

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

**Université Abderahmane Mira de Béjaïa**



Faculté des sciences Exactes

Département de Recherche Opérationnelle



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDE

*Présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Recherche Opérationnelle*

*Option : Modélisation Mathématique et Techniques de Décision*

**Thème**

---

# **Ordonnancement des tâches d'un projet à ressources limitées avec contrainte de délai**

*Cas d'un projet réalisé par Sonatrach Béjaïa*

---

par :

MESSAOUDI Aïssa & CHEURFA Zoulikha

devant le jury composé de :

|                 |                               |                    |                           |
|-----------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------|
| Présidente :    | M <sup>elle</sup> K. HASSAINI | M. A. B            | U. A-Mira Béjaïa.         |
| Examineur :     | M <sup>r</sup> M. CHERFAOUI   | M. A. A            | U. M-Kheidar Biskra.      |
| Examinatrice :  | M <sup>me</sup> F. DJOUADI    | M. A. B            | U. A-Mira Béjaïa.         |
| Rapporteur :    | M <sup>r</sup> M. BOUALEM     | M. C. A            | U. A-Mira Béjaïa.         |
| Co-Rapporteur : | M <sup>me</sup> K. ADEL       | M. A. A            | U. A-Mira Béjaïa.         |
| Invité :        | M <sup>r</sup> H. AIT IDIR    | Ingénieur planning | RTC. Sonatrach de Béjaïa. |

Année Universitaire 2012 – 2013



# Remerciements

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements et toutes nos gratitude à :

✠ Dieu le tout puissant, de nous avoir donné le courage, la force, la santé et la persistance pour mener à terme ce travail.

✠ M<sup>r</sup> H. AIT IDIR pour avoir accepté de nos proposer le sujet de ce mémoire, pour avoir bien su, grâce à sa compétence et sa riche expérience, nous guider dans la réalisation de ce modeste travail et pour ses précieux conseils. Nous tenons à lui exprimer nos plus profond respect pour sa patience et pour tous les efforts qu'il a consentis et tout le temps précieux qu'il nous a consacré pour la réalisation de ce travail ; ainsi M<sup>r</sup> Z. AOUZELLAG de la RTC-Sonatrach de Béjaïa qui as tant fait pour un stage au sein de cette entreprise. Et pour tous les personnels de département TNF de la RTC pour leurs accueils pendant la période de stage.

✠ Notre encadreur, M<sup>r</sup> M. BOUALEM pour avoir accepté de dirigeant ce travail, et pour tous ses précieux conseils.

✠ Notre co-encadreur, M<sup>me</sup> K. ADEL pour son aide et ces conseils précieux.

✠ Tous les membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail, pour leurs précieuses recommandations et pour leurs fructueux conseils qui ont nettement apprécié la finalité de ce mémoire ; c'est un grand honneur et un grand plaisir que :

M<sup>elle</sup> : K. HASSAINI

M<sup>r</sup> : M. CHERFAOUI

M<sup>me</sup> : F. DJOUADI

aient accepté de juger notre travail.

✠ Nous remercions M<sup>r</sup> L. AMRANI de l'université de Sétif pour toute la documentation qu'il nous a fournis, ainsi que M<sup>r</sup> S. ZIANI pour son aide.

✠ Un très grand et très spéciale merci à nos parents, et à tout nos familles.

✠ Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à :

✓ Tout le corps administratif du département Recherche Opérationnelle du l'université A. Mira de Béjaïa, pour les efforts qu'ils ont consentis afin de faciliter l'achèvement de ce travail.

✓ Toute la promotion 2012/2013 du Master Recherche Opérationnelle du l'université A. Mira de Béjaïa, pour leurs soutien et conseils lors de la réalisation de ce travail.

✓ Toute personne ayant, de près ou de loin, contribué à la concretisation de ce modeste travail.



**Je dédie ce modeste travail á :**

- \* Mes très chers parents, à qui je dois ce que je suis.
- \* A mes frères et sœurs.
- \* A mes neveux et nièces et leurs parents.
- \* A mon grand frère "Hamou" et sa femme.
- \* A ma grand-mère "Fatima" et que Dieu la protège.
- ♡ A ma très chère fiancée "souad" pour tous le courage et l'amour qui ma donnée durant tout cette période et qui ma supporté.
- \* A tout mes adorables amis.
- \* Toutes personnes qui connaissent "Aissa".

Aissa



Je dédie ce modeste travail à :

\* Ma chère mère et mon chère père source de tendresse et la raison de mon existence, qui méritent tout le respect du monde pour leurs encouragements, leurs soutiens et leurs conseils et qui ont consacré leur vie pour mon bonheur que Dieu leur accorde une longue vie.

\* Mes grandes mères, pour leurs précieux conseils et que Dieu les protègent.

\* Ma très chère sœur : Kahina.

\* Mes très chers frères : Lyes et Wahid.

\* Mes oncles et mes tantes paternels et maternels.

\* Mes cousins et cousines.

\* Mes deux copines de chambre.

\* Tous mes ami(e)s.

\* Toutes personnes qui connaissent "Zoulikha".

Zoulikha

# Table des matières

|   |          |
|---|----------|
| Table des Figures   | vii      |
| Liste des tableaux  | viii     |
| Liste des abréviations  | ix       |
| Introduction Générale   | 1        |
| <b>1 Présentation de l'entreprise et position du problème</b>             | <b>3</b> |
| 1.1 Historique . . . . .  | 3        |
| 1.2 Objectifs et évolution . . . . .                                      | 3        |
| 1.3 Présentation de l'Activité Transport par Canalisation (TRC) . . . . . | 4        |
| 1.4 Organisation structurelle et fonctionnelle de la RTC-Béjaïa . . . . . | 4        |
| 1.5 Présentation des différentes structures de la RTC . . . . .           | 5        |
| 1.5.1 Direction régionale . . . . .                                       | 5        |
| 1.5.2 Secrétariat . . . . .   | 5        |
| 1.5.3 Assistant de Sûreté Interne (ASI) . . . . .                         | 5        |
| 1.5.4 Département HSE . . . . .   | 5        |
| 1.5.5 Sous direction exploitation . . . . .                               | 6        |
| 1.5.5.1 Département exploitation liquide . . . . .                        | 6        |
| 1.5.5.2 Département exploitation gaz . . . . .                            | 6        |
| 1.5.6 Sous direction Technique . . . . .                                  | 6        |
| 1.5.6.1 Département maintenance . . . . .                                 | 6        |
| 1.5.6.2 Département protection des ouvrages . . . . .                     | 6        |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 1.5.6.3  | Département approvisionnement et Transport . . . . .       | 6         |
| 1.5.6.4  | Département travaux neufs (TNF) . . . . .                  | 7         |
| 1.5.7    | Sous direction finance et juridique . . . . .              | 8         |
| 1.5.7.1  | Département finances . . . . .                             | 8         |
| 1.5.7.2  | Département juridique . . . . .                            | 8         |
| 1.5.7.3  | Département budget et contrôle de gestion . . . . .        | 8         |
| 1.5.8    | Sous direction administration . . . . .                    | 8         |
| 1.5.8.1  | Département administration et social . . . . .             | 9         |
| 1.5.8.2  | Département ressources humaines et communication . . . . . | 9         |
| 1.5.8.3  | Département moyens généraux . . . . .                      | 9         |
| 1.5.9    | Centre informatique . . . . .                              | 9         |
| 1.6      | Position du problème . . . . .                             | 10        |
| <b>2</b> | <b>Généralités et Définitions</b>                          | <b>12</b> |
| 2.1      | Gestion de projet . . . . .                                | 12        |
| 2.1.1    | Définition du projet . . . . .                             | 12        |
| 2.1.2    | Cycle de vie d'un projet . . . . .                         | 13        |
| 2.1.3    | Définition des objectifs du projet . . . . .               | 14        |
| 2.1.4    | Structure de découpage de projet (WBS) . . . . .           | 14        |
| 2.1.5    | Étapes de réalisation d'un projet . . . . .                | 15        |
| 2.2      | Problème d'ordonnancement de projet . . . . .              | 16        |
| 2.2.1    | Notions de base en ordonnancement . . . . .                | 16        |
| 2.2.1.1  | Tâche . . . . .  | 16        |
| 2.2.1.2  | Ressource . . . . .  | 16        |
| 2.2.1.3  | Contraintes . . . . .                                      | 17        |
| 2.2.2    | Les éléments de la théorie des graphes . . . . .           | 17        |
| 2.2.2.1  | Définition d'un graphe . . . . .                           | 17        |
| 2.2.2.2  | Chemin . . . . .   | 18        |
| 2.2.2.3  | Date au plus tôt . . . . .                                 | 18        |
| 2.2.2.4  | Date au plus tard . . . . .                                | 18        |
| 2.2.2.5  | Intervalle de flottement . . . . .                         | 18        |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.2.2.6  | Tâche critique . . . . .  | 19        |
| 2.2.2.7  | Chemin critique . . . . .   | 19        |
| 2.2.2.8  | Une marge . . . . .   | 19        |
| <b>3</b> | <b>Modélisation et approches de résolution</b>                          | <b>20</b> |
| 3.1      | Minimisation du Makespan . . . . .                                      | 20        |
| 3.2      | Méthodes de résolution . . . . .  | 21        |
| 3.2.1    | Bref historique . . . . .   | 21        |
| 3.2.2    | La méthode CPM . . . . .  | 22        |
| 3.2.3    | La méthode MPM . . . . .  | 22        |
| 3.2.4    | La méthode P.E.R.T . . . . .  | 23        |
| 3.2.4.1  | Résolution . . . . .  | 24        |
| 3.2.4.2  | Interprétation des résultats . . . . .                                  | 25        |
| 3.3      | Problème de lissage des ressources . . . . .                            | 27        |
| 3.3.1    | Définition et notations . . . . .                                       | 27        |
| 3.4      | Méthodes de résolution pour RLP . . . . .                               | 28        |
| 3.4.1    | Les heuristiques . . . . .  | 28        |
| 3.4.1.1  | Diagramme d'utilisation de la ressource $R_3$ avant et après le lissage | 34        |
| 3.4.2    | Les métaheuristiques . . . . .  | 36        |
| 3.4.3    | Les méthodes de résolution exactes . . . . .                            | 39        |
| <b>4</b> | <b>Application</b>  | <b>40</b> |
| 4.1      | Description du problème . . . . .                                       | 40        |
| 4.1.1    | Collecte des données . . . . .  | 41        |
| 4.2      | Minimisation de la durée totale de projet . . . . .                     | 46        |
| 4.2.1    | Application de la méthode P.E.R.T . . . . .                             | 46        |
| 4.3      | Le lissage pour les ressources . . . . .                                | 48        |
| 4.3.1    | Application de la méthode de Burgess-Killebrew . . . . .                | 48        |
| 4.3.1.1  | Diagramme des charges . . . . .   | 48        |
| 4.3.1.2  | Diagramme d'utilisation de la ressource Maçon avant le lissage . . .    | 50        |
| 4.3.1.3  | Diagramme d'utilisation de la ressource Manœuvre avant le lissage       | 51        |
| 4.4      | Résultats et interprétations . . . . .                                  | 51        |

---

|         |  |           |
|---------|--|-----------|
| 4.4.1   | Résultats . . . . .  | 51        |
| 4.4.2   | Interprétations des résultats . . . . .  | 57        |
| 4.4.2.1 | Diagramme d'utilisation de la ressource Maçon avant et après le lissage              | 59        |
| 4.4.2.2 | Diagramme d'utilisation de la ressource Manœuvre avant et après le lissage . . . . . | 60        |
|         | <b>Conclusion Générale</b>   | <b>61</b> |
|         | <b>Bibliographie</b>   | <b>63</b> |
|         | <b>Annexe A</b>  | <b>65</b> |
|         | <b>Annexe B</b>  | <b>71</b> |
|         | <b>Annexe C</b>  | <b>77</b> |

# Table des figures

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Organigramme de la RTC-Béjaia. . . . .  | 5  |
| 1.2  | Organigramme du Département Travaux Neufs . . . . .   | 7  |
| 2.1  | Cycle de vie d'un projet . . . . .  | 13 |
| 2.2  | Structure de découpage d'un projet (WBS) . . . . .  | 14 |
| 3.1  | Représentation du réseau MPM . . . . .  | 23 |
| 3.2  | Représentation d'une tâche dans un réseau P.E.R.T . . . . .                                   | 24 |
| 3.3  | Organigramme d'obtention d'un ordonnancement de durée minimale [25]. . . . .                  | 26 |
| 3.4  | Représentation des activités et les ressources sur le diagramme de Gantt . . . . .            | 30 |
| 3.5  | Déplacement de l'activité N° 8 d'un mois vers la fin du projet . . . . .                      | 31 |
| 3.6  | Déplacement de l'activité N° 5 d'un mois vers la fin du projet . . . . .                      | 32 |
| 3.7  | Déplacement de l'activité N° 2 d'un mois vers la fin du projet . . . . .                      | 33 |
| 3.8  | $R_1$ -temps avant et après le lissage . . . . .  | 33 |
| 3.9  | $R_2$ -temps avant et après le lissage . . . . .  | 34 |
| 3.10 | $R_3$ -temps avant et après le lissage . . . . .  | 35 |
| 4.1  | La représentation des activités sur le diagramme de Gantt . . . . .                           | 42 |
| 4.2  | Réseau P.E.R.T . . . . .  | 47 |
| 4.3  | La représentation des activités et les ressources avant le lissage sur le diagramme . . . . . | 49 |
| 4.4  | Diagramme Maçon-temps avant le lissage. . . . .   | 50 |
| 4.5  | Diagramme Manœuvre-temps avant le lissage. . . . .  | 51 |
| 4.6  | La représentation des activités et les ressources après le lissage . . . . .                  | 58 |
| 4.7  | Diagramme Maçon-temps avant et après le lissage. . . . .                                      | 59 |

---

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.8  | Diagramme Manœuvre-temps après le lissage. . . . .                               | 60 |
| 4.9  | Diagramme Coffreur-temps avant le lissage . . . . .                              | 65 |
| 4.10 | Diagramme Ferrailleur-temps avant le lissage . . . . .                           | 65 |
| 4.11 | Diagramme Peintre-temps avant le lissage . . . . .                               | 66 |
| 4.12 | Diagramme Plombier-temps avant le lissage . . . . .                              | 66 |
| 4.13 | Diagramme Electricien bâtiment-temps avant le lissage . . . . .                  | 67 |
| 4.14 | Diagramme Chauffeur VL/PL-temps avant le lissage . . . . .                       | 67 |
| 4.15 | Diagramme Conducteur bétonnière/Dumper-temps avant le lissage . . . . .          | 68 |
| 4.16 | Diagramme Grutier-temps avant le lissage . . . . .                               | 68 |
| 4.17 | Diagramme Camion-temps avant le lissage . . . . .                                | 69 |
| 4.18 | Diagramme Grue-temps avant le lissage . . . . .                                  | 69 |
| 4.19 | Diagramme Dumper-temps avant le lissage . . . . .                                | 70 |
| 4.20 | Diagramme Bétonnière-temps avant le lissage . . . . .                            | 70 |
| 4.21 | Diagramme Coffreur-temps avant et après le lissage . . . . .                     | 71 |
| 4.22 | Diagramme Ferrailleur-temps avant et après le lissage . . . . .                  | 71 |
| 4.23 | Diagramme Peintre-temps avant et après le lissage . . . . .                      | 72 |
| 4.24 | Diagramme Plombier-temps avant et après le lissage . . . . .                     | 72 |
| 4.25 | Diagramme Electricien bâtiment-temps avant et après le lissage . . . . .         | 73 |
| 4.26 | Diagramme Chauffeur VL/PL-temps avant et après le lissage . . . . .              | 73 |
| 4.27 | Diagramme Conducteur bétonnière/Dumper-temps avant et après le lissage . . . . . | 74 |
| 4.28 | Diagramme Grutier-temps avant et après le lissage . . . . .                      | 74 |
| 4.29 | Diagramme Camion-temps avant et après le lissage . . . . .                       | 75 |
| 4.30 | Diagramme Grue-temps avant et après le lissage . . . . .                         | 75 |
| 4.31 | Diagramme Dumper-temps avant et après le lissage . . . . .                       | 76 |
| 4.32 | Diagramme Bétonnière-temps avant et après le lissage . . . . .                   | 76 |

# Liste des tableaux

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | Tableau des Besoins de chaque activité . . . . .          | 29 |
| 4.1 | Tableau des activités du projet . . . . .                 | 41 |
| 4.2 | Tableau des activités après leurs éclatement. . . . .     | 43 |
| 4.3 | Tableau des disponibilités des ressources. . . . .        | 44 |
| 4.4 | Matrice des besoins. . . . .                              | 45 |
| 4.5 | Tableau des différents dates et marges du projet. . . . . | 46 |

# Liste des abréviations

- AEP** : Adduction en Eau Potable.
- ASI** : Assistance Sûreté Interne.
- Chauffeur VL/PL** : Chauffeur Voiture Léger/ Poids Lourd.
- CPM** : Critical Path Methods.
- CPS** : Creative Problem Solving.
- EDF** : Électricité De France.
- ENEP** : Entreprise Nationale d'Engineering Pétrolière.
- ENGTP** : Entreprise Nationale des Grands Travaux Pétroliers.
- GNL** : Gaz Naturel Liquéfié.
- GPL** : Gaz de Pétrole Liquéfié.
- HSE** : Hygiène, Sécurité et Environnement.
- MPM** : Méthode des Potentiels Métra.
- NAFTAL** : Société Nationale de Commercialisation et des Produits Pétroliers.
- P.E.R.T** : Program Evaluation and Review Technic.
- PNB** : Produit National Brut.
- RLP** : Resource Leveling Problem.
- RTC** : Région Transport Centre.
- SBM** : Station de Beni Mansour.
- SONATRACH** : Société Nationale pour la recherche, la production, le transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures.
- TRC** : Transport par Canalisation.
- VIP** : Very Important Person.
- VRD** : Voiries Réseaux Divers.
- WBS** : Work Breakdown Structure.

# Introduction Générale

Selon les dirigeants des entreprises et les experts du monde des affaires, la gestion du projet apparaît comme la tendance de l'avenir, car elle fournit un ensemble d'outils efficaces qui permettent aux gestionnaires d'améliorer leur capacité de planifier, de mettre en œuvre et de gérer des activités en vue d'atteindre des objectifs organisationnels précis. Toutefois, la gestion du projet constitue plus qu'un simple ensemble d'outils, il s'agit d'un style de gestion par objectifs qui accorde beaucoup d'importance à l'établissement de relations de collaboration entre des employés aux fonctions et aux personnalités différentes et de coordonner leurs efforts collectifs afin d'obtenir le meilleur profit [2].

La gestion du projet est une composante très importante de la communauté de recherche opérationnelle (R.O). De nombreux travaux traitent de l'ordonnancement des tâches et l'optimisation des déploiements des ressources dans un projet, mais aussi de logistique (tournées de véhicule, conditionnement, ...) et de planification. Gestion des ressources est un élément intrinsèque de la gestion du projet [11, 19]. Cette gestion assure que le projet est terminé à temps et que la qualité est comme définie précédemment [13, 20].

La fonction ordonnancement vise à organiser l'utilisation des ressources (matériels, personnels, ...), qui se trouve dans les chantiers ou les services de l'entreprise, pour satisfaire les objectifs de l'entreprise. Les méthodes d'ordonnancement sont bien documentées dans la littérature. Elles se différencient par la nature du problème en question, la nature des contraintes prises en compte, les objectifs à satisfaire et la nature de l'approche de résolution adoptée (heuristiques, métaheuristiques, méthodes exactes, ...).

Cependant, la prise des décisions au sein d'une entreprise doit se faire de manière à satisfaire les différents objectifs. Le choix d'un ordonnancement doit lui aussi se plier à cet aspect linéaire d'où la difficulté, de résoudre un tel problème (NP-difficile) par les méthodes exactes, que la recherche opérationnelle met à notre disposition, ceci justifie le recours aux méthodes heuristiques.

Le développement des méthodes efficaces pour une gestion optimale, des projets, s'avère indispensable pour toute entreprise, qui souhaite durer dans le temps. Les entreprises algériennes les plus distinguées comme RTC-Sonatrach de Béjaïa n'échappent pas à cette règle. C'est pour cette

raison, que cette entreprise, est engagée sur la voie de l'investissement dans la recherche de nouvelles stratégies de gestion.

Dans ce travail, notre but principal, est de satisfaire les objectifs et les engagements de la RTC-Sonatrach de Béjaia, pour avantager le succès de ses projets futurs, en utilisant la méthode heuristique (méthode de Burgess-Killebrew).

