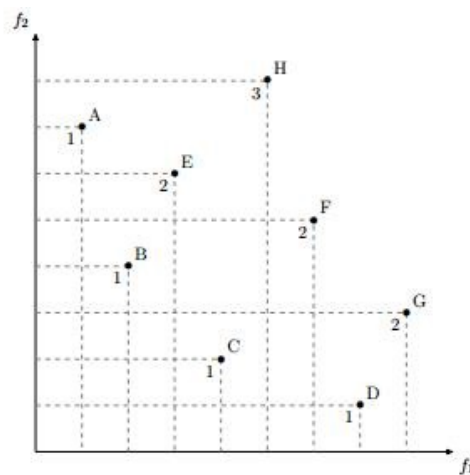
Pour sa résolution, nous avons adapté la méthode Tabou, comme un problème d'optimisation multicritère, avec une solution de compromis. Nous avons, de ce fait, accordé de l'importance alternativement à la minimisation de la durée de réalisation, puis au coût additionnel, et ceci, afin d'illustrer l'importance de chaque critère dans l'obtention de la solution recherchée.

Enfin, nous avons constaté que le choix des paramètres d'importance a une grande influence sur la qualité de la solution fournie par l'algorithme Tabou. Par conséquent, c'est au décideur à qui revient en dernière instance le choix d'une solution efficace qui lui convient.