Notre document se compose d'une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale.

- Le premier chapitre est consacré à la présentation structurelle et fonctionnelle de l'entreprise RTC-Sonatrach, notamment le département TNF<sup>1</sup> où nous avons effectué notre stage ainsi que la position du problème.
- Le deuxième chapitre est focalisé sur le rappel de quelques généralités sur la gestion du projet et les différentes notions de base, liées à l'ordonnancement du projet.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons la modélisation du problème d'ordonnancement qui calcule la durée minimale du projet et la modélisation du problème de lissage des ressources (RLP). En particulier, nous évoquons quelques méthodes de résolution des deux problèmes.
- Le dernier chapitre est consacré à une étude de cas qui consiste en la réalisation des travaux rénovation de la base de vie SBM Beni Mansour (Bouira), pour cela on précèdera comme suit :
  1. Minimisation de la durée totale du projet, en appliquant la méthode P.E.R.T.
  2. Faire le lissage pour les ressources, en appliquant la méthode de Burgess-Killebrew.
- Notre travail s'achève par une conclusion générale et quelques perspectives.

---

1. TNF : Travaux Neufs

# Présentation de l'entreprise et position du problème

## 1.1 Historique

**SONATRACH** : Société Nationale de Transport et Commercialisation des Hydrocarbures, est une entreprise algérienne créée le 31/12/1963 par décret n°63/491 ; ses activités principales étaient le transport et la commercialisation des hydrocarbures. À partir de 1966, elle élargit ses activités à la recherche et la transformation des hydrocarbures.

Après 1971, la nationalisation des secteurs des hydrocarbures conduit à une restructuration et réorganisation efficace qui a donné naissance à 18 filiales à savoir NAFTAL, ENEP, ENGTP, etc.

SONATRACH est la première société du continent africain, elle est classée 11<sup>ème</sup> parmi les compagnies pétrolières mondiales, 2<sup>ème</sup> exportateur de GNL et 3<sup>ème</sup> exportateur de gaz naturel. Sa production globale (tous produits confondus) est de 2002 millions de tonnes. Ses activités constituent environ 30% du PNB<sup>1</sup> de l'Algérie et emploie environ 120000 personnes dans l'ensemble du groupe.

## 1.2 Objectifs et évolution

Les objectifs de SONATRACH durant les 25 années à venir consistent à doubler le rythme de la production pour atteindre la barre de 100 Tep<sup>2</sup> annuellement ce qui donnera une production cumulée prévisionnelle de 2,5 milliards de Tep à la fin de l'année 2020. Aujourd'hui l'évolution de l'économie mondiale des hydrocarbures ne laisse pas d'autres alternatives à SONATRACH que l'adaptation, l'amélioration et la modernisation des conditions de travail. Pour cela, SONATRACH s'appuie sur

---

1. PNB : Produit National Brut.

2. Tep : Tonne d'équivalent pétrole.

les valeurs fondamentales de la culture de l'entreprise, l'engagement dans l'intérêt et l'esprit de l'éthique. Le professionnalisme, la quête de l'excellence constituent les valeurs de l'entreprise.

Les activités principales de SONATRACH se résument comme suit :

- Exploitation et recherche des gisements d'hydrocarbures ;
- Liquéfaction et transformation du gaz ;
- Commercialisation des hydrocarbures ;
- Le transport des hydrocarbures.

### **1.3 Présentation de l'Activité Transport par Canalisation (TRC)**

Les régions de l'activité transport par canalisation ont, à leur charge, l'acheminement des hydrocarbures : le pétrole brut, le gaz, le GPL (gaz de pétrole liquéfié), et le condensât depuis les champs de production jusqu'aux zones de stockage, aux complexes GNL et GPL, aux raffineries, aux ports pétroliers ainsi que vers les pays importateurs.

Dotées d'infrastructures industrielles modernes, ces régions exploitent et assurent la maintenance de leurs ouvrages, dans les meilleures conditions d'économie, de qualité, de sécurité et de respect de l'environnement.

Véritablement pôles industriels, ces régions couvrent tout le territoire national à travers un maillage constitué de pipelines et de gazoducs, de parcs de stockage et de stations de pompage et de compression.

Au nombre de cinq, ces régions complémentaires constituent une synergie prouvée pour l'accomplissement des missions assignées par le groupe.

Les cinq Régions de TRC sont :

1. RTO : Région Transport Ouest (Arzew) ;
2. RTH : Région Transport Haoud El Hamra (Centre distribution) ;
3. RTE : Région Transport Est (Skikda) ;
4. RTC : Région Transport Centre (Béjaïa) ;
5. RTI : Région Transport In Aménas.

### **1.4 Organisation structurelle et fonctionnelle de la RTC-Béjaïa**

Les différents départements et directions de la RTC sont représentés sur l'organigramme ci-après.

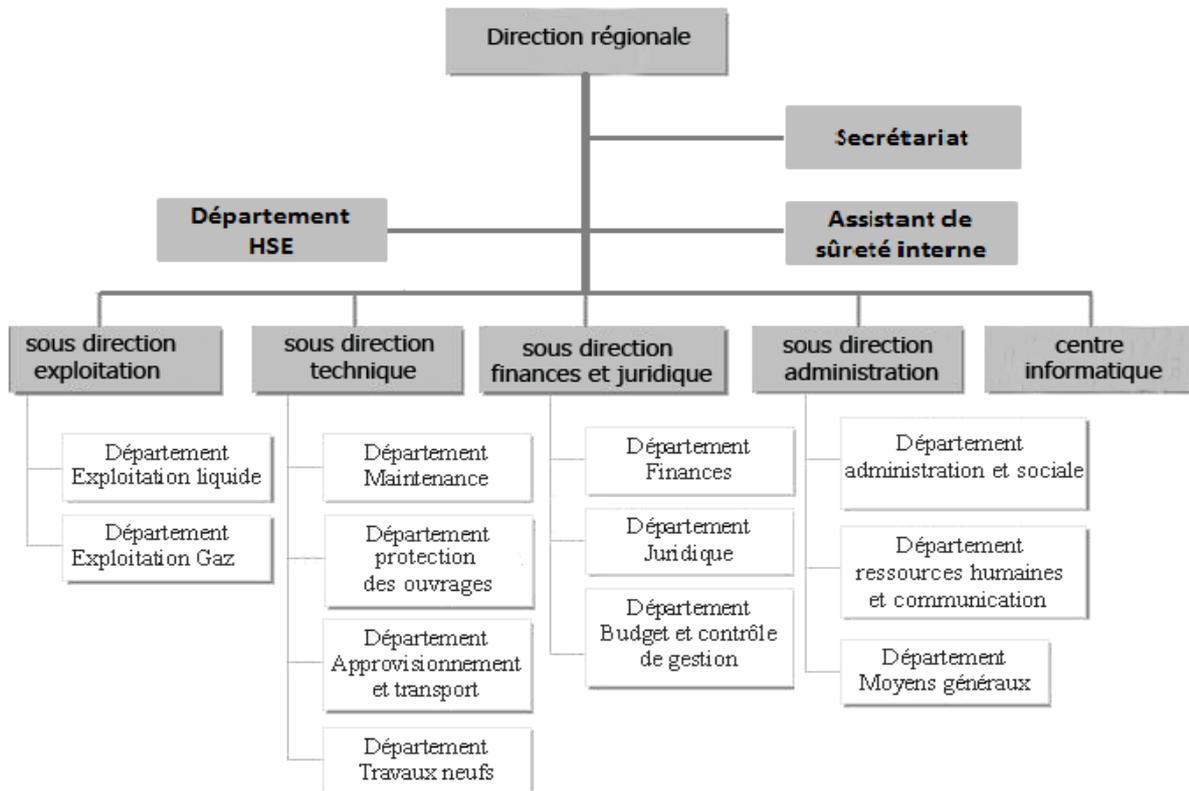


FIGURE 1.1 – Organigramme de la RTC-Béjaia.

## 1.5 Présentation des différentes structures de la RTC

### 1.5.1 Direction régionale

Son rôle est de coordonner les efforts des différents départements et sous-directions de la région, elle est dirigé par un directeur régionale.

### 1.5.2 Secrétariat

Son rôle est d'aider le directeur régionale.

### 1.5.3 Assistant de Sûreté Interne (ASI)

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

### 1.5.4 Département HSE

Il a pour mission la protection et la sauvegarde du patrimoine humain et matériel de la région et veille au respect et à la stricte application des normes et standards en matière d'hygiène, de sécurité et de protection de l'environnement.

### 1.5.5 Sous direction exploitation

Cette institution chargée de l'exploitation des installations de la région. Elle est composée de deux départements :

#### 1.5.5.1 Département exploitation liquide

Il est chargé de la gestion et de l'exploitation des deux ouvrages suivants :

1. L'oléoduc 24 pouces reliant Haoud-El-Hamra à Béjaïa, avec toutes ses stations de pompage (Djemaa, Biskra, M'sila, Beni Mansour) et le Terminal de Béjaïa. Cet oléoduc transporte du pétrole brut et du condensât.
2. L'oléoduc 16 pouces reliant Beni Mansour à Alger, transportant du pétrole pour approvisionner la raffinerie d'Alger (Sidi Arcine).

#### 1.5.5.2 Département exploitation gaz

Il est chargé de l'exploitation et de la supervision du gazoduc reliant Hassi R'Mel et Bordj-Menail.

### 1.5.6 Sous direction Technique

Elle a pour mission d'assurer la maintenance et la protection des ouvrages, ainsi que l'approvisionnement, l'étude et le suivi de projets de réalisation de travaux neufs. Elle est organisée en quatre départements qui sont :

#### 1.5.6.1 Département maintenance

Sa mission est d'assurer la maintenance des équipements et installations au niveau des différentes stations (pompes électriques, turbines, ...) et terminaux.

#### 1.5.6.2 Département protection des ouvrages

Le département joue un rôle curatif et préventif, il a pour mission de protéger les ouvrages (oléoduc, gazoduc, ...) contre les actions humaines volontaires (sabotage) ou involontaires liées à des erreurs de travail et aux effets naturels comme le vent de sable, les inondations, etc.

#### 1.5.6.3 Département approvisionnement et Transport

Il a pour mission principale de satisfaire les besoins des différentes structures de la région, notamment celles des bases (exploitation, maintenance) en équipements, matériels, pièces de rechange, et ce dans les meilleures conditions (qualité, prix et services).

#### 1.5.6.4 Département travaux neufs (TNF)

Il est chargé des études et du suivi de différents projets initiés par les différentes structures. Il prend en charge les projets dans plusieurs domaines tels que génie civil, constructions métalliques, travaux pétroliers, ... Il joue donc, le rôle du bureau d'étude de la RTC.

Le département TNF gère 80% du budget de la région. Le thème de notre mémoire est en relation directe avec les activités de ce département. Le département TNF est représenté dans (Figure 1.2) est actuellement structuré en un Secrétariat, service étude industrielle et service technique et suivi.

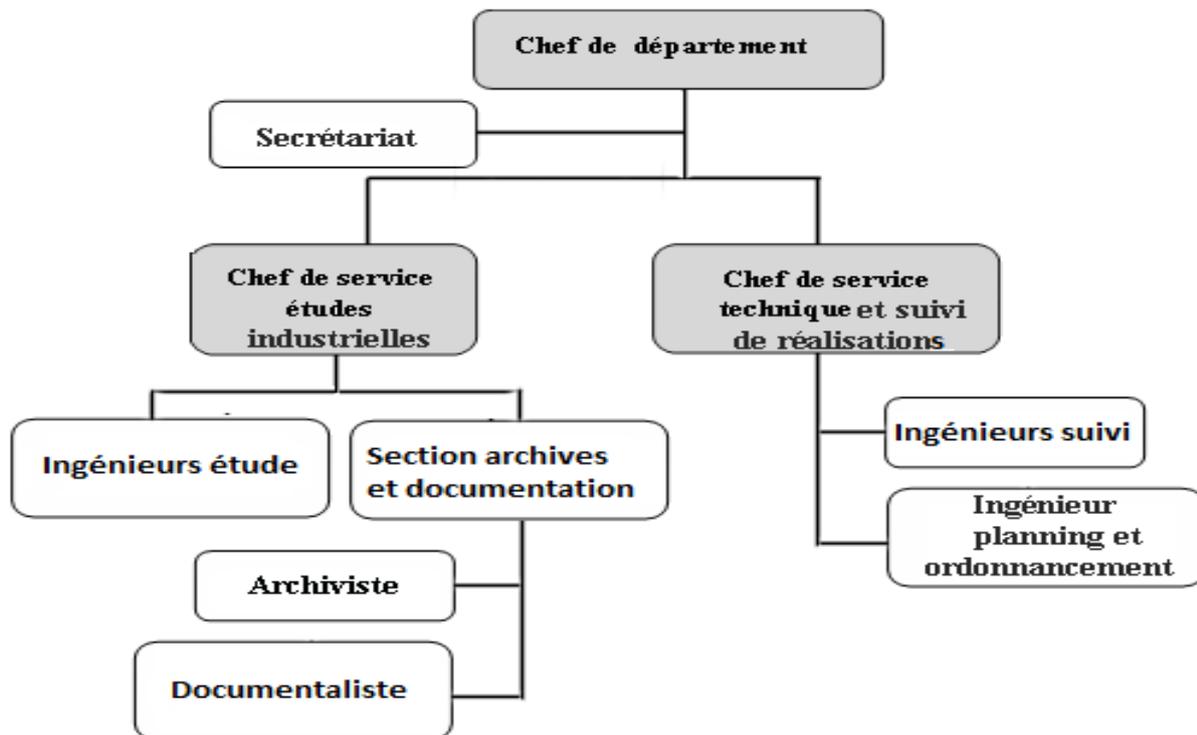


FIGURE 1.2 – Organigramme du Département Travaux Neufs

1. **Secrétariat** : s'occupe de la communication et diffusion de l'information, ainsi que l'élaboration de sa correspondance et le traitement du courrier et documents.
2. **Service études Industrielles** : il est composé actuellement d'ingénieurs études et d'une section archive et documentation. Les ingénieurs études ont la charge de préparer les DAO<sup>3</sup> pour les projets inscrits au budget de la RTC. Une fois l'appelle d'offre aboutis dans le respect stricte de la procédure de passation des marchés de SONATRACH, le service technique et suivi de réalisation prend le relai pour la concrétisation du projet.
3. **Service technique et Suivi des réalisations** : ce service est composé d'ingénieurs suivi et d'un ingénieur planning et ordonnancement. Les ingénieurs suivi sont chargés du suivi des

3. DAO : Dossier d'appel d'offres

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

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

### **1.5.7 Sous direction finance et juridique**

Elle a pour mission d'effectuer la gestion financière, de préparer le budget, d'assurer le contrôle de gestion et la prise en charge des affaires juridiques de la RTC. Elle est organisée en trois départements qui sont :

#### **1.5.7.1 Département finances**

Ce département a pour mission d'assurer la gestion financière de la RTC. Il est composé de deux services.

- Service comptabilité générale ;
- Service trésorerie.

#### **1.5.7.2 Département juridique**

Ce département a pour mission de prendre en charge les litiges nés entre la RTC et ces différents partenaires, et la préservation de tout le patrimoine de l'entreprise. Il est chargé aussi du contrôle et suivi de la procédure de passation des marchés de Sonatrach.

#### **1.5.7.3 Département budget et contrôle de gestion**

Ce service a pour mission d'élaborer le plan annuel à moyen terme des besoins de fonctionnement (volet exploitation) et les projets de réalisation (nouveaux projets et projets en cours) pour le volet investissement. Des campagnes budgétaires sont organisées en juin de chaque année. Après avoir réuni tous les besoins exprimés de chaque structure de la RTC, le plan sera arrêté, au niveau local, après plusieurs réunions d'arbitrage, ensuite il sera envoyé à la direction générale d'Alger.

### **1.5.8 Sous direction administration**

Elle a pour mission la gestion des ressources humaines et les moyens généraux. Elle est composée des départements suivants :

### **1.5.8.1 Département administration et social**

Ce département a pour mission de :

- Gérer les affaires sociales et la tenue du dossier administratif de chaque agent ;
- La gestion de la paie et les prestations sociales ;
- Réglement des litiges nés entre la RTC et les employés ;
- Gérer les activités sportives et culturelles dans le cadre du sport et travail.

### **1.5.8.2 Département ressources humaines et communication**

Ce département a pour mission :

- D'acquérir, développer, stimuler, de conserver les ressources humaines ;
- Le suivi de carrière des employés.

### **1.5.8.3 Département moyens généraux**

Il est chargé de la gestion des biens mobiliers, immobiliers, matériels, fournitures de bureau, produits d'entretiens, hébergements des agents missionnaires, réservations et achats de titres de transport.

### **1.5.9 Centre informatique**

Il est chargé de développer et d'exploiter des applications pour le compte de la RTC, ainsi que de la maintenance du park informatique de la région.

## 1.6 Position du problème

La RTC-Sonatrach de Béjaïa a pris en charge de réaliser les travaux de rénovation de la base de vie SBM Beni Mansour (Bouira). En tant que le maître de l'ouvrage, elle souhaite établir des prévisions quand aux différents paramètres et indicateurs de ce projet à savoir délai, ressources, ...

En raison de l'importance des critères temps et ressources dans l'attribution des projets aux entreprises de réalisation, l'entreprise Sonatrach se trouve confrontée au problème d'élaboration d'un planning prévisionnel, qui optimise la durée totale du projet, ainsi que la disponibilité des ressources. Cependant, cette tâche n'est pas évidente car la plupart des entreprises de réalisation établissent des plannings basées sur leur propre expérience professionnelle. Ces planifications ne sont souvent pas respectées à cause de limitations de ressources (personnel, matériel, ...) qui surviennent au cours de l'exécution du projet et qui ne sont pas prises en compte dans l'élaboration des prévisions, ce qui engendre des retards dans l'exécution des tâches, et qui rend difficile le respect des délais de réalisation.

C'est pour faire face à ces obstacles que le Département Travaux Neufs, nous a confié ce travail qui consiste à bien gérer les personnels et les matériels affectés au projet, afin de déterminer la date de début d'exécution de chaque tâches, tout en respectant le délai alloué au projet et sans dépasser la capacité des ressources.

Notre travail consiste à établir un planning prévisionnel de réalisation qui prends en compte les deux contraintes majeures pour ce type de programmation à savoir respecter le délai de réalisation du projet sans dépasser les capacités des ressources alloués. Pour le faire, nous devons prendre en considération les points suivants :

- 1) Énoncer clairement le contenu du projet.
- 2) Réaliser la décomposition du projet (WBS)<sup>4</sup>.
- 3) Établir les liens entre activités, leurs séquencements, leurs durées : Méthode P.E.R.T, diagramme de Gantt.
- 4) Affecter les ressources (OBS)<sup>5</sup>. Ici on sous-entend par ressources tout moyens humain ou matériel.
- 5) Optimiser le délai du projet.
- 6) Respecter le délai et les capacités des ressources.

Sur un exemple concret du projet de la RTC-Sonatrach de Béjaïa, nous allons appliquer une méthode d'optimisation liées au problème d'ordonnancement des tâches d'un projet pour répondre aux préoccupations de cette entreprise.

---

4. Work Breakdown Structure

5. Organisation Breakdown Structure

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

Gestion de projets à ressources limitées. Cas de la RTC-Sonatrach Béjaia, Thèse d'ingénieur, Université A. Mira Béjaia, 2011. Préparé par BOUSSAAD Fatah et FERROUDJ Mokrani. Ils ont traité Le problème de nivellement sur le logicielle Primavera.

Conception et réalisation d'un outil de gestion de projet pour DRGB Sonatrach, Université A. Mira Béjaia, thèse 2010. Préparé par BERRNI Kamel et IHADDADENE Farid.

Conception et réalisation d'un système d'information pour la gestion de projet du département travaux neufs de la sonatrach RTC Béjaia, thèse 2011. Préparé par TAFININE Fares et OUZENA Rezki.

Gestion de Projet Cas du projet Système Technologique de Surveillance de la DRGB SONATRACH, DJABRI Khaled & IBAROUDINE Nabil, Université A.Mira Béjaia, 2009. Ils ont crée une base de donnée.

# Généralités et Définitions

## Introduction

La gestion de projet est le processus de la coordination et de l'intégration des activités de manière efficace et effective de l'utilisation des ressources limitées. Il consiste à lier les ressources à leurs réalisations respectives et les assembler dans l'ensemble du projet [18].

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

Un ordonnancement décrit l'ordre d'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.

## 2.1 Gestion de projet

### 2.1.1 Définition du projet

Un projet est un effort complexe, non répétitif et unique, limité par des contraintes de temps, de budget et de ressources ainsi que par des spécifications d'exécutions conçues pour satisfaire les besoins d'un client [9].

A l'image de la plupart des activités organisationnelles, le but principal d'un projet consiste à satisfaire le besoin d'un client. Cependant les caractéristiques d'un projet contribuent à différencier celui-ci des autres activités d'une organisation. On note ici, les principales caractéristiques d'un projet :

1. Un projet est clairement établi ;
2. La collaboration entre plusieurs services et spécialistes ;
3. Des exigences précises en matière de temps, de coûts et de rendement.

On note aussi une caractéristique unique d'un projet qui est le cycle de vie, représentant la période qui s'écoule de la naissance d'une idée jusqu'à la fin de son exploitation. De plus, l'ampleur et la focalisation des efforts varient selon l'endroit où l'on se situe dans le cycle de vie du projet.

### 2.1.2 Cycle de vie d'un projet

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

1. **Définition** : Définir les spécifications du projet, établir ses objectifs, former des équipes et on assigne les principales responsabilités.
2. **Planification** : On élabore des plans pour déterminer tout ce que le projet implique, le moment de l'ordonnancement, à qui il profitera, le niveau de qualité qui devra être conservé et le budget qui sera retenu.
3. **Exécution** : Une importante partie du travail physique et intellectuel du projet s'effectuera à cette étape, où a lieu la fabrication du produit physique, l'évaluation de la durée, les coûts et les spécifications, pour contrôler les résultats.
4. **Contrôle (Suivi)** : Vérification régulière et continue de la bonne marche du projet pour intégrer, au fur et à mesure du déroulement les actions correctives nécessaires.
5. **Clôture** : Elle comprend
  - La livraison du projet au client ;
  - Le redéploiement des ressources.

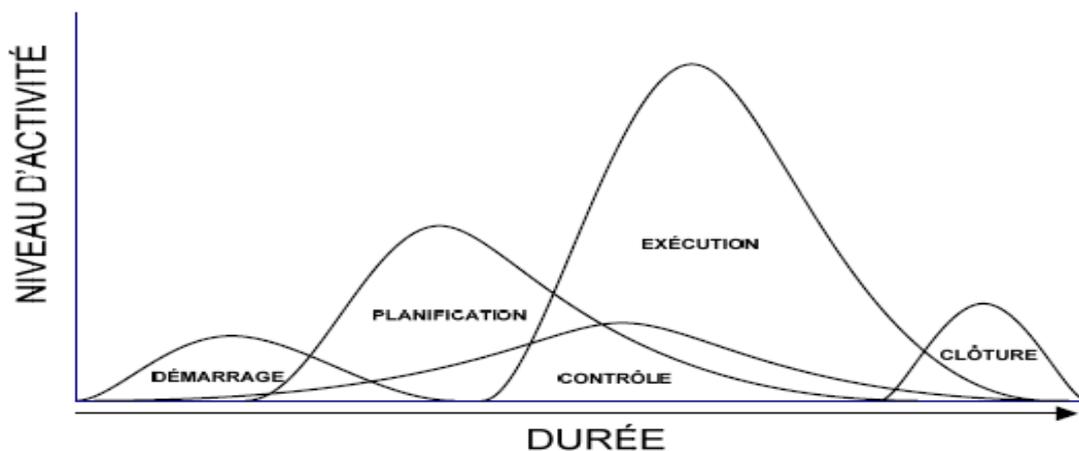


FIGURE 2.1 – Cycle de vie d'un projet

### 2.1.3 Définition des objectifs du projet

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

- Les objectifs de performance techniques relatifs au respect des spécifications fonctionnelles et des caractéristiques techniques du produit. Ainsi, on se définit un niveau de qualité en ce qui concerne, par exemple le respect de tolérance, la fiabilité du produit, la facilité d'usage,...
- Les objectifs de délai sont une composante très importante pour le client. Ainsi, il ne sert à rien de livrer un stade olympique trois mois après la fin des jeux olympiques. D'autre part, dans un marché concurrentiel, tel que, par exemple, celui des produits pharmaceutiques, être le premier à mettre sur le marché un nouveau vaccin ou un nouveau médicament peut représenter un effet de monopole et des gains substantiels pour le premier arrivé sur le marché.
- Les objectifs de coût sont primordiaux, notamment dans le cadre d'un contrat à prix non révisable ou dans le cas d'un projet interne.

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

### 2.1.4 Structure de découpage de projet (WBS)

Il s'agit d'un plan du projet qui permet au gestionnaire de s'assurer que tout les produits (livrables) et tout les éléments de travaux, sont bien définis et pouvoir ainsi établir une forme de contrôle du projet [25].

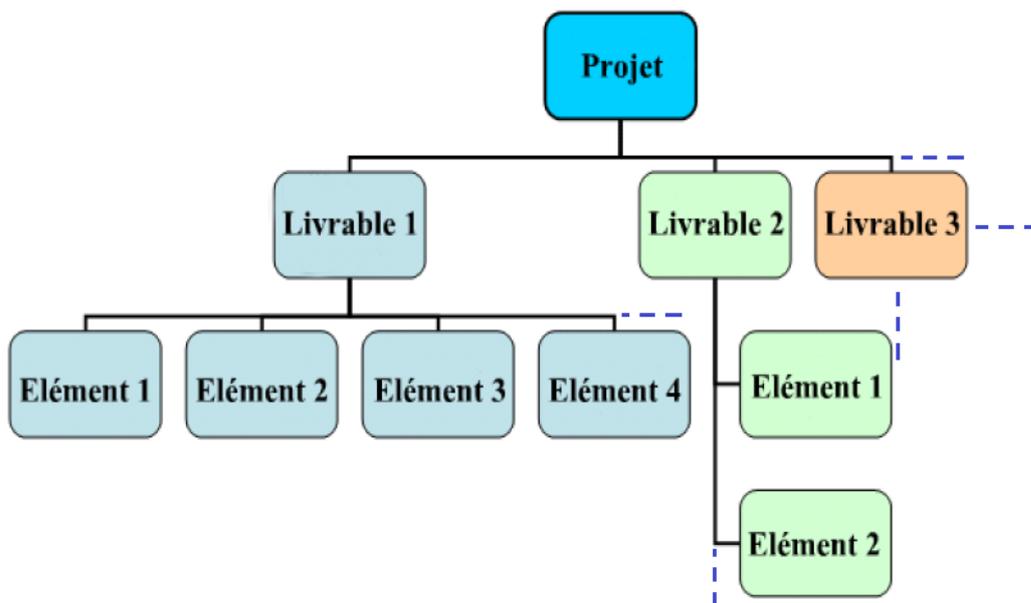


FIGURE 2.2 – Structure de découpage d'un projet (WBS)

### 2.1.5 Étapes de réalisation d'un projet

#### Première étape : Définir l'envergure du projet

La définition du contenu du projet consiste à créer un plan de projet. D'une autre manière, il s'agit d'établir le résultat final ou la mission du projet et de définir une liste de vérification du projet qui comprend les éléments suivants [25] :

- **Les objectifs du projet** : La description du contenu du projet a pour première étape d'établir les objectifs en fonction des besoins du client.
- **Les livrables** : Décrire les principaux livrables, soit les résultats prévus au cours de la durée du projet.
- **Les jalons** : Ils servent à mieux diviser les principales parties d'un travail. Aussi, ils fournissent la première estimation grossière en termes de temps, de coût et de ressources.
- **Les exigences techniques** : Se sont imposées pour garantir une performance conforme aux exigences du client.
- **Les limites et les exclusions** : Les limites du contenu doivent être clairement établie afin d'éviter la perte de ressources et de temps attribuable à une mauvaise analyse du problème.
- **La révision du contenu en compagnie de client** : Elle correspond à la dernière étape de la liste de vérification du contenu du projet.

#### Deuxième étape : Etablir les priorités du projet

La quantité et le succès d'un projet dépend de la capacité à répondre aux attentes des clients, voir de les dépasser en ce qui concerne les coûts (budget), le temps et la performance (contenu). Les rapports mutuels entre ces critères varient. Il s'avère parfois nécessaire de proposer des compromis quant à la performance et au contenu du projet pour le terminer plus rapidement ou pour en diminuer les coûts, car plus la durée du projet se prolonge, plus le coût sera plus élevé [25].

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

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

Une fois le contenu et les livrables sont déterminés, l'ensemble du projet peut être successivement réparti en éléments de travail de plus en plus petits. Le résultat de ce processus hiérarchique nous donne la structure de découpage du projet [25].

## 2.2 Problème d'ordonnement de projet

### 2.2.1 Notions de base en ordonnancement

#### 2.2.1.1 Tâche

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

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

Exemples :

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

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

Dans certains problèmes, les tâches peuvent être exécutées par morceaux, l'union des différents morceaux permettent de laisser le moins possible les ressources inactives. Dans d'autres au contraire, on ne peut pas interrompre une tâche une fois commencée. On parle alors respectivement de problème préemptif et non préemptif.

En ordonnancement de projet, nous conservons le terme de tâche pour désigner les activités constitutives d'un projet.

Dans un problème d'ordonnement, l'ensemble des tâches est généralement noté  $I$ , le nombre de tâches par  $n$  et chaque tâche est notée par  $i$  et elle est décrite par les caractéristiques suivantes :

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

#### 2.2.1.2 Ressource

Une ressource est un moyen technique ou humain nécessaire pour la réalisation d'une tâche, on distingue plusieurs types de ressources :

- **Ressource renouvelable** : une ressource est dite renouvelable si elle est disponible en même quantité après son utilisation par une ou plusieurs tâches (les hommes, les équipements, etc).

- **Ressources consommables** : se sont les ressources qui ne sont plus disponibles en même quantité après leur utilisation par une ou plusieurs tâches (matière première, budget, etc).
- **Ressource doublement contrainte** : une ressource doublement contrainte lorsque son utilisation instantanée et sa consommation globale sont toutes les deux limitées (sources d'énergie, financement, etc).
- **Ressources disjonctives** : une ressource est dite disjonctive (non partageable) si elle ne peut être utilisée que par une seule tâche à la fois (machine, robot, etc).
- **Ressources cumulatives** : une ressource est dite cumulative (partageable) si elle peut être utilisée par une ou plusieurs tâches simultanées (équipe d'ouvriers, etc).

### 2.2.1.3 Contraintes

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

- **Les contraintes potentielles** : Elles mêmes sont subdivisées en deux :
  - **Localisation temporelle** : Une tâche donnée doit être terminée avant telle date, ou au contraire son exécution ne doit pas commencer avant une date précise.
  - **Contraintes de succession** : Dans ces contraintes l'exécution de la tâche  $j$  ne peut commencer qu'une fois un ensemble de tâches prédéfinies est achevé.
- **Les contraintes disjonctives** : Elles imposent la réalisation non simultanée d'un ensemble de tâches.

Si les tâches  $i$  et  $j$  ont lieu sans discontinuité, alors une contrainte disjonctives s'exprime par :

$$t_j - t_i \geq d_i \quad \text{avec } i \text{ est l'antre de } j.$$

- **Les contraintes cumulatives** : Elles sont relatives à l'évolution au cours du temps, des moyens de réalisation de différentes tâches (ressources : hommes, machines, argent, etc).

## 2.2.2 Les éléments de la théorie des graphes

La théorie des graphes est une tentative de visualisation concrète des faits. C'est par conséquent, un essai de formalisation de situation concrètes de notre vie quotidienne [6].

### 2.2.2.1 Définition d'un graphe

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

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

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

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

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

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

### 2.2.2.2 Chemin

Dans un graphe, on appelle chemin une suite d'arcs dont l'extrémité terminale de chacun, sauf pour le dernier, est l'extrémité initiale de l'arc suivant. Un chemin qui se renferme sur lui même est dit circuit. La longueur d'un chemin est la longueur totale des arcs le constituant. Un chemin est simple s'il ne passe qu'une seule fois par chacun de ses arcs. Un chemin est dit élémentaire s'il ne passe pas plus d'une fois par chacun de ses sommets.

### 2.2.2.3 Date au plus tôt

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

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

$$\begin{cases} t_1 = 0, \\ t_j = \max(t_i + d_{ij}), \quad \text{tel que } j \neq i; \\ d_{ij} : \quad \quad \quad \text{durée de l'activité } (i, j). \end{cases} \quad (2.1)$$

### 2.2.2.4 Date au plus tard

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

$$\begin{cases} D_N = t_N; \\ D_j = \min(D_i - d_{ij}); \\ \{(i, j) / I(i, j) = i\}, \quad \text{où } I(i, j) : \text{extrémité initiale.} \end{cases} \quad (2.2)$$

### 2.2.2.5 Intervalle de flottement

On appelle flottement d'une activité  $j$ , la différence entre la date au plus tard et la date au plus tôt du début ou de la fin de sa réalisation.

Le flottement d'une activité représente la marge de Manœuvre que nous disposons sur cette activité pour mener à bien sa réalisation.

Une activité de flottement nul est appelée critique. L'ensemble des activités critiques est appelé chemin critique.

#### 2.2.2.6 Tâche critique

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

#### 2.2.2.7 Chemin critique

C'est le chemin qui relie les tâches dont les dates au plus tôt sont égales aux dates au plus tard. Il est défini comme l'ensemble des tâches dont la marge totale est nulle.

Il est déterminé en établissant l'éventail des activités qui disposent toutes de la même marge minimale [7].

#### 2.2.2.8 Une marge

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

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

## Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes généralités sur la gestion du projet, ainsi les différentes notions de bases et résultats théoriques qui sont en rapport avec le problème d'ordonnement qui fera l'objet de notre étude.

# Modélisation et approches de résolution

## Introduction

La modélisation d'un problème donné est une étape qui consiste à extraire une image aussi fidèle que possible du système à étudier. Cette image peut prendre plusieurs formes : mathématique comme en programmation linéaire, statistique comme des modèles statistiques et sous forme d'un graphe comme en théorie des graphes ou sous forme virtuelle comme en simulation.

Résolution d'un problème d'ordonnancement consiste à donner l'ordre dans lequel devront être exécutées les différentes tâches de manière à optimiser une certaine fonction objective (par exemple rendre la durée d'exécution totale du projet aussi petite que possible) tout en satisfaisant certaines contraintes d'antériorité de certaines tâches par rapport à d'autres, non-simultanéité de certains travaux, disponibilité limitée de bien nécessaire à l'exécution du projet.

## 3.1 Minimisation du Makespan

Nous considérons ici un cas particulier du problème de gestion de projet, où la fonction objectif est la minimisation de la durée totale de réalisation du projet (Makespan). Ce problème consiste à déterminer l'ordre d'exécution dans le temps d'un ensemble d'activités de façon à minimiser la durée totale du projet tout en respectant les contraintes de précédence.

Soient :

- $n$  : Le nombre de tâches constituant le projet ;
- $i$  : Indice des tâches,  $i \in \{0, 1, \dots, n, n+1\}$ . Avec 0 et  $n+1$  désignent des tâches fictives modélisant respectivement le début et la fin du projet ;
- $t_N$  : La durée totale du projet ;

- $t_i$  : La date de début de la tâche  $i$  ;
- $d_i$  : La durée d'exécution de l'activité  $i$  ;
- $H$  : Paire d'activités avec la contrainte potentielle.
- Les contraintes de précédence entre les activités :  $(i, j) \in H$  indique que la tâche  $j$  ne peut commencer son exécution avant l'achèvement de l'activité  $i$  :

$$t_i + d_i \leq t_j, \quad \forall (i, j) \in H. \quad (3.1)$$

La résolution de ce problème revient à la résolution du modèle suivant [26] :

$$\begin{cases} \min t_N; \\ t_i + d_i \leq t_j, & \forall (i, j) \in H; \\ t_j \geq 0, & \forall j = 1, \dots, n; \\ d_i \geq 0, & \forall i = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (3.2)$$

## 3.2 Méthodes de résolution

### 3.2.1 Bref historique

Il faut d'abord constater que les méthodes de résolution sont relativement récentes. Avant 1958, on ne disposait, comme instrument de prévision et de suivi dans les ordonnancements que du graphique de GANTT ou diagramme à barres, mis au point par l'un des collaborateurs de Taylor, à la fin de la première guerre mondiale. Un tel graphique est d'ailleurs toujours employé par des praticiens à qui ne se posent pas de questions complexes.

Des méthodes modernes, fondées sur la théorie des graphes, ont d'abord vu le jour dans l'industrie chimique, en vue de la construction d'usines nouvelles, sous le nom de P.P.S.S, C.P.S et bientôt de C.P.M, les résultats de la première étude lancée en 1956 ont été appliqués dès 1958 à l'édification d'une usine au Canada.

A peu près simultanément, la nécessité d'ordonner des projets importants (construction des premières centrales nucléaires d'E.D.F, programme d'ornement du paquebot France et en même temps, de trois pétroliers aux chantiers de l'atlantique) a inspiré des études menées, dès 1957, sous la direction de ROY et ayant abouti à des applications couronnées de succès dès 1959. Ce fut la méthode dite des potentiels, appelée plus tard M.P.M<sup>1</sup> [28].

---

1. méthode des potentiels Métra, du nom du holding l'ayant patronnée

### Le diagramme de GANTT :

Le diagramme de GANTT<sup>2</sup> est un réseau qui reprend l'ensemble des hypothèses de liens de durées, de charges, de ressources, de priorités posées sur les tâches du projet.

Chaque tâche est représentée par une barre. L'extrémité gauche de la barre représente le début de la tâche, l'extrémité droite sa fin.

Début  Fin

La longueur de la barre est dépendante de la durée de la tâche : cette représentation n'est pas un planning à barres, elle est simplement utilisée pour marquer la logique c'est à dire l'enchaînement des tâches.

Un lien est une relation entre deux tâches représentée par une flèche. Ce lien signifie que la tâche



S peut débuter lorsque la tâche A est terminée (relation (fin, début)).

### 3.2.2 La méthode CPM

La méthode du chemin critique (CPM) est une technique d'analyse de réseau d'ordonnancement, elle a été développée par DuPont Corporation en 1957. Deux caractéristiques distinctives de la méthode CPM sont d'abord présentées : la modélisation mathématique du projet au moyen d'un réseau et la prise en considération explicite des relations de dépendance temporelle entre les tâches. La méthode CPM permet de calculer la durée totale d'un projet à partir de la durée de chaque tâche et des liaisons existant entre les différentes activités du projet.

Cette méthode est utilisée fréquemment pour les projets de construction, dans lesquels plusieurs activités dépendantes les unes des autres peuvent se dérouler en même temps.

### 3.2.3 La méthode MPM

Dans la méthode des potentiels-métra [4], le problème est représenté sous forme d'un graphe tel que les tâches sont représentées par des nœuds et les contraintes de succession par des arcs. À

2. Concept développé par Henry L. Gantt, ingénieur américain, vers 1910

chaque nœud sont associées une date de début au plus tôt et une date de fin au plus tard. À chaque arc est associé un délai d'attente entre les tâches.

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

La tâche  $i + 1$  suit la tâche  $i$

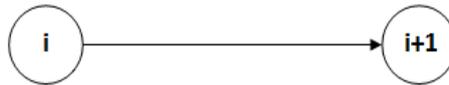


FIGURE 3.1 – Représentation du réseau MPM

### 3.2.4 La méthode P.E.R.T

Est une méthode de planification développée par la marine américaine dans les années 50 pour un projet de grande dimension. Cette technique permet de décrire le cheminement d'un projet à partir des tâches qui le compose. La méthode P.E.R.T cherche donc à déterminer la chronologie des tâches dans le temps en déterminant la date de début et la date de fin et les marges de chaque tâche par rapport au projet en prenant en compte les contraintes de précédence et de délai, et une date au plus tôt et au plus tard de chaque tâche, il permet d'identifier les tâches critiques et donc estimer une durée minimale du projet. La méthode P.E.R.T est une technique qui s'appuie essentiellement sur la construction d'un graphe  $G = (X, U, D)$  orienté, sans boucle définie comme suit [17] :

- $X = \{1, \dots, N\}$  : l'ensemble des sommets.
- $U$  : l'ensemble des arcs défini par :

$$U = \{(i, j) \in X^2 / i \neq j, i < j\}; |U| \leq N - 1.$$

- $D$  : l'ensemble des poids des arcs.

$$D = \{d_{ij} \geq 0, (i, j) \in X^2\}.$$

- Un arc correspond à une tâche.
- La valeur d'un arc  $i$  représente la durée d'une tâche  $d(i)$ .
- Un sommet est un événement signifiant le début ou la fin d'une ou plusieurs tâches.