# Annexes

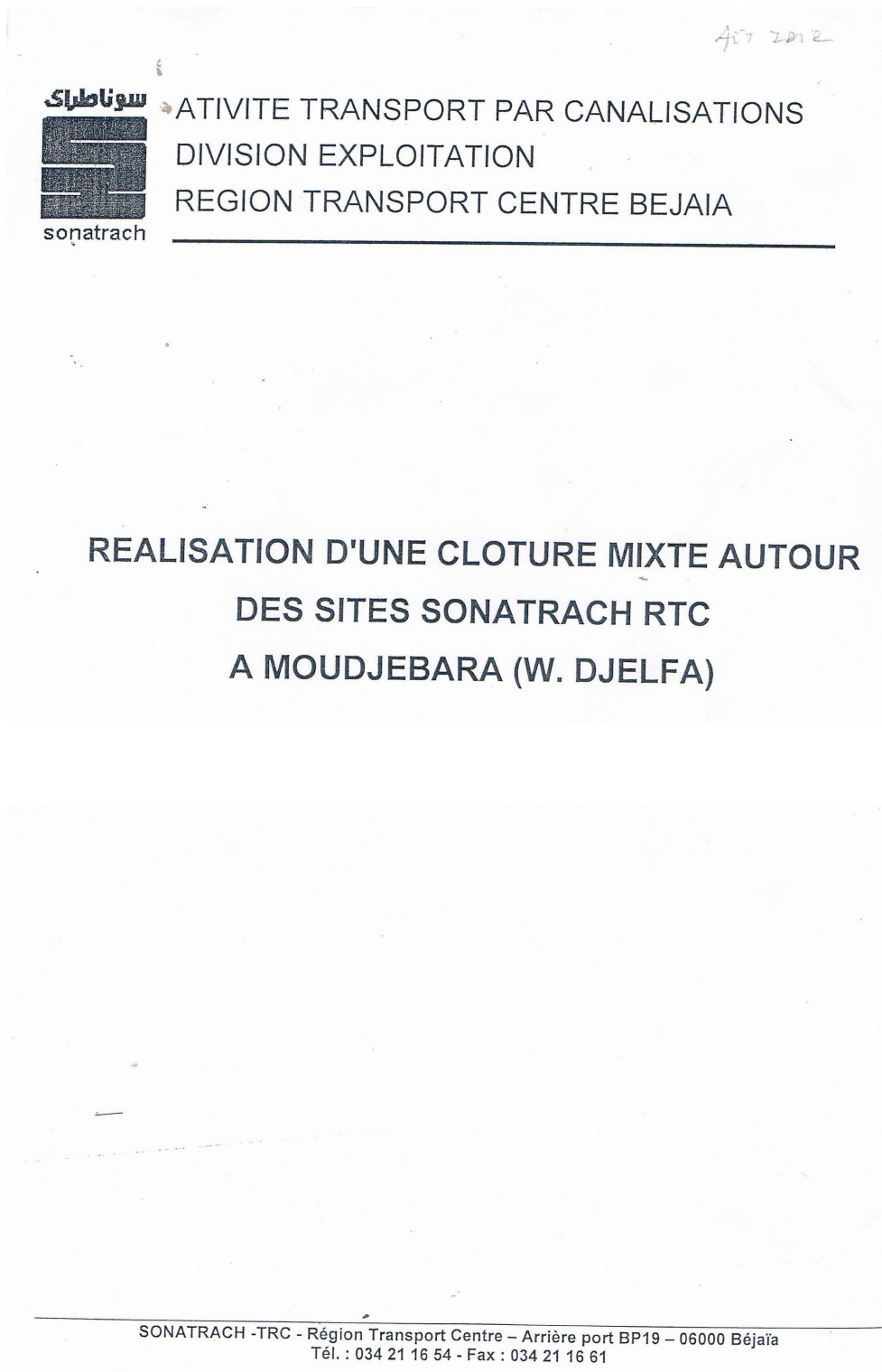
## Annexe 1

### 1. Exemple de ranking



Le ranking d'une population est illustré dans la figure ci-dessus. Dans cet exemple, les solutions A, B, C, D reçoivent le rang 1 car elles ne sont dominées par aucune solution. Les solutions E, F et G ont le rang 2 car elles ne sont dominées que par des solutions de rang 1. Enfin, H est affecté au rang 3.

## Annexe 2



# Annexe 3

Réalisation d'une clôture mixte autour des sites Sonatrach RTC à Moudjebara (W. Djelfa)

## PLANNING GENERAL DES TRAVAUX

N°	Désignation des travaux	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	Clôture mixte	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	Guérites											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3	Piste de servitude	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4	Gabions				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	Caniveaux eaux pluviales																								
6	Eclairage extérieur																								