Le P.E.R.T est une méthode qui consiste à mettre en ordre sous forme de réseau plusieurs activités qui grâce à leurs dépendances et leurs chronologies concourent toutes en l'obtention d'un produit fini.

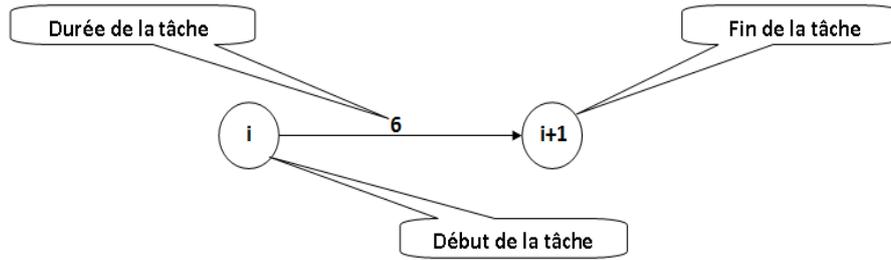


FIGURE 3.2 – Représentation d'une tâche dans un réseau P.E.R.T

### 3.2.4.1 Résolution

On rappelle qu'un ordonnancement est un programme d'exécution de la forme :

$$\{t_i, 0 \leq i \leq N\},$$

avec :

$$\begin{cases} t_0 = 0; \\ N = n + 1, \text{ tel que } N \text{ nombre de tâches;} \\ t_i : \text{ début de réalisation de chacune des étapes.} \end{cases} \quad (3.3)$$

On dit qu'un ordonnancement est optimal s'il est réalisable et s'il minimise la durée de réalisation  $t_N$  du projet.

Un ordonnancement est réalisable si :

$$t_j^* - t_i \geq d_{ij}, \quad \forall (x_i, x_j) \in U.$$

On définit la longueur d'un arc comme la durée associée à cet arc.

La durée minimale du projet est alors égale à la longueur du plus long chemin de  $x_0$  à  $x_N$ . En effet, pour qu'une tâche puisse commencer, il faut que toutes les tâches antérieures aient été exécutées; de sorte que la durée du projet ne peut être inférieure à la somme des durées des tâches composant le chemin le plus long de  $x_0$  à  $x_N$ .

Le chemin déterminé n'est pas nécessairement unique, il est appelé, "chemin critique".

Pour des graphes sans circuits, il suffit d'appliquer l'algorithme de Bellman Kalaba simplifié pour la détermination de ce chemin critique. On aura ainsi :

$$t_j = \max\{t_i + d_{ij} / x_i \in \Gamma^-(x_j), 1 \leq i \leq N\}, \quad (3.4)$$

où  $\Gamma^-(x_i)$  : l'ensemble des sommets prédécesseurs du sommet  $x_i$ .

Chaque  $t_i$  ainsi obtenu est la longueur du chemin le plus long de  $x_0$  à  $x_i$  et aussi la date au plus tôt de début d'exécution de l'étape  $i$ .

La durée minimale du projet  $t_N$  ayant été évaluée, il est possible de retarder l'exécution de certaines étapes sans pour autant accroître  $t_N$ . Alors il est intéressant de déterminer les dates au plus tard qu'on note  $t_i^*$  de début d'exécution des différentes étapes  $i$  sous la condition que la durée minimale du projet ne soit pas modifiée.

L'algorithme de Bellman Kalaba simplifié nous permet de les calculer, mais on doit l'appliquer au réseau inverse construit en inversant le sens de tous les arcs ; cependant, on aura  $t_i^* = t_N$ .

$$t_j^* = \min\{t_i^* - d_{ij}/x_i \mid x_i \in \Gamma^+(x_j), 0 \leq j \leq N - 1\}. \quad (3.5)$$

Avec  $\Gamma^+(x_i)$  : l'ensemble des sommets successeurs du sommet  $x_i$ .

La quantité  $t_N^* = t_i$  obtenue est la longueur du chemin le plus long de  $x_i$  à  $x_N$ .

### 3.2.4.2 Interprétation des résultats

Pour chaque étape  $i$  composant le chemin critique, on a  $t_i = t_i^*$ , ce qui veut dire que tout retard dans leur date d'exécution entraîne un retard équivalent dans la durée du projet, ces étapes sont appelées "étapes critiques".

A chaque sommet  $i$ , on peut associer un "intervalle de flottement"  $[t_i, t_i^*]$  indiquant la latitude laissée dans le choix de l'ordonnancement.

La méthode P.E.R.T nous permet également de déterminer :

- **La marge totale** : le délai maximal de la mise à exécution de la tâche.
- **La marge libre** : le délai maximal qui peut être apporté dans la mise à exécution de la tâche sans que cela ne compromette la date de réalisation au plus tôt de l'étape  $j$ .
- **La marge certaine** : le délai qu'on peut apporter à la mise à exécution de la tâche sans affecter la date au plus tôt de l'événement final de cette tâche sachant que l'activité démarre à sa date au plus tard  $t_i^*$ .

Soient les notions suivantes pour l'organigramme ci-dessous :

- $G = (X, U)$  : graphe évalué représentant le déroulement du projet tel que :

$X$  : l'ensemble des étapes à suivre ( $x_i, i = \overline{1, N}$ ).

$U$  : l'ensemble des tâches représentées par des arcs ( $x_i, x_j$ ).

- $d_{ij}$  : la durée de la tâche ( $x_i, x_j$ ).
- $\Gamma^-(x_i)$  : l'ensemble des prédécesseurs de  $x_i$ .
- $\Gamma^+(x_i)$  : l'ensemble des successeurs de  $x_i$ .
- $t_i^*$  : la date début au plus tard de la tâche ( $x_i, x_j$ ).

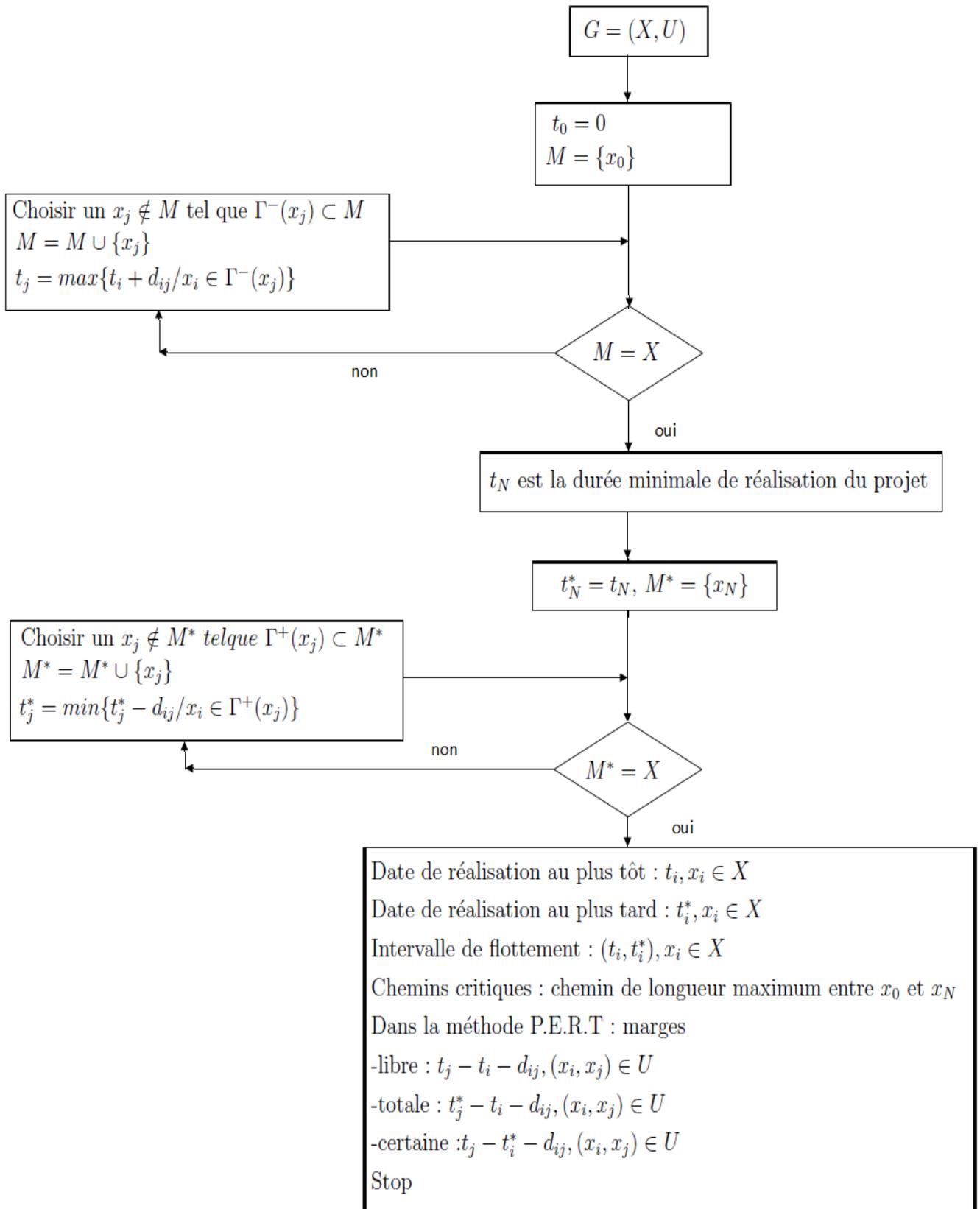


FIGURE 3.3 – Organigramme d’obtention d’un ordonnancement de durée minimale [25].

### 3.3 Problème de lissage des ressources

#### Introduction

La durée du projet représente un objectif lié à l'exécution des tâches. D'autres objectifs réalistes sont liés à la gestion des ressources. On peut par exemple souhaiter que le profil d'utilisation des ressources soit le plus équilibré possible. Il s'agit du problème de lissage des ressources (resource levelling problem). Dans ce cas, une date limite  $T$  est imposée au projet ( $t_{n+1} \leq T$ ) et l'utilisation maximale à un instant donné d'une ressource est une variable  $R_{kt}$ . Afin de mesurer la qualité d'un certain ordonnancement  $t_N$ , nous réduisons au minimum la somme des carrés des valeurs de la ressource  $k$ . Alors nous pouvons exprimer toute la demande de la ressource  $k$  en fonction de temps  $t$  pour un ordonnancement donné  $t_N$  par un profil de ressource  $r_{kt}$ . La fonction objectif est remplacée par  $\min \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T f_k(r_{kt})$  où  $f_k$  est une fonction dépendant des applications (par exemple  $f_k(r_{kt}) = r_{kt}^2$ ) vise à minimiser la somme du carré des utilisations des ressources) [5].

Le problème de lissage de ressources (RLP) est l'un des problèmes d'ordonnancement, son objectif est de parvenir à la consommation de ressources la plus efficace sans l'augmentation du Makespan (la durée totale) prescrit du projet [21, 23].

#### 3.3.1 Définition et notations

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

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

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

$$\sum_{i \in A(t)} r_{ik} \leq R_{kt}, \quad \forall t = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, m. \quad (3.6)$$

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

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

La formulation conceptuelle du RLP se présente donc comme suit [16] :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2; & (3.7) \\ t_i + d_i \leq t_j, & \forall (i, j) \in H; & (3.8) \\ \sum_{i \in A(t)} r_{ik} \leq R_{kt}, & \forall t = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, m; & (3.9) \\ t_{n+1} \leq T; & (3.10) \\ t_i \geq 0, & \forall j = 1, \dots, n; & (3.11) \\ d_i \geq 0, & \forall i = 1, \dots, n. & (3.12) \end{array} \right.$$

Les variables  $t_i$  représentent les dates de début des activités. L'objectif (3.7) minimise la somme du carré des utilisations des ressources [1]. L'équation (3.8) sont les contraintes de précédence. Les contraintes de ressources (3.9) signifient qu'à tout instant  $t$  et pour toute ressource  $k$ , la somme des consommations de la ressource  $k$  sur l'ensemble  $A(t)$  des activités en cours à l'instant  $t$  est inférieure à la capacité  $R_{kt}$ , la contrainte (3.10) est la contrainte qui relie au délai  $T$ .

Ce modèle mathématique est un modèle linéaire en nombre entier à plusieurs variables et un nombre élevé de contraintes. Par conséquent les méthodes de résolution exactes sont inefficaces pour la résolution de ce type d'instance, d'où la nécessité d'utiliser des méthodes heuristiques performantes afin d'obtenir une solution réalisable proche de la solution optimale. Ainsi, la connaissance d'une solution, aidera énormément les gestionnaires et les décideurs à prendre les bonnes décisions et d'une manière rapide et efficace.

## 3.4 Méthodes de résolution pour RLP

### 3.4.1 Les heuristiques

Nous entendons par méthodes heuristiques toute procédure de recherche d'une bonne solution du problème par opposition à la recherche d'une solution optimale. De telles procédures sont utilisées lorsque les méthodes exactes de résolution sont d'une application trop lourde. Parmi ces méthodes, on cite :

#### a) Méthode de Burgess-Killebrew [15] :

En 1962, Burgess et Killebrew ont proposés une méthode heuristique pour résoudre le problème de lissage de ressources (RLP).

L'efficacité dans l'allocation d'une ressource particulière, basée sur une distribution idéale, est inversement proportionnelle à la somme des carrés pour chaque unité de temps, du début à la fin du projet. Cette méthode est résumée dans les étapes suivantes :

**Étape 1 :** On positionne toutes les tâches au début au plus tôt sur le diagramme de Gantt et on calcule la somme des carrés des valeurs de la charge obtenues pour la durée du projet

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

**Étape 2 :** On commence en bas de diagramme de Gantt, en prenant la première activité non critique ayant une marge totale ou une marge libre non nulle. Cette activité doit être déplacée vers la fin du projet (à droite) par une unité de temps.

Si la somme des carrés des valeurs de la charge ( $S$ ) augmente, on revient à l'état initial, si elle diminue, on la fait avancer encore d'une unité de temps (jusqu'à la limite de la marge totale ou la marge libre).

**Étape 3 :** On reprend l'avant dernière tâche et on lui fait subir l'étape 1 et l'étape 2 jusqu'à ce qu'il n'y a pas de diminution dans les cases charges.

## Exemple

Soit un projet comprend  $n = 9$  activités,  $m = 3$  ressources, avec la capacité de chaque ressource est :  $R_1 = 10$ ,  $R_2 = 14$ ,  $R_3 = 10$  et le délai de réalisation de ce projet est  $T = 11$ .

Le début, la fin, la durée, la marge totale, la marge libre et le besoin des ressources de chaque activité est mentionné dans le tableau suivant :

| N° de l'activité | Début au plus tôt | Fin plus tôt | Durée | Marge Totale | Marge Libre | Utilisation de $R_1$ | Utilisation de $R_2$ | Utilisation de $R_3$ |
|------------------|-------------------|--------------|-------|--------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1                | 0                 | 1            | 0     | 0            | 1           | 5                    | 4                    | 5                    |
| 2                | 1                 | 3            | 1     | 0            | 2           | 2                    | 3                    | 1                    |
| 3                | 1                 | 4            | 1     | 0            | 3           | 3                    | 6                    | 5                    |
| 4                | 1                 | 5            | 1     | 1            | 4           | 5                    | 5                    | 4                    |
| 5                | 3                 | 6            | 0     | 0            | 3           | 1                    | 5                    | 2                    |
| 6                | 5                 | 9            | 0     | 0            | 4           | 3                    | 1                    | 1                    |
| 7                | 5                 | 7            | 2     | 2            | 2           | 3                    | 2                    | 5                    |
| 8                | 6                 | 8            | 1     | 1            | 2           | 6                    | 3                    | 2                    |
| 9                | 9                 | 11           | 0     | 0            | 2           | 5                    | 5                    | 5                    |

TABLE 3.1: Tableau des Besoins de chaque activité

### Résolution

On positionnes tout les activités au début au plus tôt sur le diagramme de Gantt.

| Activité                          | Début | Fin | Durée | Mois 1 | Mois 2 | Mois 3 | Mois 4 | Mois 5 | Mois 6 | Mois 7 | Mois 8 | Mois 9 | Mois 10 | Mois 11 |
|-----------------------------------|-------|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1                                 | 0     | 1   | 1     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 2                                 | 1     | 3   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 3                                 | 1     | 4   | 3     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 4                                 | 1     | 5   | 4     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 5                                 | 3     | 6   | 3     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 6                                 | 5     | 9   | 4     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 7                                 | 5     | 7   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 8                                 | 6     | 8   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 9                                 | 9     | 11  | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| <b>Utilisation de R1 par mois</b> |       |     |       | 5      | 10     | 10     | 9      | 6      | 7      | 12     | 9      | 3      | 5       | 5       |
| <b>Utilisation de R2 par mois</b> |       |     |       | 4      | 14     | 14     | 16     | 10     | 8      | 6      | 4      | 1      | 5       | 5       |
| <b>Utilisation de R3 par mois</b> |       |     |       | 5      | 10     | 10     | 11     | 6      | 8      | 8      | 3      | 1      | 5       | 5       |

FIGURE 3.4 – Représentation des activités et les ressources sur le diagramme de Gantt

Les activités critiques sont : 1, 4, 6, 9. C'est activités ne doit pas déplacées.

D'abord on calcule :

$$S = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=11} r_{kt}^2 = 2176$$

On déplace l'activité N° 8 d'un mois vers la fin du projet on trouve :

$$S = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=11} r_{kt}^2 = 2108$$

On a : 2108 < 2176

Alors on déplace l'activité N° 8 d'un mois vers la fin du projet, avec Début=7 et Fin=9.

On déplace encore l'activité N° 8 d'un mois vers la fin du projet on trouve :

$$S = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=11} r_{kt}^2 = 2172$$

On a : 2172 > 2108

Alors l'activité N° 8 ne doit pas déplacé.

| Activité                          | Début | Fin | Durée | Mois 1 | Mois 2 | Mois 3 | Mois 4 | Mois 5 | Mois 6 | Mois 7 | Mois 8 | Mois 9 | Mois 10 | Mois 11 |
|-----------------------------------|-------|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1                                 | 0     | 1   | 1     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 2                                 | 1     | 3   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 3                                 | 1     | 4   | 3     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 4                                 | 1     | 5   | 4     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 5                                 | 3     | 6   | 3     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 6                                 | 5     | 9   | 4     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 7                                 | 5     | 7   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 8                                 | 7     | 9   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 9                                 | 9     | 11  | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| <b>Utilisation de R1 par mois</b> |       |     |       | 5      | 10     | 10     | 9      | 6      | 7      | 6      | 9      | 9      | 5       | 5       |
| <b>Utilisation de R2 par mois</b> |       |     |       | 4      | 14     | 14     | 16     | 10     | 8      | 3      | 4      | 4      | 5       | 5       |
| <b>Utilisation de R3 par mois</b> |       |     |       | 5      | 10     | 10     | 11     | 6      | 8      | 6      | 3      | 3      | 5       | 5       |

FIGURE 3.5 – Déplacement de l’activité N° 8 d’un mois vers la fin du projet

On déplace l’activité N° 7 d’un mois vers la fin du projet on trouve :

$$S = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=11} r_{kt}^2 = 2130$$

Alors l’activité N° 7 ne doit pas déplacé.

On déplace l’activité N° 5 d’un mois vers la fin du projet on trouve :

$$S = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=11} r_{kt}^2 = 2012$$

On a : 2012 < 2108

Alors on déplace l’activité N° 5 d’un mois vers la fin du projet, avec Début=4 et Fin=7.

On déplace encore l’activité N° 5 d’un mois vers la fin du projet on trouve :

$$S = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=11} r_{kt}^2 = 2006$$

On a : 2006 < 2012, mais la marge de cette activité égale 1.

Alors l’activité N° 5 ne doit pas déplacé.

| Activité                          | Début | Fin | Durée | Mois 1 | Mois 2 | Mois 3 | Mois 4 | Mois 5 | Mois 6 | Mois 7 | Mois 8 | Mois 9 | Mois 10 | Mois 11 |
|-----------------------------------|-------|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1                                 | 0     | 1   | 1     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 2                                 | 1     | 3   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 3                                 | 1     | 4   | 3     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 4                                 | 1     | 5   | 4     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 5                                 | 4     | 7   | 3     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 6                                 | 5     | 9   | 4     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 7                                 | 5     | 7   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 8                                 | 7     | 9   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 9                                 | 9     | 11  | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| <b>Utilisation de R1 par mois</b> |       |     |       | 5      | 10     | 10     | 8      | 6      | 7      | 7      | 9      | 9      | 5       | 5       |
| <b>Utilisation de R2 par mois</b> |       |     |       | 4      | 14     | 14     | 11     | 10     | 8      | 8      | 4      | 4      | 5       | 5       |
| <b>Utilisation de R3 par mois</b> |       |     |       | 5      | 10     | 10     | 9      | 6      | 8      | 8      | 3      | 3      | 5       | 5       |

FIGURE 3.6 – Déplacement de l’activité N° 5 d’un mois vers la fin du projet

On déplace l’activité N° 3 d’un mois vers la fin du projet on trouve :

$$S = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=11} r_{kt}^2 = 2040$$

On a : 2040 > 2012

Alors l’activité N° 3 ne doit pas déplacé.

On déplace l’activité N° 2 d’un mois vers la fin du projet on trouve :

$$S = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=11} r_{kt}^2 = 2012$$

On a : 2012 = 2012

Alors on déplace l’activité N° 2 d’un mois vers la fin du projet, avec Début=4 et Fin=7.

On déplace encore l’activité N° 2 d’un mois vers la fin du projet on trouve :

$$S = \sum_{k=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{t=11} r_{kt}^2 = 1992$$

On a : 1992 < 2012, mais la marge de cette activité égale 1.

Alors l’activité N° 2 ne doit pas déplacé.

| Activité                   | Début | Fin | Durée | Mois 1 | Mois 2 | Mois 3 | Mois 4 | Mois 5 | Mois 6 | Mois 7 | Mois 8 | Mois 9 | Mois 10 | Mois 11 |
|----------------------------|-------|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1                          | 0     | 1   | 1     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 2                          | 2     | 4   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 3                          | 1     | 4   | 3     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 4                          | 1     | 5   | 4     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 5                          | 4     | 7   | 3     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 6                          | 5     | 9   | 4     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 7                          | 5     | 7   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 8                          | 7     | 9   | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| 9                          | 9     | 11  | 2     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
| Utilisation de R1 par mois |       |     |       | 5      | 8      | 10     | 10     | 6      | 7      | 7      | 9      | 9      | 5       | 5       |
| Utilisation de R2 par mois |       |     |       | 4      | 11     | 14     | 14     | 10     | 8      | 8      | 4      | 4      | 5       | 5       |
| Utilisation de R3 par mois |       |     |       | 5      | 9      | 10     | 10     | 6      | 8      | 8      | 3      | 3      | 5       | 5       |

FIGURE 3.7 – Déplacement de l’activité N° 2 d’un mois vers la fin du projet

Avant d’appliquer la méthode de Burgess-Killebrew la fonction objectif  $S = 2176$ , à la fin de l’application de cette méthode on a trouvé  $S = 2012$ . Alors, cette dernière diminue la somme du carré d’utilisation des ressources.

Après l’application de cette algorithme la surcharge sera éliminé.

### Diagramme d’utilisation de la ressource $R_1$ avant et après le lissage

Le schéma ci-contre (Figure 3.8) représente l’évaluation de la ressource  $R_1$  par rapport au temps, tel que la ligne en noire représente l’utilisation de la ressource  $R_1$  avant le lissage, la ligne en rouge après le lissage et sa capacité par la ligne en blue.

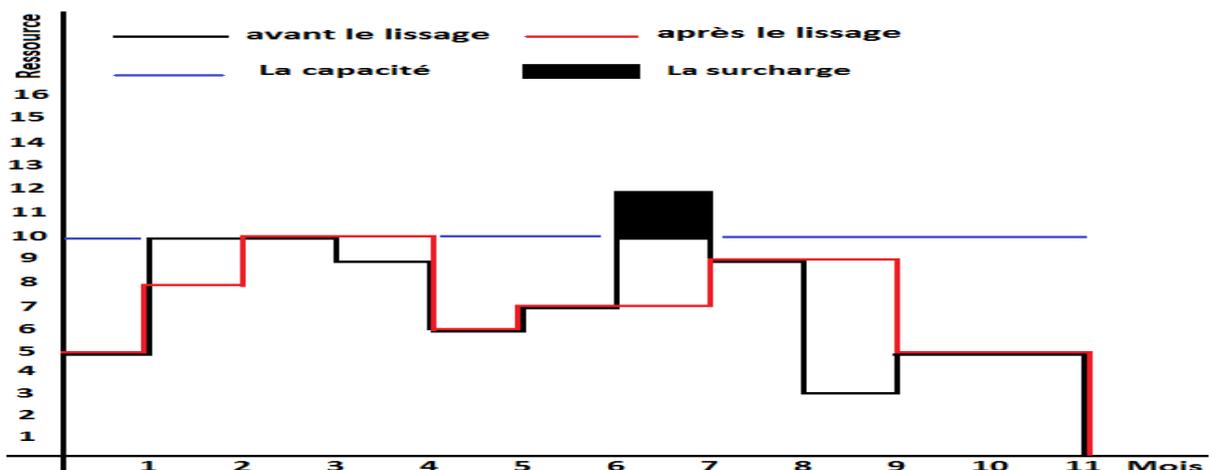


FIGURE 3.8 –  $R_1$ -temps avant et après le lissage

Le diagramme ci-dessus (Figure 3.8) montre que l'utilisation de la ressource  $R_1$  de 6<sup>ème</sup> mois jusqu'au 7<sup>ème</sup> mois est supérieur à sa capacité (10 unité). Donc, la solution ne vérifie pas la contrainte sur la limitation de la ressource  $R_1$ . Alors il y a une surcharge de la ressource  $R_1$ . Mais après l'application de la méthode de Burgess-Killebrew, la surcharge de cette ressource est éliminé. Donc la solution vérifie la contrainte sur la limitation de cette ressource.

### Diagramme d'utilisation de la ressource $R_2$ avant et après le lissage

Le schéma ci-contre (Figure 3.9) représente l'évaluation de la ressource  $R_2$  par rapport au temps, tel que la ligne en noire représente l'utilisation de la ressource  $R_2$  avant le lissage, la ligne en rouge après le lissage et sa capacité par la ligne en bleu.

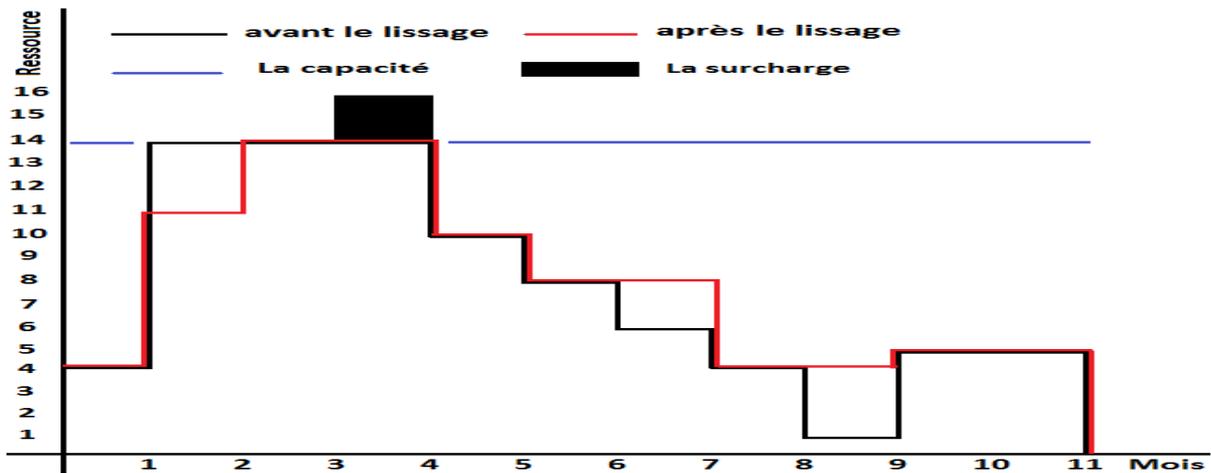
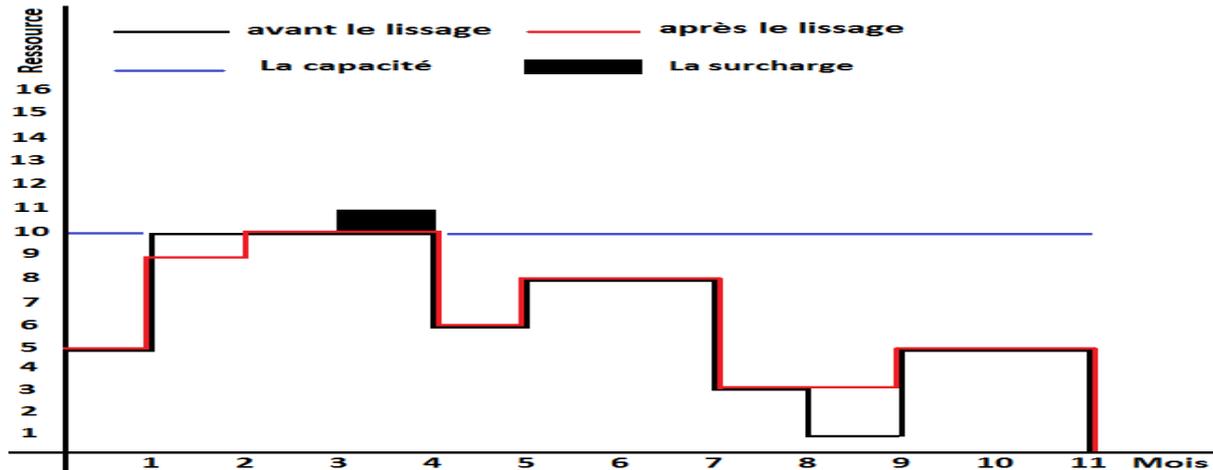


FIGURE 3.9 –  $R_2$ -temps avant et après le lissage

Le diagramme ci-dessus (Figure 3.9) montre que l'utilisation de la ressource  $R_2$  de 3<sup>ème</sup> mois jusqu'au 4<sup>ème</sup> mois est supérieur à sa capacité (14 unité). Donc, la solution ne vérifie pas la contrainte sur la limitation de la ressource  $R_2$ . Alors il y a une surcharge de la ressource  $R_2$ . Mais après l'application de la méthode de Burgess-Killebrew, la surcharge de cette ressource est éliminé. Donc la solution vérifie la contrainte sur la limitation de cette ressource.

#### 3.4.1.1 Diagramme d'utilisation de la ressource $R_3$ avant et après le lissage

Le schéma ci-contre (Figure 3.10) représente l'évaluation de la ressource  $R_3$  par rapport au temps, tel que la ligne en noire représente l'utilisation de la ressource  $R_3$  avant le lissage, la ligne en rouge après le lissage et sa capacité par la ligne en bleu.

FIGURE 3.10 –  $R_3$ -temps avant et après le lissage

Le diagramme ci-dessus (Figure 3.10) montre que l'utilisation de la ressource  $R_3$  de 3<sup>ème</sup> mois jusqu'au 4<sup>ème</sup> mois est supérieur à sa capacité (10 unité). Donc, la solution ne vérifie pas la contrainte sur la limitation de la ressource  $R_3$ . Alors il y a une surcharge de la ressource  $R_3$ . Mais après l'application de la méthode de Burgess-Killebrew, la surcharge de cette ressource est éliminé. Donc la solution vérifie la contrainte sur la limitation de cette ressource.

### b) Méthodes de liste :

Les algorithmes de liste dédiés à l'ordonnancement consistent à construire itérativement, de manière gloutonne, un ordonnancement partiel représenté par une séquence d'activités, à partir d'une liste contenant exactement toutes les activités, appelée liste de priorité. L'idée est donc de départager les activités disponibles.

- **L'ordonnancement de liste parallèle** : Construit la solution dans un ordre chronologique, partant de la date 0. A chaque date, on planifie autant d'activités que possible dans l'ordre donné par la liste de priorité, puis on passe à la date suivante, comme les branchements à ordonnancement partiel. A chaque étape décisionnelle de l'ordonnancement, c'est-à-dire lorsqu'une activité est terminée son exécution ou globalement lorsqu'une ressource redevient disponible, l'algorithme va sélectionner la première des activités prêtes de la liste, c'est-à-dire non encore choisies et disponibles (au sens des algorithmes de branchement à ordonnancement partiel), et l'ajouter à la fin de l'ordonnancement partiel correspondant.
- **L'ordonnancement de liste en série** : Procède activité par activité, en les planifiant, toujours dans l'ordre donné par la liste de priorité, au plus tôt.

Cette liste de priorité est établie suivant des règles précises sur les activités, et dépend du type d'ordonnancement de liste utilisé. Les plus simples, utilisés pour obtenir très rapidement une première solution au problème global, consistent à proposer l'ordre lexicographique ou un ordre aléatoire. On peut encore définir la priorité d'une activité comme la longueur de

son chemin critique restant. Ainsi, seront planifiées en premier lieu les activités susceptibles d'allonger la durée totale d'exécution.

**c) Recherche locale par voisinages :**

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

### 3.4.2 Les métaheuristiques

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

**a) Les colonies de fourmis :**

La recherche par les algorithmes de colonies de fourmis a récemment été introduite comme une métaheuristique puissante pour la résolution d'une famille de problèmes d'optimisation, tels que le problème du voyageur de commerce, le problème de l'affectation quadratique, les problèmes d'optimisation dans les systèmes industriels (les problèmes d'ordonnancement), et les problèmes liés au trafic web, etc [30].

Les études réalisées par les éthologistes ont montré que certains comportements collectifs des insectes étaient auto-organisés. L'auto-organisation caractérise des processus au cours desquels des structures émergent au niveau collectif, à partir d'une multitude d'interactions simples entre insectes, sans être codées explicitement au niveau individuel.

En marchant du nid à la source de nourriture et vice-versa (ce qui dans un premier temps se fait de façon aléatoire), les fourmis déposent au passage sur le sol une substance volatile odorante appelée phéromone. Cette substance permet de créer une piste chimique, sur laquelle les fourmis s'y retrouvent. En effet, d'autres fourmis peuvent détecter les phéromones grâce à des capteurs sur leurs antennes [24, 30].

Les éthologistes ont montré aussi que les fourmis étaient capables de sélectionner le plus court chemin pour aller du nid à une source de nourriture grâce au dépôt et au suivi de pistes de phéromone [24, 30].

Des décisions basées sur les quantités de phéromones. Ces traces sont mises à jour en examinant les critères heuristiques des solutions obtenues. Elles sont renforcées pour les décisions ayant donné de meilleures solutions et diminuées pour les autres. On répète cette itération générale

jusqu'à la réalisation d'un critère d'arrêt, comme par exemple un nombre maximum d'itérations. Ce mécanisme permet d'améliorer progressivement les solutions au cours des itérations [24, 30].

#### b) La recherche tabou :

Cette méthode, dont l'origine remonte à 1977, a été formalisée plus tard, en 1986, par Glover. Elle n'a aucun caractère stochastique et utilise la notion de mémoire pour éviter de tomber dans un optimum local [8].

Le principe de cette méthode est d'examiner le voisinage de la solution courante à chaque itération. L'algorithme enregistre la meilleure solution parmi les voisins, même si elle est moins bonne que la solution courante. L'acceptation des solutions moins performantes que la solution courante permet d'éviter de tomber dans un optimum local. Pour éviter de tourner dans un cercle entre plusieurs solutions, l'algorithme interdit le passage par des solutions récemment visitées.

En pratique, la méthode stocke dans une liste taboue  $T$  les attributs des dernières solutions visitées. Dans l'itération suivante, la meilleure nouvelle solution voisine enlève la solution la plus ancienne dans la liste. Dans d'autres cas, la méthode mémorise les mouvements réalisés plutôt que les solutions. Ensuite, elle interdit les mouvements inverses. Cette technique est rapide et consomme peu de mémoire [24].

#### c) Les algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques appartiennent à la classe des techniques d'intelligence artificielle, et sont développés à base de la loi de survie énoncée par Darwin. Ces algorithmes ont été développés par Holland et les premiers algorithmes dédiés aux problèmes d'ordonnement ont été proposés par Werner, [27].

L'idée de base des algorithmes génétiques est de simuler le processus d'évolution des individus (solutions), la progression de l'exécution de ces algorithmes permet d'avoir les meilleures solutions possibles [3].

#### Le principe des algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques suivent un processus bien établi qui peut être défini comme étant le cycle de l'évolution [14]. Ils travaillent sur une population composée d'individus, tous différents qui sont des solutions potentielles du problème à résoudre, ces individus sont codés et évalués par une fonction d'adaptation puis se reproduisent entre eux grâce aux opérateurs de sélection, croisement et mutation. Cette reproduction donne naissance à une nouvelle génération. Celle-ci subira de nouveau les opérateurs [29].

Algorithme génétique classique :

1. Choisir un codage pour les individus de la population ;

2. Générer la population initiale ;
3. Évaluer les individus générés ;  
**Tant que** (le critère d'arrêt est non satisfait) **faire** :
4. Sélectionner les meilleurs individus ;
5. Appliquer l'opérateur de croisement puis évaluer les individus résultants ;
6. Appliquer l'opérateur de mutation puis évaluer les mutants ;
7. Remplacer l'ancienne population par les meilleurs individus obtenus ;  
**Fin tant que.**

Les composantes principales d'un algorithme génétique sont :

1. **Le codage des individus :**

Le codage est une partie très importante des algorithmes génétiques, il permet de représenter l'individu sous la forme d'un chromosome. Ce chromosome est constitué des gènes qui codent toutes les solutions et aussi la mise en œuvre des opérateurs de production. C'est ainsi que le bon déroulement des algorithmes génétiques sera assuré. Plusieurs codages sont utilisés, les plus fréquents sont le codage binaire et le codage réel.

2. **La population initiale :**

Plusieurs méthodes existent pour définir le mécanisme d'une génération de la population initiale. Cette dernière représente le point de départ pour la constitution des générations futures : le tirage aléatoire, les heuristiques ou une combinaison de solutions heuristiques et aléatoires, etc.

3. **Evaluation de l'adaptation :**

Afin de mesurer les performances de chaque individu, on introduit une fonction d'adaptation. Cette fonction correspond au profit, à l'utilité de la solution par rapport au problème. À base de cette évaluation, on peut sélectionner les individus qui vont participer aux croisements ou aux mutations.

4. **Le croisement (crossover) :**

L'opérateur de croisement est le plus important dans les Algorithmes génétiques, il permet d'explorer efficacement l'espace de recherche. L'opérateur de croisement s'applique sur deux individus choisis parmi la population sélectionnée, il permet de générer deux nouvelles solutions. Il existe dans la littérature plusieurs méthodes avec lesquelles on peut appliquer cet opérateur [22].

5. **La mutation :**

Le deuxième opérateur génétique important est la mutation, elle vient en deuxième place sur le plan d'importance par rapport au croisement. Une mutation est une perturbation introduite sur la composante de l'individu afin de garantir la diversité et élargir le champ d'exploration [22].

#### 6. Le remplacement :

Cette étape construit la population de la génération suivante à partir des parents et des enfants de la génération courante. Une fraction de la population est remplacée par sa descendance à chaque génération [22].

#### 7. Le critère d'arrêt :

Le critère d'arrêt pour un algorithme génétique est le nombre d'itérations qu'il aurait reçu comme donnée d'entrée. On peut aussi prendre comme critère l'instant où la population n'évolue plus rapidement c'est à dire que les résultats fournis par des itérations qui se succèdent ne varient pas d'une manière significative.

### 3.4.3 Les méthodes de résolution exactes

Ces méthodes garantissent la complétude de la résolution et le caractère optimal des solutions trouvées, mais sont coûteuses en temps de calcul. Elles se caractérisent par une exploration déterministe de l'espace de solutions.

#### Procédure de séparation et d'évaluation :

L'algorithme de séparation et d'évaluation, plus connu sous le nom de "Branch and Bound" se base sur l'énumération et l'évaluation progressive de différentes solutions possibles. Le principe de cette méthode consiste d'une part à construire l'arbre de recherche et d'une autre part de couper les branches qui ne conduiront pas au résultat optimal. Pour cela, une borne est calculée. Cette borne représente la valeur maximale atteignable si la branche est poursuivie.