# Annexe 4

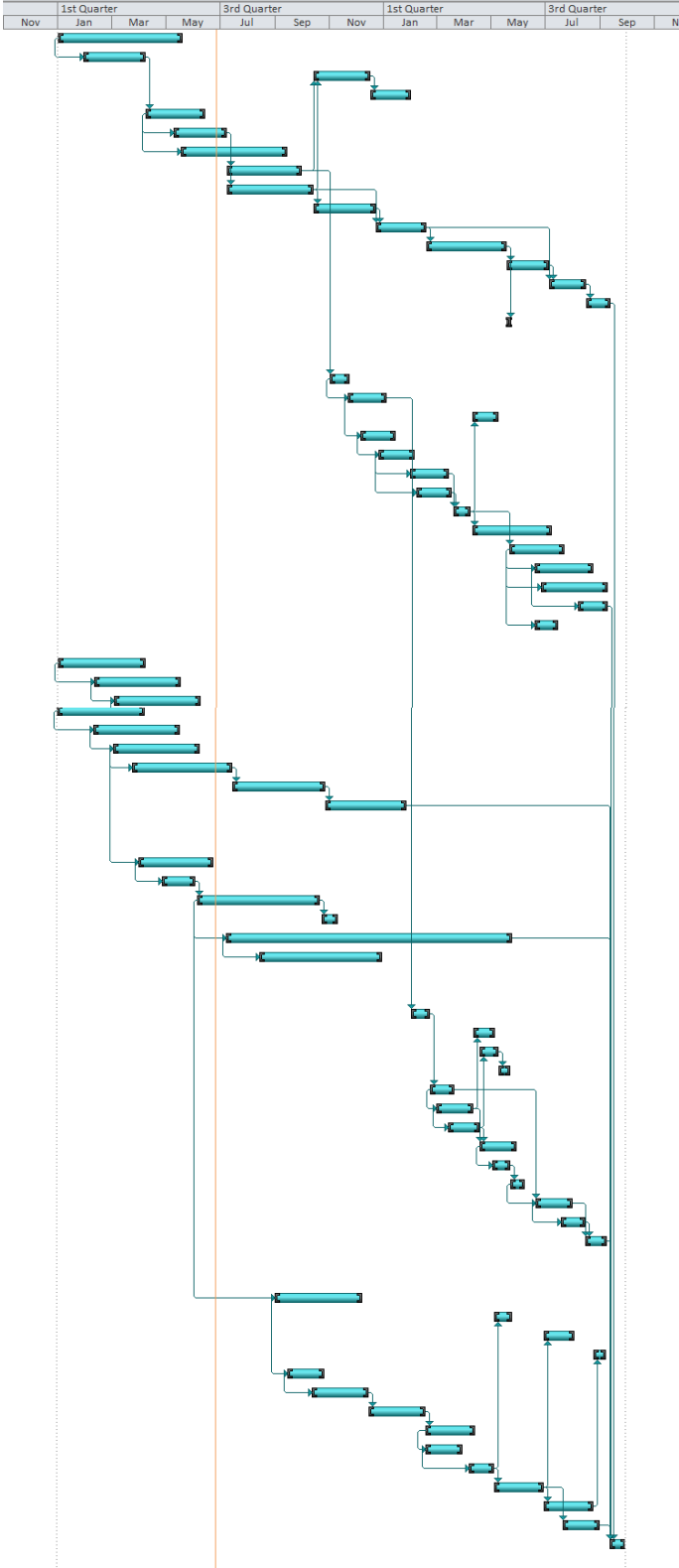


FIGURE 5.7 – Diagramme de Gantt obtenue par l’algorithme Tabou (1<sup>er</sup> cas)