Cette méthode construit un arbre de recherche afin d'explorer implicitement l'espace de recherche. A chaque nœud de l'arbre de recherche, deux situations se produisent :

- un nœud feuille est atteint et une solution économiquement viable, peut être déduite ou bien après le calcul de bornes inférieures, on atteint une borne supérieure ce qui est, dans les deux cas stoppe l'exploration à partir du nœud ;
- on se retrouve à un nœud (nœud courant) permettant de diviser l'espace de recherche associé en des sous-ensembles tels que leur union corresponde à l'ensemble des solutions du nœud courant. Cette opération de partitionnement d'un espace de recherche en sous-zones s'appelle la séparation ou le branchement.

Construire un arbre de recherche qui explore de manière efficace toutes les solutions pertinentes est un défi du problème. Il est connu que l'efficacité d'un système de branchement est généralement liée à la fois à la qualité des bornes inférieures et aux règles de dominance appliquées.

# Application

## 4.1 Description du problème

Le projet de construction pris en charge par l'entreprise RTC-Sonatrach de Béjaïa consiste à réaliser des travaux de rénovation de la base de vie SBM Beni Mansour (Bouira) doivent porter essentiellement sur :

**Travaux des ouvrages existants :**

- Dix (10) villas.
- Un (01) hôtel.
- Un (01) hôtel a chambre individuel.
- Une (01) bâche à eau avec locale technique.
- Un (01) poste transformateur 100 KVA <sup>1</sup>.
- Une (01) infirmerie.
- Une (01) piscine.

La rénovation de la base de vie de Beni Mansour consiste à construire 04 villas (villa chef de station, villa VIP et deux villas singles), un complexe restaurant et le réaménagement de l'hôtel existant.

Cette rénovation apportera une modernisation au point de vue aspect architectural et une amélioration dans les conditions de travail et de vie du personnel de la base de vie Beni Mansour (SBM) de Sonatrach [10].

---

1. KVA : Kilo Volt Ampère.

### 4.1.1 Collecte des données

Ce projet est constitué de 16 activités dont les noms et les durées estimés par le maître d'œuvre sont résumés dans le tableau suivant :

| N° de l'activité | Description des activités                 | Prédécesseurs | Durée (en mois) |
|------------------|---|---------------|-----------------|
| 1                | Travaux de Préparation (Démolition)       | -             | 2               |
| 2                | Infrastructure+Assainissement Intérieur   | 1             | 8               |
| 3                | Superstructure Béton.Armé+Charpente Métal | 2             | 11              |
| 4                | Maçonnerie+Pose Cadre+Instal Electrique   | 3             | 10              |
| 5                | Enduit Interieur+Exterieur                | 2             | 9               |
| 6                | Revêtement Murs et Sol                    | 5             | 9               |
| 7                | Etanchiete Terrasses                      | 5             | 3               |
| 8                | Ménuiserie Bois-Aluminum-Métal            | 5             | 8               |
| 9                | Tuyauterie Plomberie                      | 8             | 7               |
| 10               | Pinture Interieur+Exterieur               | 9             | 8               |
| 11               | Pose Appareillage Plomberie+Electricité   | 8,9           | 4               |
| 12               | Pose Equipement Cuis+Meuble+P.Transfo     | 11            | 3               |
| 13               | V.R.D-Terrassement                        | 10            | 3               |
| 14               | V.R.D-Assainissement Exterieur(E.U.D.E.P) | 12            | 2               |
| 15               | V.R.D-A.E.P+Reseau Incendie               | 13            | 2               |
| 16               | V.R.D-Revêtement Voirie et Parking        | 15            | 2               |

TABLE 4.1: Tableau des activités du projet

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

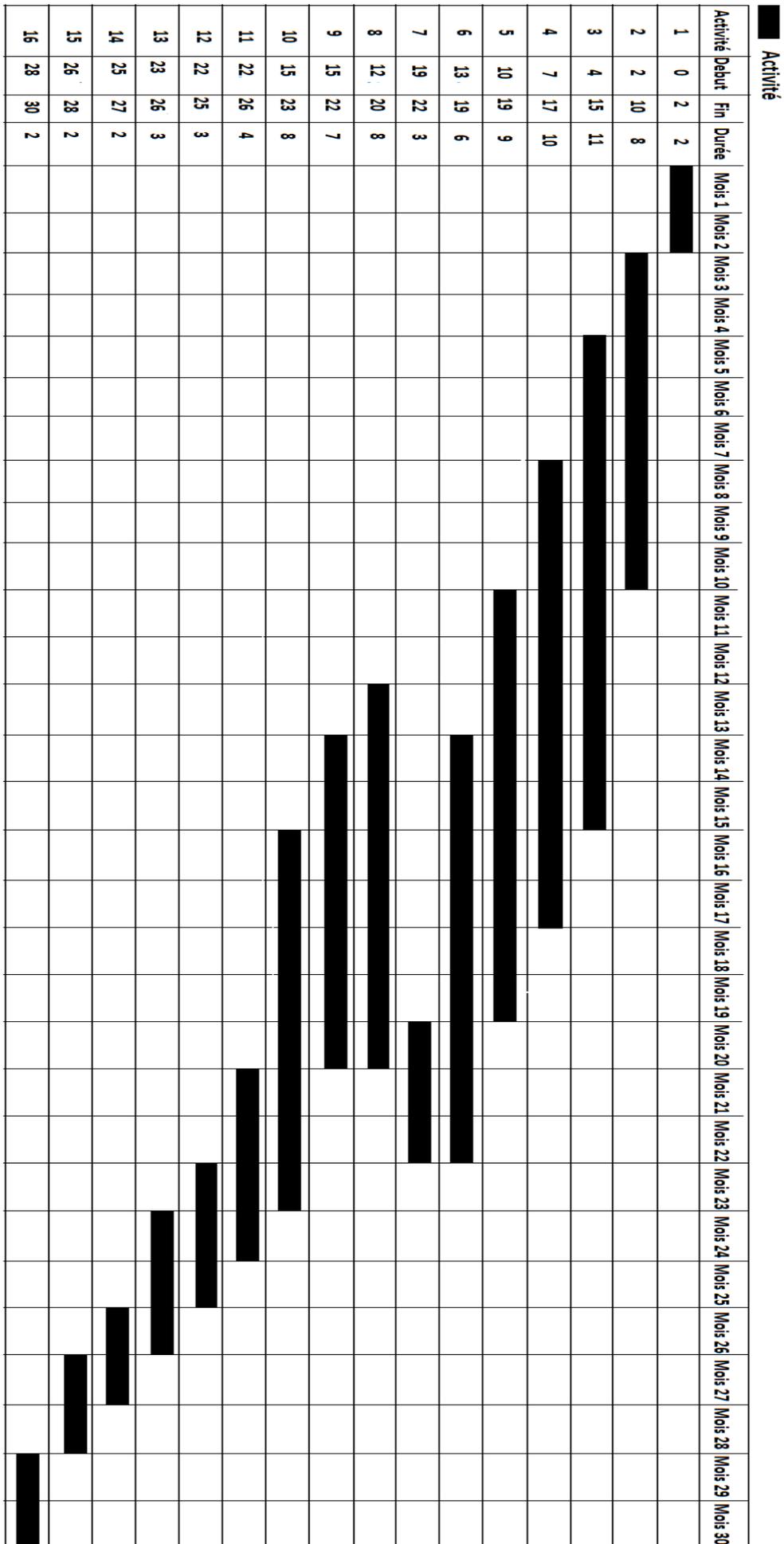


FIGURE 4.1 – La représentation des activités sur le diagramme de Gantt

Mais certaines activités n'ayant pas des relations d'antériorités strictes, pour cela, on est obligé de les éclater en sous-activités pour mettre en évidence des relations d'antériorités strictes, afin de pouvoir tracer le réseau P.E.R.T.

**L'éclatement des activités :** on dévise les activités suivantes :

1. Infrastructure+Assainissement Intérieur en trois sous-activités.
2. Superstructure Béton.Armé+Charpente Métal en deux sous-activités.
3. Maçonnerie+Pose Cadre+Instal Electrique en deux sous-activités.
4. Enduit Interieur+Exterieur en deux sous-activités.

Après l'éclatement de ses activités, on obtient alors 21 activités. Le tableau suivant représente les 21 activités, les prédécesseurs et leurs durées.

| N° de l'activité | Description des activités                     | Prédécesseurs | Durée (en mois) |
|------------------|---|---------------|-----------------|
| 1                | Travaux de Préparation(Démolition)            | -             | 2               |
| 2                | Infrastructure+Assainissement Intérieur (1)   | 1             | 2               |
| 3                | Infrastructure+Assainissement Intérieur (2)   | 2             | 3               |
| 4                | Infrastructure+Assainissement Intérieur (3)   | 3             | 3               |
| 5                | Superstructure Béton.Armé+Charpente Métal (1) | 2             | 7               |
| 6                | Superstructure Béton.Armé+Charpente Métal (2) | 5             | 4               |
| 7                | Maçonnerie+Pose Cadre+Instal Electrique (1)   | 4             | 5               |
| 8                | Maçonnerie+Pose Cadre+Instal Electrique (2)   | 3             | 5               |
| 9                | Enduit Interieur+Exterieur (1)                | 4             | 3               |
| 10               | Enduit Interieur+Exterieur (2)                | 9             | 6               |
| 11               | Revêtement Murs et Sol                        | 5             | 9               |
| 12               | Etanchiete Terrasses                          | 10            | 3               |
| 13               | Ménuiserie Bois-Aluminum-Métal                | 7             | 8               |
| 14               | Tuyauterie Plomberie                          | 9             | 7               |
| 15               | Pinture Interieur+Exterieur                   | 6             | 8               |
| 16               | Pose Appareillage Plomberie+Electricité       | 11,13 et 14   | 4               |
| 17               | Pose Equipement Cuis+Meuble+P.Transfo         | 12            | 3               |
| 18               | V.R.D-Terrassement                            | 15            | 3               |
| 19               | V.R.D-Assainissement Exterieur(E.U.D.E.P)     | 17            | 2               |
| 20               | V.R.D-A.E.P+Reseau Incendie                   | 18            | 2               |
| 21               | V.R.D-Revêtement Voirie et Parking            | 20            | 2               |

TABLE 4.2: Tableau des activités après leurs éclatement.

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

| N° de la ressource | Ressource                    | Capacité |
|--------------------|------------------------------|----------|
| $R_1$              | Maçon                        | 5        |
| $R_2$              | Coffreur                     | 6        |
| $R_3$              | Ferrailleur                  | 5        |
| $R_4$              | Manoeuvre                    | 10       |
| $R_5$              | Peintre                      | 3        |
| $R_6$              | Plombier                     | 2        |
| $R_7$              | Electricien bâtiment         | 2        |
| $R_8$              | Chauffeur VL/PL              | 3        |
| $R_9$              | Conducteur bétonnière/Dumper | 3        |
| $R_{10}$           | Grutier                      | 2        |
| $R_{11}$           | Camion                       | 3        |
| $R_{12}$           | Grue                         | 2        |
| $R_{13}$           | Dumper                       | 1        |
| $R_{14}$           | Bétonnière                   | 2        |

TABLE 4.3: Tableau des disponibilités des ressources.

Les besoins des activités du projet en chaque ressource sont énumérés dans le tableau suivant :

| N° de l'activité | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $R_4$ | $R_5$ | $R_6$ | $R_7$ | $R_8$ | $R_9$ | $R_{10}$ | $R_{11}$ | $R_{12}$ | $R_{13}$ | $R_{14}$ |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1                | 3     | 0     | 0     | 5     | 0     | 0     | 0     | 3     | 1     | 1        | 3        | 1        | 1        | 0        |
| 2                | 0     | 5     | 5     | 7     | 0     | 0     | 0     | 2     | 1     | 2        | 2        | 2        | 1        | 0        |
| 3                | 0     | 3     | 2     | 4     | 0     | 0     | 0     | 2     | 1     | 1        | 2        | 1        | 1        | 0        |
| 4                | 0     | 4     | 3     | 2     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 0        | 1        | 0        | 1        | 0        |
| 5                | 1     | 2     | 2     | 4     | 0     | 0     | 0     | 1     | 2     | 1        | 1        | 1        | 0        | 2        |
| 6                | 1     | 2     | 2     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 2     | 0        | 0        | 0        | 0        | 2        |
| 7                | 1     | 0     | 0     | 3     | 0     | 0     | 2     | 1     | 0     | 1        | 1        | 1        | 0        | 0        |
| 8                | 1     | 0     | 0     | 2     | 0     | 0     | 2     | 0     | 0     | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 9                | 3     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        |
| 10               | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1        | 0        | 1        | 1        | 0        |
| 11               | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        |
| 12               | 0     | 0     | 0     | 4     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1        | 0        | 1        | 0        | 0        |
| 13               | 0     | 0     | 0     | 2     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 1        | 1        | 1        | 0        | 0        |
| 14               | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 1     | 0     | 1     | 0     | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        |
| 15               | 0     | 0     | 0     | 2     | 3     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 16               | 0     | 0     | 0     | 6     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1        | 1        | 1        | 0        | 0        |
| 17               | 5     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 1     | 1     | 0     | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        |
| 18               | 0     | 0     | 0     | 2     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 1        | 1        | 1        | 0        | 0        |
| 19               | 3     | 3     | 3     | 3     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 0        | 1        | 0        | 1        | 0        |
| 20               | 0     | 0     | 0     | 2     | 3     | 2     | 0     | 1     | 0     | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        |
| 21               | 4     | 0     | 0     | 3     | 2     | 0     | 0     | 2     | 3     | 0        | 2        | 0        | 1        | 2        |

TABLE 4.4: Matrice des besoins.

Notre problématique consiste à la réalisation de l'ensemble des activités du projet avec seulement les ressources disponibles (en nombre limité) durant une durée limitée.

- Le délai de projet doit être calculé en utilisant la méthode P.E.R.T.
- Faire le lissage des ressources en utilisant la méthode de Burgess-Killebrew, et cela en respectant le délai (la durée totale) de réalisation du projet calculé précédemment avec la méthode P.E.R.T.

## 4.2 Minimisation de la durée totale de projet

### 4.2.1 Application de la méthode P.E.R.T

Le tableau suivant indique les dates au plus tôt, les dates au plus tard, les marges libres et les marges totales de chaque activité.

| N° de l'activité | Debut au plus tôt | Debut au plus tard | Fin au plus tôt | Fin au plus tard | Marge libre | Marge total |
|------------------|-------------------|--------------------|-----------------|------------------|-------------|-------------|
| 1                | 0                 | 0                  | 2               | 2                | 0           | 0           |
| 2                | 2                 | 2                  | 4               | 4                | 0           | 0           |
| 3                | 4                 | 7                  | 7               | 10               | 0           | 3           |
| 4                | 7                 | 10                 | 10              | 13               | 0           | 3           |
| 5                | 4                 | 4                  | 11              | 11               | 0           | 0           |
| 6                | 11                | 11                 | 15              | 15               | 0           | 0           |
| 7                | 7                 | 13                 | 12              | 18               | 0           | 6           |
| 8                | 12                | 25                 | 17              | 30               | 13          | 13          |
| 9                | 10                | 13                 | 13              | 16               | 0           | 3           |
| 10               | 13                | 16                 | 19              | 22               | 0           | 3           |
| 11               | 11                | 17                 | 20              | 26               | 0           | 6           |
| 12               | 19                | 22                 | 22              | 25               | 0           | 3           |
| 13               | 12                | 18                 | 20              | 26               | 0           | 6           |
| 14               | 13                | 19                 | 20              | 26               | 0           | 6           |
| 15               | 15                | 15                 | 23              | 23               | 0           | 0           |
| 16               | 20                | 26                 | 24              | 30               | 6           | 6           |
| 17               | 22                | 25                 | 25              | 28               | 0           | 3           |
| 18               | 23                | 23                 | 26              | 26               | 0           | 0           |
| 19               | 25                | 28                 | 27              | 30               | 3           | 3           |
| 20               | 26                | 26                 | 28              | 28               | 0           | 0           |
| 21               | 28                | 28                 | 30              | 30               | 0           | 0           |

TABLE 4.5: Tableau des différentes dates et marges du projet.

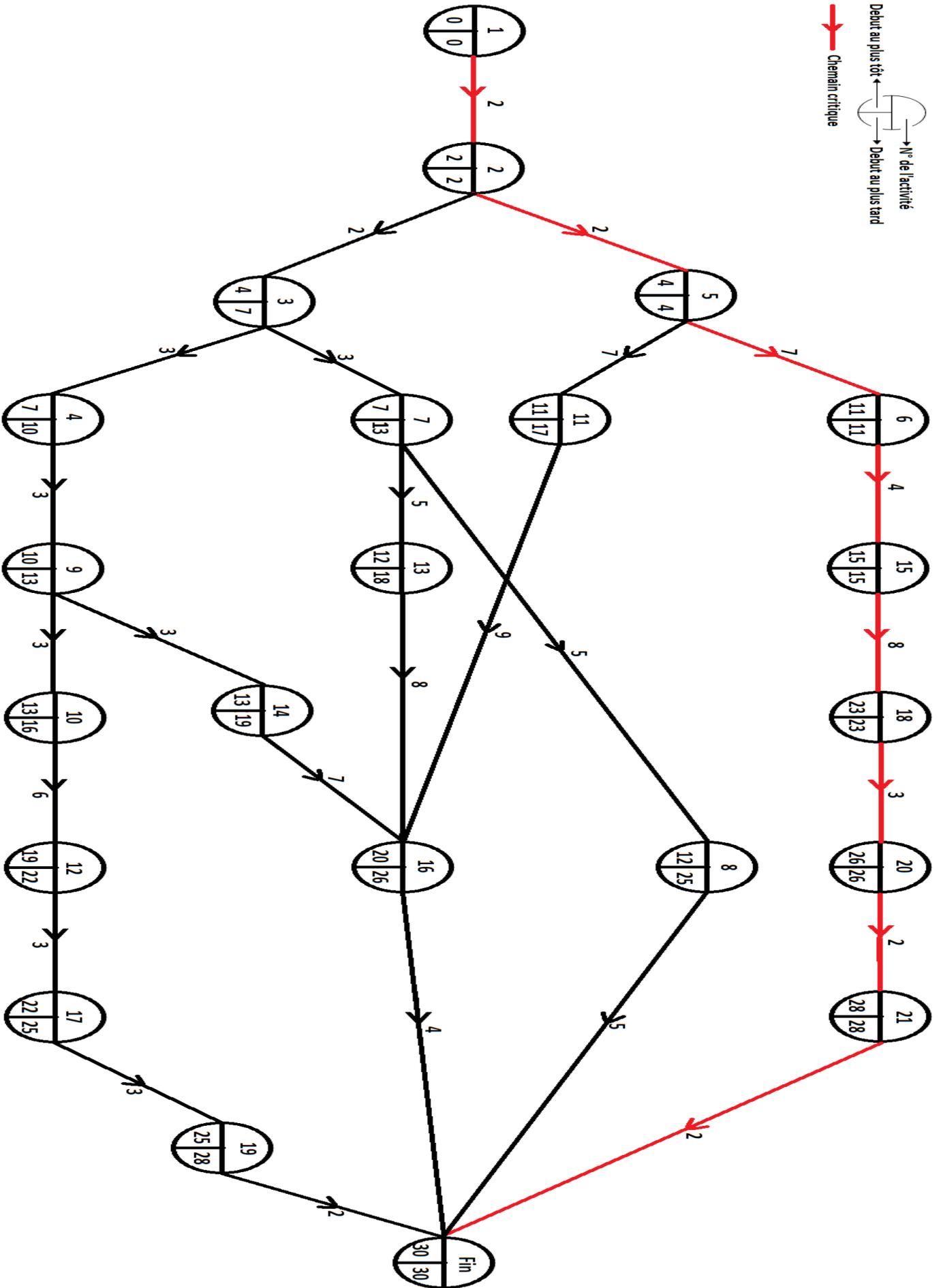


FIGURE 4.2 – Réseau P.E.R.T

Selon le réseau (Figure 4.2), on constate que la durée minimale de la réalisation du projet est de 30 mois.

Les tâches critiques sont : 1, 2, 5, 6, 15, 18, 20, 21. Alors le chemin critique c'est les arcs des tâches critiques (le chemin présenté en rouge sur le graphe de la (Figure 4.2)).

## 4.3 Le lissage pour les ressources

### 4.3.1 Application de la méthode de Burgess-Killebrew

Pour réaliser les activités du projet, des ressources sont nécessaires, ou les ressources utilisées pour un projet sont souvent transversales et appartiennent à des services différents et sont affectées momentanément au projet. Ce type de gestion des ressources est appelé le lissage qui consiste à répartir la charge de travail de chaque ressource dans le temps sans rallonger la durée du projet.