# Annexe 5

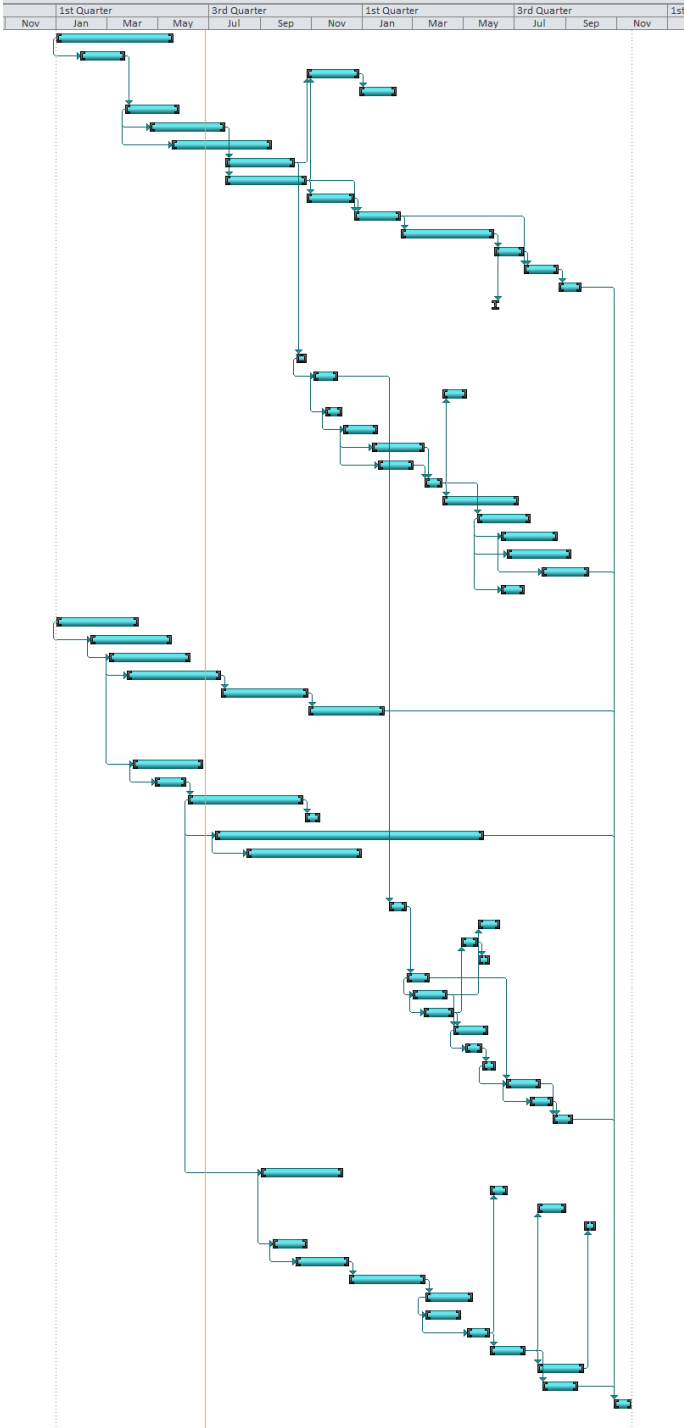


FIGURE 5.8 – Diagramme de Gantt obtenue par l’algorithme Tabou ( $2^{me}$  cas)

# Bibliographie

[1] R. CASSAGNE, M. GOURGAND et S. RODIER : Un outil d'aide au dimensionnement, à la planification et à la visualisation d'un programme opératoire. En Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH), Suisse, 4-6 septembre 2008.

[2] J. M. DALBARADE et B. PETIT-JEAN : Ordonnancement et gestion des projets, MASSON, Paris, 2001.

[3] V. GIARD : Gestion des projets, Economica, Paris, 1991.

[4] C. LIZZARAGA : Contribution au pilotage des projets partagés par des PME en groupe-ment basée sur la gestion des risques, Thèse de Doctorat d'état, Institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

[5] S. CHAABANE, N. MESKENS, A. GUINET et M. LAURENT : Comparison of two methods of operating theatre planning, application in belgian hospital, Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2008.

[6] V. GIARD et C. MIDLER : Management et gestion des projets : bilan et perspectives, IAE, Paris, 1996.

[7] M. PORTMAN : Planification et ordonnancement, Cours, Ecole des mines de Nancy, Nancy, France, 1991.

[8] J. CARLIER et P. CHRETIENNE : Problèmes d'ordonnancement, modélisation, complexité, algorithmes, MASSON, ISBN 2-225-81275-6.

[9] C-H. LIN et C.-J. LIAO : Makespan minimization for multiple uniform machines. Com-



put. Ind. Eng., 2008.

[10] P. ESQUIROL et P. LOPEZ : l'ordonnancement, ECONOMICA, Paris, France, ISBN 2-7178-3798-1.

[11] E. SAULE, P-F. DUTOT et G. MOUNIE : Scheduling With Storage Constraints. In Electronic proceedings of IPDPS 2008, Miami, Florida USA, APR 2008.

[12] CARDOEN, E. DEMEULEMEESTER et J.BELIEN : Operating room planning and scheduling : A literature review, European Journal of Operational Research 201 : 921-932, 2010.

[13] G. FINK : Recherche opérationnelle et réseaux, Lavoisier, Paris, 2002.

[14] A. HAIT, C. ARTIGUES, P. BAPTISTE et M. TREPANIER : Ordonnancement sous contraintes d'énergie et de ressources humaines. In : 11<sup>me</sup> congrès de la Société Française de Génie des Procédés Octobre 2007, Saint-Etienne, France.

[15] L. H. TRUNG : Utilisation d'ordre partiel pour la caractérisation des solutions robustes en ordonnancement. Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2005.

[16] A.LAYEB : Utilisation des Approches d'Optimisation Combinatoire pour La Vérification des Applications Temps Réel, Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine 2010.

[17] F. Y. Edgeworth : Mathematical physics. P. Keagan, London, 1881.

[18] V. Pareto. Cours d'économie politique. Rouge, Lausanne, Suisse, 1896.

[19] I. Charon, A. Germa et O. Hudry : "Méthodes approchées définies par un voisinage", in Méthodes d'optimisation combinatoire, Paris : Masson, 1996, pp. 165-185.

[20] Y. Haimes, L. Lasdon et D. Wismer : Bicriterion formulation for the problems of integrated system identification and system optimization. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1971.

[21] H. Benson : Existence of efficient solutions for vector maximization problems. Journal of theory and applications, 1978.

[22] M.Palpant : Recherche exacte et approchée en optimisation combinatoire : schémas d'intégration et applications. Thèse de Doctorat, Université d'Avignon, 2005.

[23] C.Modern Heuristic : Techniques for Combinatorial Problems advances topics in computer science. Mc Graw-Hill, 1995.

[24] H.Omessaad : Contribution au développement de méthodes d'optimisation Stochastiques application à la conception des dispositifs électrotechniques, Thèse de Doctorat, Université De Lille France, 2003.

[25] Alain Hertz : "L'optimisation Combinatoire", École Polytechnique, Canada, 2006.

[26] A. bouchilaoune et A.Boufadene : L'algorithme de colonie de fourmis pour l'ordonnement des taches d'un projet, cas de la cité Béni Mansour, Sonatrach. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur en Recherche Opérationnelle. Université de Bejaia, 2014.

[27] N.Meziani et N.Ichalalène : Résolution d'un problème d'ordonnement bicritère de type job shop flexible : cas de Danone-Djurdjura. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur en Recherche Opérationnelle. Université de Bejaia, 2005.

[28] Artigues et Demassey : Gestion de projet, dans Gestion de production et ressources humaines : Méthodes de planification dans les systèmes productifs, 2005.

[29] Hartmann et Kolisch : Experimental investigation of heuristics for resourceconstrained project scheduling : An update. European Journal of Operational Research, 2006.

[30] Pritsker, Watters et Wolfe : Multi-project scheduling with limited resources : a zero-one programming approach. Management Science, 1969.

[31] A. Hertz : "Métaheuristiques," Notes de cours, Théorie, Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions GERAD.

[32] I. Charon, A. Germa et O. Hudry : "Méthodes approchées définies par un voisinage," in Méthodes d'optimisation combinatoire, Paris, 1996.

[33] Merrie Barron et Andrew R. Barron : [http ://www.pmhut.com/history-of-project-](http://www.pmhut.com/history-of-project-)

management, June 6, 2011.

[34] K.Berrani et F.Iheddaden : Conception et réalisation d'un outil de gestion de projet pour RTC Sonnatrach. Mémoire de fin d'étude d'ingéniorat en Recherche Opérationnelle. Université de Bejaia, 2010.

[35] K.Berrani et F.Iheddaden : Conception et réalisation d'un outil de gestion de projet pour RTC Sonnatrach. Mémoire de fin d'étude d'ingéniorat en Recherche Opérationnelle. Université de Bejaia, 2010.

# Résumé

L'ordonnancement consiste à organiser l'exécution d'un ensemble d'activités soumises à des contraintes de temps et/ou de ressources. Au sein de ce groupe de problèmes, l'un des plus généraux est l'ordonnancement de projet à moyens limités ou RCPSP (Resource-Constrained Project Scheduling Problem), qui est l'un des problèmes d'ordonnancement cumulatif les plus connus.

Notre étude traite le problème d'accélération de projets en mettant l'emphase sur le compromis durée/coût. Nous présentons une métaheuristique basée sur l'algorithme Tabou pour l'accélération de projets de taille importante, permettant de minimiser le temps de réalisation de ce projet tout en déterminant les meilleures accélérations possibles.

**Mots clés :** Ordonnancement, RCPSP, contraintes de temps et/ou de ressources, Métaheuristique, Accélération de projet, méthode Tabou, compromis durée/coût, etc.

# Abstract

Scheduling is to organize the implementation of a set of activities subject to constraints of time and/or resources. Within this group of problems, one of the generals is the sequencing project of limited means or RCPSP (Resource-Constrained Project Scheduling Problem), which is one of the best known cumulative scheduling problems.

Our study examines the project acceleration problem with emphasis on compromise time/cost. We present a metaheuristic algorithm based on Tabu for the acceleration of large projects, to minimize the time to this project while determining the best possible acceleration.

**Key words :** Scheduling, RCPSP, time constraints and/or resources, metaheuristic, project acceleration, method Tabou, compromise time/cost.