#### 4.3.1.1 Diagramme des charges

Une fois la construction du réseau P.E.R.T est terminée et la durée de projet est obtenue, nous construisons le diagramme de Gantt, qui nous permettra l'obtention des diagrammes des charges des ressources en personnels ou en moyens matériels. En fonction du diagramme des charges obtenu et des ressources disponibles, nous devons équilibrer les charges du travail.

Pour résoudre ce type de problème on utilise deux méthodes de répartition de la charge :

- a- Lissage : équilibrer l'utilisation des ressources avec la conservation de délai de réalisation du projet.
- b- Nivellement : équilibrer l'utilisation des ressources avec le déplacement éventuel de délai de réalisation du projet.

Dans notre cas et suite à la décision du maître de l'ouvrage de garder le délai de 30 mois, nous allons utiliser le lissage qui répond à ce type de problème.



Notre but est de réduire la capacité des charges (ressources) sans dépasser le délai (la durée trouvée par l'application de la méthode P.E.R.T) de projet, on voit bien dans le premier diagramme que le problème se pose au niveau des ressources suivantes :

- Maçon ( $R_1$ ) : on a besoin de 6 maçon, mais réellement la capacité de cette ressource est limitée qui est égale à 5.
- Manœuvre ( $R_4$ ) : on a besoin de 12 manœuvre, mais réellement la capacité de cette ressource est limitée qui est égale à 10.

Les deux diagrammes suivants représentent l'évolution des ressources (Maçon, Manœuvre) par rapport aux temps avant le lissage :

#### 4.3.1.2 Diagramme d'utilisation de la ressource Maçon avant le lissage

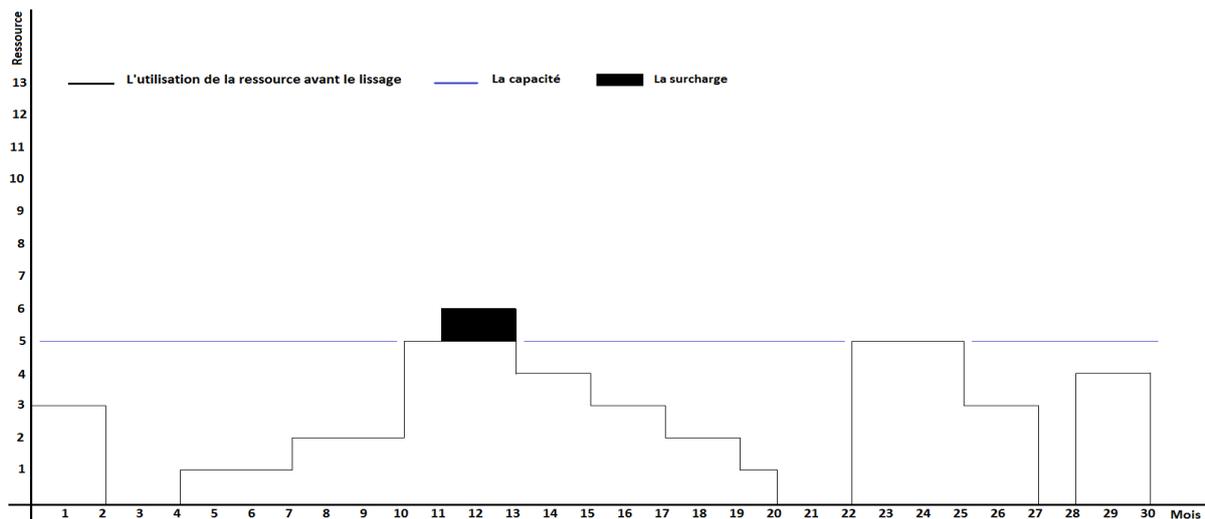


FIGURE 4.4 – Diagramme Maçon-temps avant le lissage.

Le diagramme ci-dessus montre que l'utilisation de la ressource maçon de 11<sup>ème</sup> mois jusqu'au 13<sup>ème</sup> mois est supérieure à sa capacité (5 maçons). Donc, la solution ne vérifie pas la contrainte sur la limitation de la ressource maçon. Alors il y a une sur utilisation de la ressource maçon.

Le but principal recherché est la réalisation de l'ensemble des tâches sans dépasser la disponibilité des ressources dans le délai fixe, dans notre cas nous construisons dans le diagramme précédent des dépassements de la capacité de la ressource maçon ( $R_1$ ).

### 4.3.1.3 Diagramme d'utilisation de la ressource Manœuvre avant le lissage

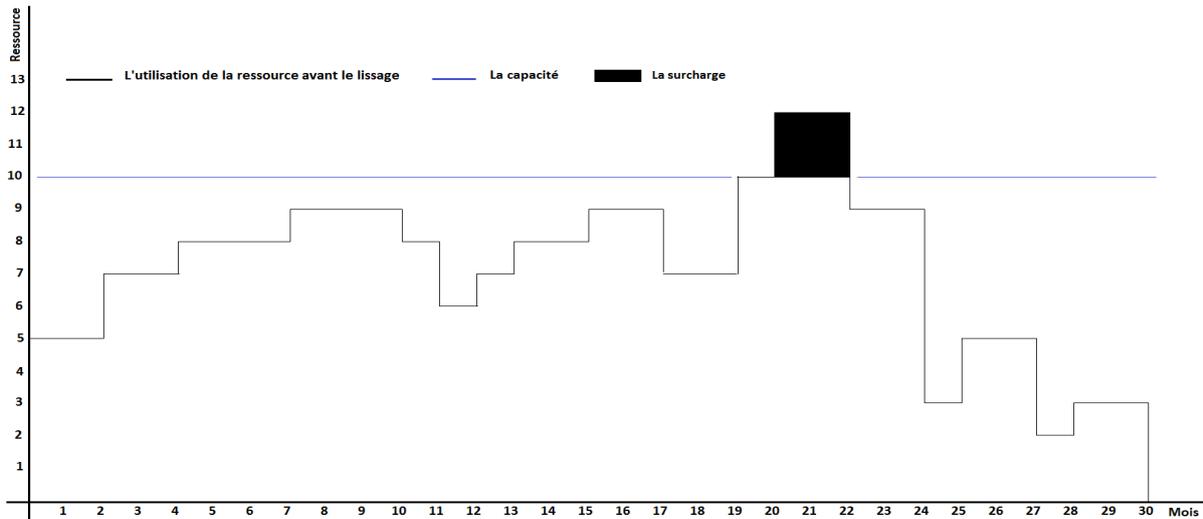


FIGURE 4.5 – Diagramme Manœuvre-temps avant le lissage.

Le diagramme ci-dessus montre que l'utilisation de la ressource manœuvre de 20<sup>ème</sup> mois jusqu'au 22<sup>ème</sup> mois est supérieur à sa capacité (10 manœuvres). Donc, la solution ne vérifie pas la contrainte sur la limitation de la ressource manœuvre. Alors, il y a une sur utilisation de la ressource manœuvre.

## 4.4 Résultats et interprétations

### 4.4.1 Résultats

Le code source de l'algorithme de Burgess-Killebrew sous MATLAB :

– La fonction qui calcule la somme de carré d'utilisation des ressources :

```
function y=carre(r)
global m T
somme=0;
v=[];
for k=1:m
    s=0;
    for t=1:T
        c=r(k,t)^2;
        s=s+c;
    end
    v=[v;s];
end
```

```

        somme=somme+s;
    end
    v;
    y=somme;

```

– **Le Programme principale :**

```

clear all;
clc;
global m T r
n=input('enterer le nombres de tâches n= ');
m=input('enterer le nombres de ressources m= ');
T=input('enterer la duree de projet T= ');
for k=1:m
    for t=1:T
        fprintf('donner la ressource %d dans le mois %d\n',k,t);
        r(k,t)=input('r(k,t)= ');
    end
end
for i=1:n
    fprintf('donner la marge totale de la tache %d\n',i);
    marge(i)=input('marge(i)=');
end
for k=1:m
    for i=1:n
        fprintf('donner la ressource %d affecter à la tâche %d\n',k,i);
        R(k,i)=input('R(k,i)= ');
    end
end
for i=1:n
    fprintf('donner le debut de la tache %d\n',i);
    debut(i)=input('debut(i)=');
    fprintf('donner le fin de la tache %d\n',i);
    fin(i)=input('fin(i)=');
end
debut
fin

```

```
r
u=r;
plot(u)
y=carre(r)
for i=n:-1:1
    if marge(i)~=0
        while(1==1)
            yo=carre(r);
            for k=1:m
                r(k,debut(i)+1)=r(k,debut(i)+1)-R(k,i)
                r(k,fin(i)+1)=r(k,fin(i)+1)+R(k,i)
            end
            marge(i)=marge(i)-1;
            debut(i)=debut(i)+1;
            fin(i)=fin(i)+1;
            if(carre(r)>yo || marge(i)<0)
                break;
            end
        end
    end
    for k=1:m
        r(k,debut(i))=r(k,debut(i))+R(k,i)
        r(k,fin(i))=r(k,fin(i))-R(k,i)
    end
    debut(i)=debut(i)-1;
    fin(i)=fin(i)-1;
end
end
debut
fin
r
stairs(r(i,:))
y;
```

Après l'application de l'algorithme de Burgess-Killebrew sous MATLAB, on a obtenus les résultats suivants :

On a les tâches critiques sont : 1 , 2, 5, 6, 15, 18, 20, 21. Ces tâches ne doivent pas être déplacés.

Calculons d'abord :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3444.$$

On déplace la dernière tâche (Activité) non critique (19) on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3444;$$

avec :  $3444 = 3444$ . Alors, on déplace la tâche 19 d'une unité de temps vers la fin de diagramme de Gantt.

donc :  $t_{19} = 26$  et  $C_{19} = 28$ .

On déplace encore la tâche 19 d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3486;$$

avec :  $3444 < 3486$ . Alors, la tâche 19 ne doit pas déplacé.

Alors on déplace une autre tâche non critique (17) on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3430;$$

avec :  $3444 > 3430$ . Alors, on déplace la tâche 17 d'une unité de temps vers la fin de diagramme de Gantt.

donc :  $t_{17} = 23$  et  $C_{17} = 26$ .

On déplace encore la tâche 17 d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3456;$$

avec :  $3444 < 3456$ . Alors, la tâche 17 ne doit pas déplacé.

Alors on déplace une autre tâche non critique (16) on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3400;$$

avec :  $3430 > 3400$ . Alors, on déplace la tâche 16 d'une unité de temps vers la fin de diagramme de Gantt.

donc :  $t_{16} = 21$  et  $C_{16} = 25$ .

On déplace encore la tâche 16 d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3374;$$

avec :  $3400 > 3374$ . Alors, on déplace la tâche 16 d'une unité de temps vers la fin de diagramme de Gantt.

donc :  $t_{16} = 22$  et  $C_{16} = 26$ .

On déplace encore la tâche 16 d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3424;$$

avec :  $3374 < 3424$ . Alors, la tâche 16 ne doit pas être déplacée.

Alors on déplace une autre tâche non critique (14) on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3364;$$

avec :  $3374 > 3364$ . Alors, on déplace la tâche 14 d'une unité de temps vers la fin de diagramme de Gantt.

donc :  $t_{14} = 14$  et  $C_{14} = 21$ .

On déplace encore la tâche 14 d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3354;$$

avec :  $3364 > 3354$ . Alors, on déplace la tâche 14 d'une unité de temps vers la fin de diagramme de Gantt.

donc :  $t_{14} = 15$  et  $C_{14} = 22$ .

On déplace encore la tâche 14 d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3352;$$

avec :  $3354 > 3352$ . Alors, on déplace la tâche 14 d'une unité de temps vers la fin de diagramme de Gantt.

donc :  $t_{14} = 16$  et  $C_{14} = 23$ .

On déplace encore la tâche 14 d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3356;$$

avec :  $3352 < 3356$ . Alors, la tâche 14 ne doit pas être déplacée.

On déplace une autre tâche non critique (13) d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3364;$$

avec :  $3352 < 3364$ . Alors, la tâche 13 ne doit pas être déplacée.

On déplace une autre tâche non critique (12) d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3376;$$

avec :  $3352 < 3376$ . Alors, la tâche 12 ne doit pas être déplacée.

On déplace une autre tâche non critique (11) d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3346;$$

avec :  $3352 > 3346$ . Alors, on déplace la tâche 11 d'une unité de temps vers la fin de diagramme de Gantt.

donc :  $t_{11} = 12$  et  $C_{11} = 21$ .

On déplace encore la tâche 11 d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3338;$$

avec :  $3346 > 3338$ . Alors, on déplace la tâche 11 d'une unité de temps vers la fin de diagramme de Gantt.

donc :  $t_{11} = 13$  et  $C_{11} = 22$ .

On déplace encore la tâche 11 d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3342;$$

avec :  $3338 < 3342$ . Alors, la tâche 11 ne doit pas être déplacée.

On déplace une autre tâche non critique (10) d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3342;$$

avec :  $3338 < 3342$ . Alors, la tâche 10 ne doit pas être déplacée.

On déplace une autre tâche non critique (9) d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3354;$$

avec :  $3338 < 3354$ . Alors, la tâche 9 ne doit pas déplacé.

On déplace une autre tâche non critique (8) d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3346;$$

avec :  $3338 < 3346$ . Alors, la tâche 8 ne doit pas déplacé.

On déplace une autre tâche non critique (7) d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3350;$$

avec :  $3338 < 3350$ . Alors, la tâche 7 ne doit pas déplacé.

On déplace une autre tâche non critique (4) d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3346;$$

avec :  $3338 < 3346$ . Alors, la tâche 4 ne doit pas déplacé.

On déplace une autre tâche non critique (3) d'une unité de temps on obtient :

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^T r_{kt}^2 = 3438;$$

avec :  $3338 < 3438$ . Alors, la tâche 3 ne doit pas déplacé.

#### 4.4.2 Interprétations des résultats

Avant d'appliquer de la méthode de Burgess-Killebrew la fonction objectif  $S = 3444$ , à la fin de l'application de cette méthode on a trouvé  $S = 3338$ . Alors, cette dernière diminue la somme du carré de la charge, et satisfait notre objectif.

La représentation des activités et les ressources sur le diagramme de Gantt, Après l'application de la méthode de Burgess-Killebrew est représenté par la (Figure 4.6) :



Après l'utilisation de la méthode Burgess-Killebrew on est déplacé certaines activités sans changer ses durées, après ce déplacement de ses activités le chemin critique doit être changer.

Alors les activités critiques sont : 1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21.

Après le lissage on obtient les deux diagrammes suivants :

#### 4.4.2.1 Diagramme d'utilisation de la ressource Maçon avant et après le lissage

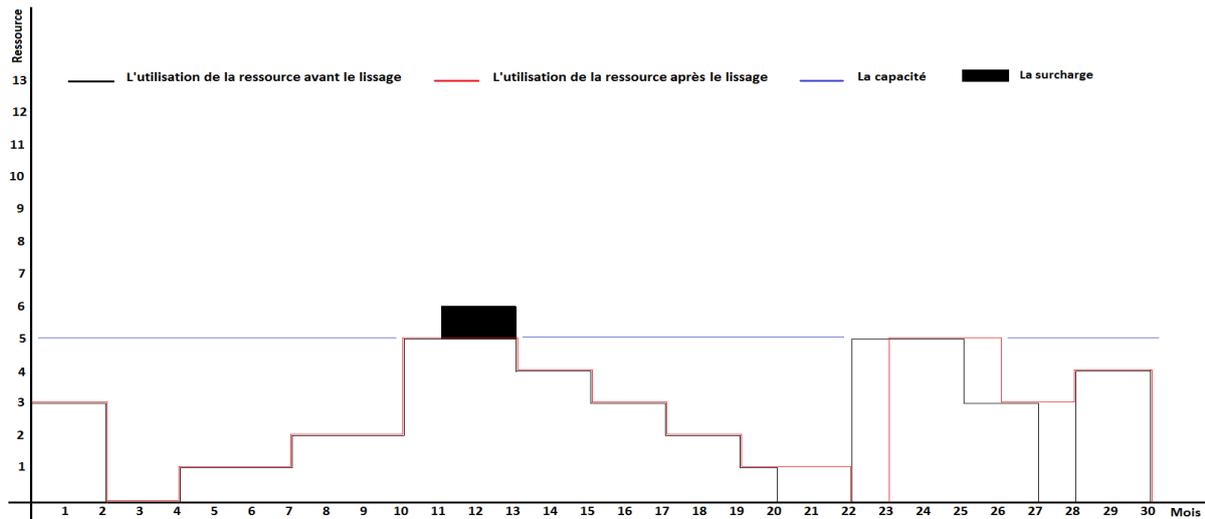


FIGURE 4.7 – Diagramme Maçon-temps avant et après le lissage.

Le diagramme ci-dessus montre que la ressource maçon ne dépasse pas sa capacité (5 maçons) après l'application de la méthode de Burgess-Killebrew. Donc la solution vérifie la contrainte sur la limitation de cette ressource. Alors la sur utilisation (surcharge) de cette ressource est éliminé.

#### 4.4.2.2 Diagramme d'utilisation de la ressource Manœuvre avant et après le lissage

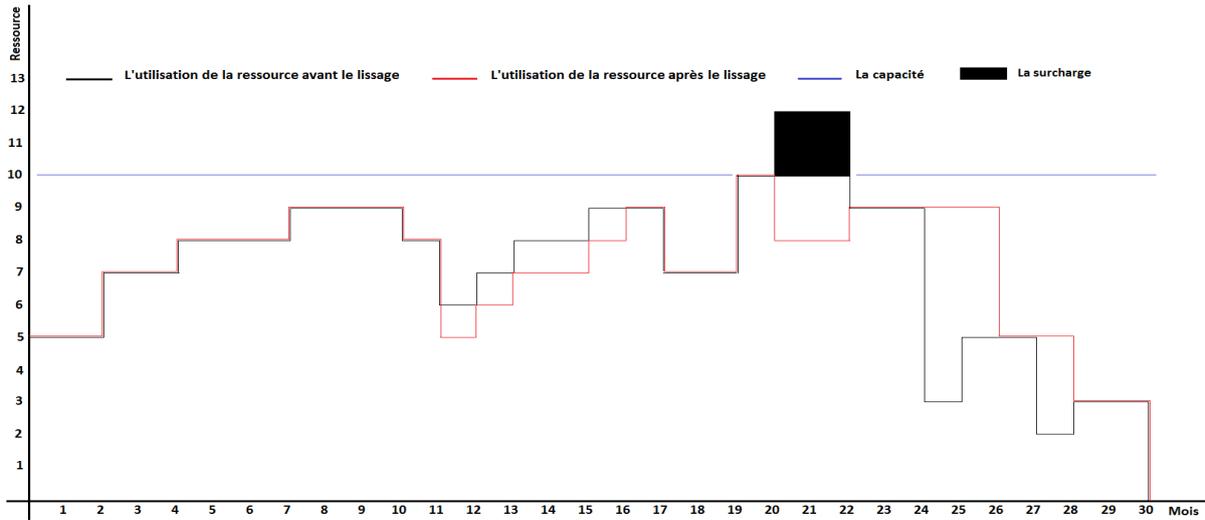


FIGURE 4.8 – Diagramme Manœuvre-temps après le lissage.

Le diagramme ci-dessus montre que la ressource manœuvre ne dépasse pas sa capacité (10 manœuvres) après l'application de la méthode de Burgess-Killebrew. Donc la solution vérifie la contrainte sur la limitation de la ressource manœuvre. Alors la sur utilisation (surcharge) de cette ressource est éliminé.

# Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons essayé de traduire les objectifs des dirigeants de l'entreprise RTC-Sonatrach de Béjaia, ainsi que les différentes contraintes rencontrées dans l'ordonnancement du projet "Rénovation de la base de vie SBM Beni Mansour (Bouira)", en équations mathématiques, qui résument à la fois les contraintes temporelles et de ressources limitées, liées à la nature des tâches ainsi que les contraintes imposées, par les dirigeants de l'entreprise, afin de réaliser le projet dans le délai.

Premièrement, on a modélisé le projet sous forme d'un problème d'ordonnancement en minimisant la durée totale du projet, pour résoudre ce modèle nous avons utilisé la méthode P.E.R.T. De ce fait, on a estimé la durée minimale du projet à 30 mois.

En suite, après l'obtention de la durée minimale du projet, on doit fixer cette durée et on a donné une formulation mathématique pour le problème de lissage de ressources (RLP).

Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé une méthode heuristique (méthode Burgess-Killebrew) qui réduit les conflits des charges de travail. En effet, les résultats obtenus par l'application de l'algorithme de Burgess-Killebrew, sous MATLAB, nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- ✓ Le projet sera achevé en 30 mois.
- ✓ Les relations d'antériorités sont changés après le déplacement de certaine activité, pour cela même le chemin critique doit être changer.
- ✓ Les ressources (Coffreur, Ferrailleur, Peintre, Plombier, Electricien bâtiment, Chauffeur *VL/PL*, Conducteur bétonnière/Dumper, Grutier, Camion, Grue, Dumper, Bétonnière) satisfont la charge de travail.
- ✓ Réduire l'utilisation des ressources maçon et manœuvre sans dépasser leurs capacités en respectant le délai alloué au projet.

Néanmoins, le RLP est un problème d'optimisation NP-difficile en raison de sa nature fortement combinatoire, donc les méthodes heuristiques conventionnelles ne sont ni souples, ni productives pour

résoudre le RLP. De ce fait, le nivellement des ressources est un outil privilégié pour sa résolution mais avec une augmentation de la durée de projet. Ce dernier se fait par les logiciels de gestion de projet.

Comme perspectives, nous envisageons :

- D'appliquer les algorithmes génétiques.
- De faire des comparaisons entre les résultats obtenus par l'application de la méthode de Burgess-Killebrew avec ceux obtenus en utilisant les algorithmes génétiques.

# Bibliographie

- [1] A. Burgess and J. Killebrew, Variation in activity level on a cyclic arrow diagram, *Journal of Industrial Engineering* 13 (1962) 76–83.
- [2] A. Dayan, *Manuel de Gestion*. 1999.
- [3] A. L. Medaglia and S. C. Fang, A genetic-based framework for solving (multicriteria) weighted matching problems, *European Journal of Operational Research* 149 (2003), 77, 101.
- [4] B. Roy et M. Dibon, l'ordonnancement par la méthode des potentiels le programme CONCORD, *Automatisme*, pages 1-11, février 1966.
- [5] C. Artigues et S. Demassez, *Gestion de production et ressources humaines*, 18 mars 2005.
- [6] C. Gray. *Management de Projets*. Ellipses Ed. Paris, Janvier 2007.
- [7] C. Gray. *Management de Projets*. Dunkerque, Paris, Janvier 2007.
- [8] D. Aissani, *Modélisation*, Notes de cours, Université de Béjaia, 2008.
- [9] D. Dewalf, *Gestion de Projets*. 2007.
- [10] Dossier d'appel d'offres, rénovation de la base de vie de station de pompage SBM Beni Mansour (W. Bouira), AO N° 11/2011.
- [11] E. Goldratt, *Critical Chain*, North River Press, Inc. Great Barrington, MA, 1997.
- [12] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*, vol(5) : 533-549, 1986.
- [13] F. Karaa and A. Nasr, Resource management in construction, *Journal of Construction Engineering and Management* 112 (3) (1986) 346–357.
- [14] G. Balmissse, *les algorithmes génétiques*, septembre 2002.
- [15] J. F. Boss "Prise en consideration des contraintes pesant sur la disponibilité des moyens Dans les methodes de chemin critique". *Revue Francaise de Recherche Operationelle*, n° 38, 1966.
- [16] J. L. Ponz-Tienda, Víctor Yepes, Eugenio Pellicer , Joaquin Moreno-Flores, The Resource Leveling Problem with multiple resources using an adaptive genetic algorithm, *journal homepage, Automation in Construction* 29 (2013) 161–172.

- [17] J. Lissarrague. Qu'est-ce que le P.E.R.T? DUNOD, France, Paris, 1988.
- [18] J. Turner, Do you manage work, deliverables or resources? *International Journal of Project Management* 18 (2) (2000) 83–84.
- [19] J. Turner, Towards a theory of project management : the nature of the project, *International Journal of Project Management* 24 (1) (2006) 1–3.
- [20] J. Turner, Towards a theory of project management : the functions of project management, *International Journal of Project Management* 24 (3) (2006) 187–189.
- [21] K. Brinkmann and K. Neumann, Heuristic procedures for resource-constrained project scheduling with minimal and maximal time lags : the resource-levelling and minimum project-duration problems, *Journal of Decision Systems* 5 (1996) 129–156.
- [22] K. Merhoum and M. Djeghaba, Algorithmes génétiques pour le problème d'ordonnancement de type job-shop, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.
- [23] K. Neumann, C. Schwindt, J. Zimmermann, *Project Scheduling with Time Windows and Scarce Resources*, Springer, Berlin, 2003.
- [24] K. Zidi, Système interactif d'aide au déplacement multimodal, Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille, France, 2006.
- [25] L. F. Gray, Clifford et W. Erik. *Management de projet*. Dunod Ed. Paris, 2007.
- [26] L. H. Trung, Utilisation d'ordres partiels pour la caractérisation de solutions robustes en ordonnancement, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 24 Janvier 2005.
- [27] M. Andresen, H. Bräsel, M. Mörig, J. Tusch, F. Werner, and P. Willenius, Simulated annealing and genetic algorithms for minimizing mean flow time in an open shop, *Mathematical and Computer Modelling* 48 (2008), 1279, 1293.
- [28] R. Faure et A. Alj "Guide de la recherche opérationnelle " Masson Editions, 1990.
- [29] SCMC, La Société des comptables en management du Canada (1995) "L'entreprise virtuelle : une réalité?". <http://strategis.gc.ca>, 1999.
- [30] Y. H Song, H. L Kwang, Y. Lee, and I. K. Yu, Fundamentals of ant colony search algorithms, *Modern Heuristic Optimisation Techniques. Theory and Application to Power Systems*; IEEE PRESS, 2008.

## Diagramme d'utilisation de la ressource Coffreur avant le lissage

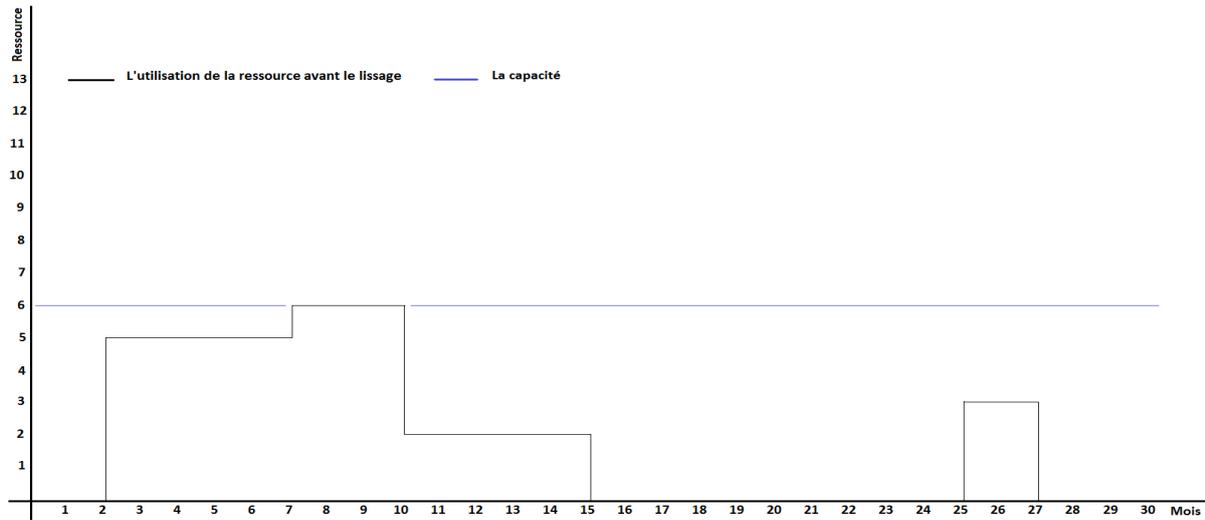


FIGURE 4.9 – Diagramme Coffreur-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Ferrailleur avant le lissage

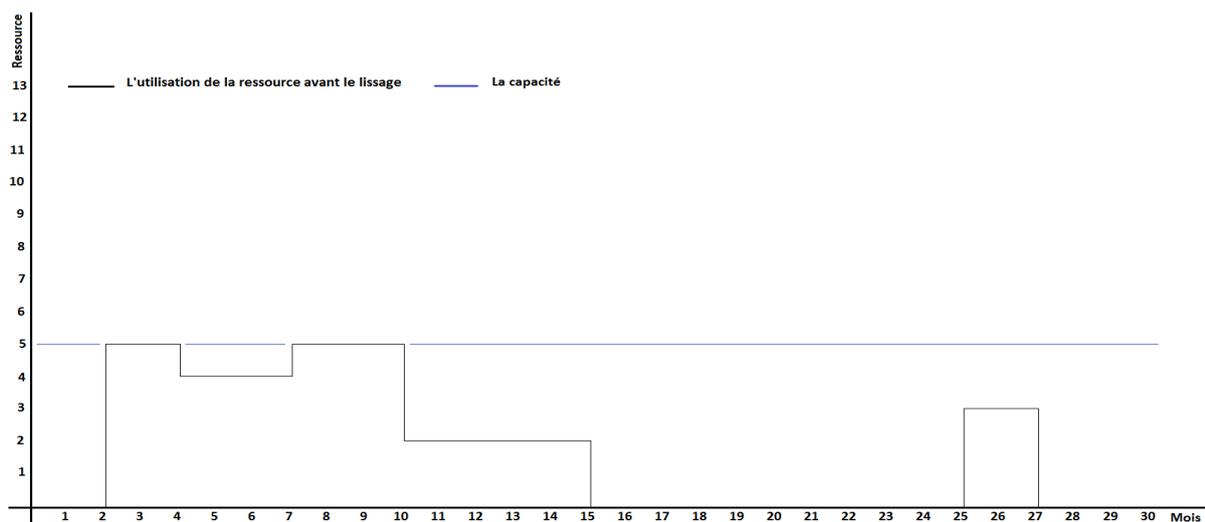


FIGURE 4.10 – Diagramme Ferrailleur-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Peintre avant le lissage

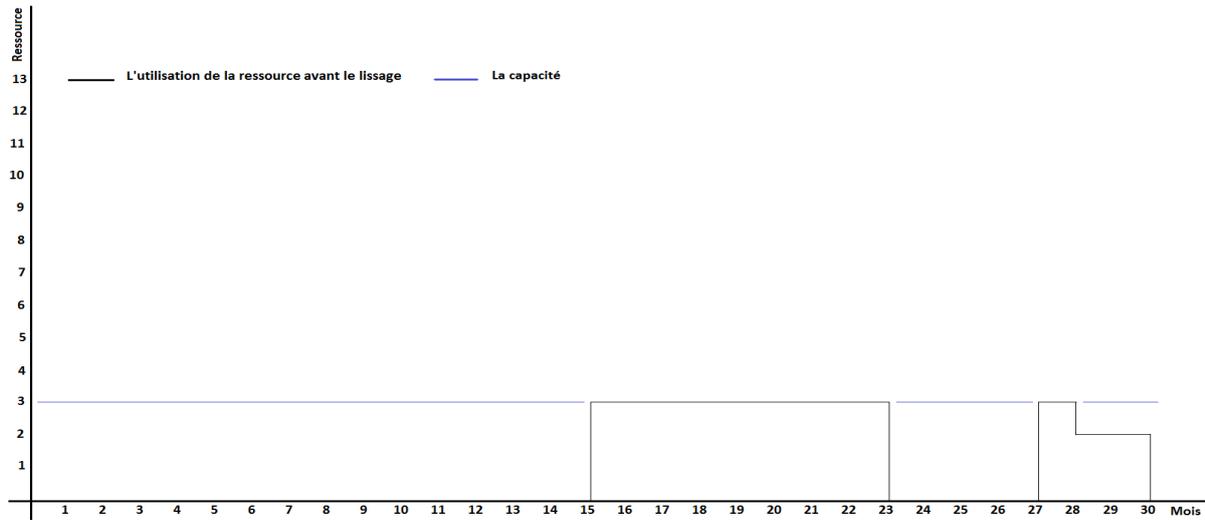


FIGURE 4.11 – Diagramme Peintre-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Plombier avant le lissage

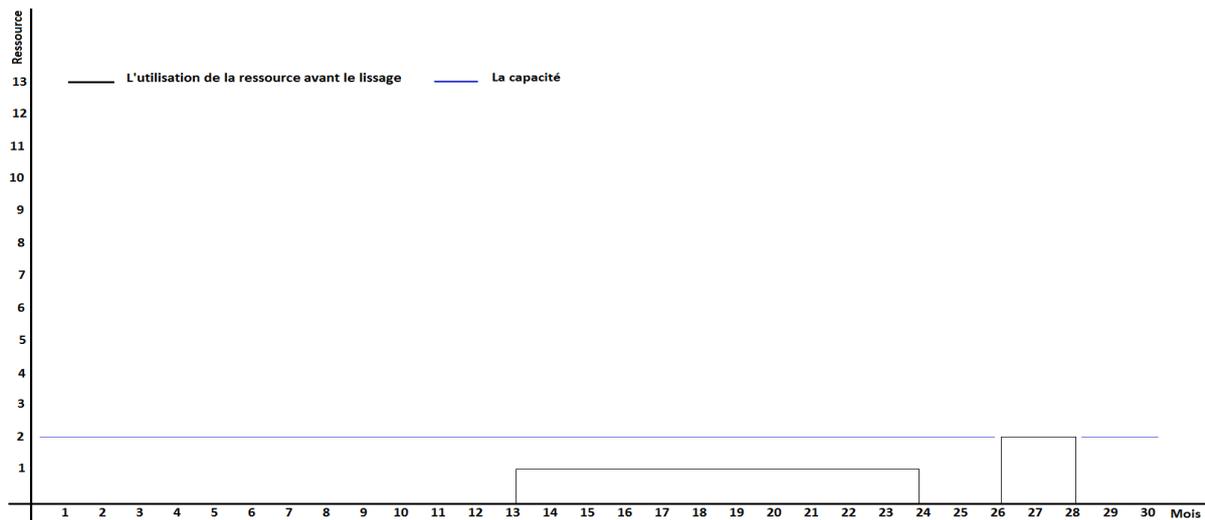


FIGURE 4.12 – Diagramme Plombier-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Electricien bâtiment avant le lissage

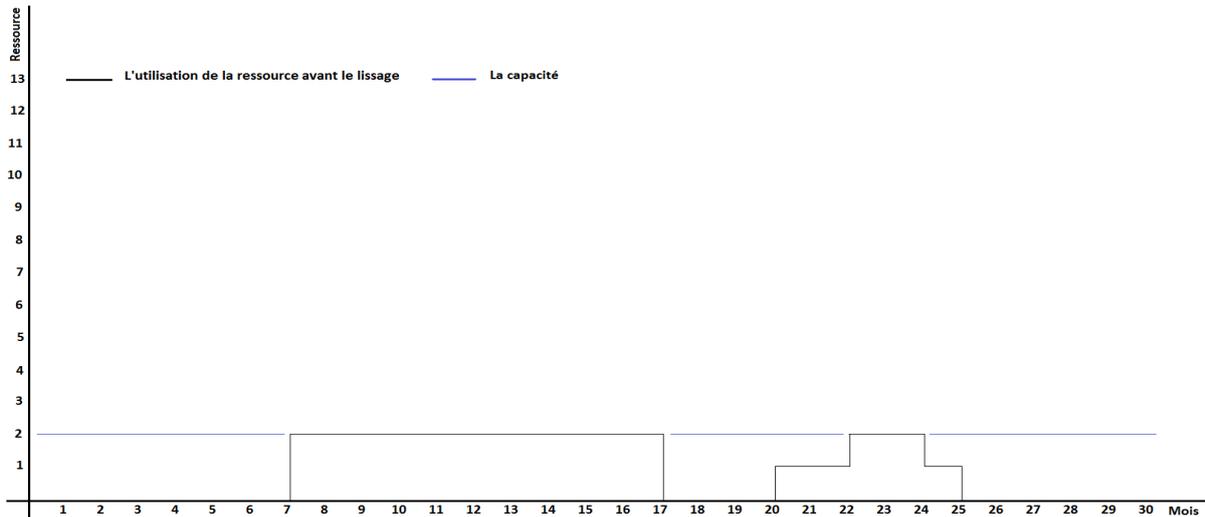


FIGURE 4.13 – Diagramme Electricien bâtiment-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Chauffeur VL/PL avant le lissage

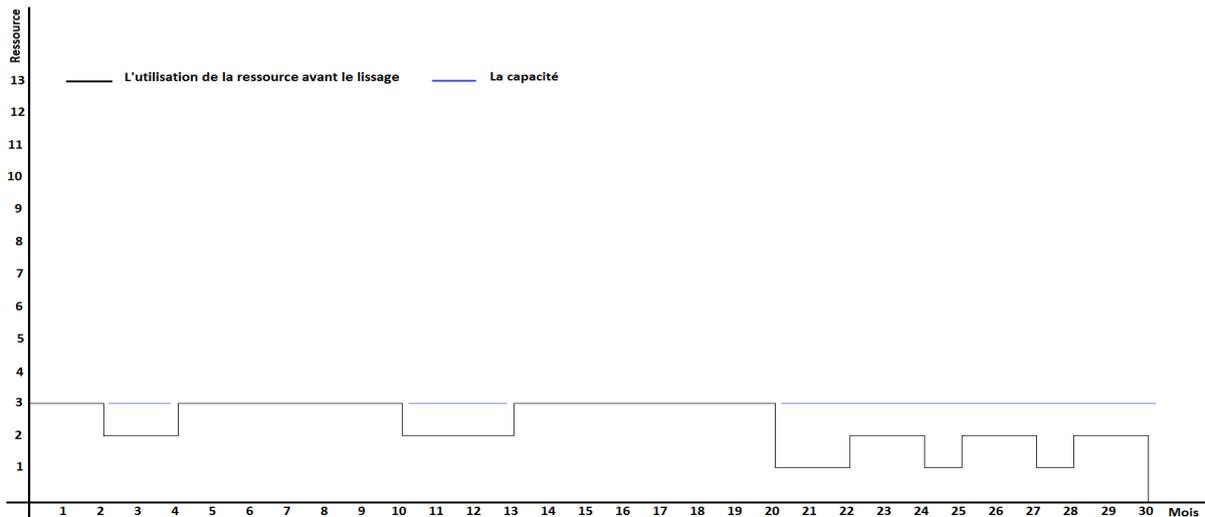


FIGURE 4.14 – Diagramme Chauffeur VL/PL-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Conducteur bétonnière/Dumper avant le lissage

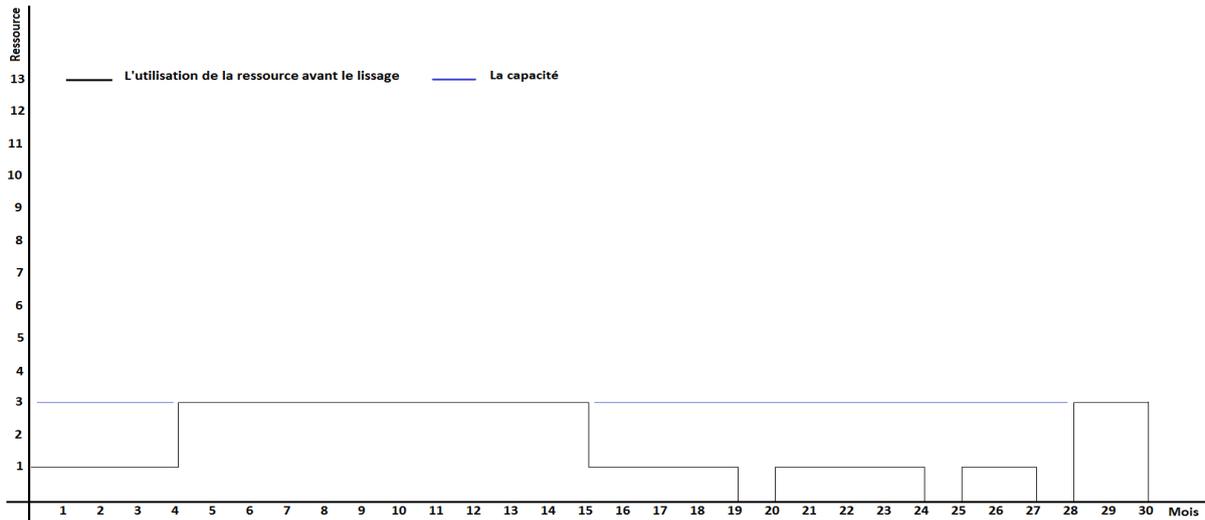


FIGURE 4.15 – Diagramme Conducteur bétonnière/Dumper-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Grutier avant le lissage

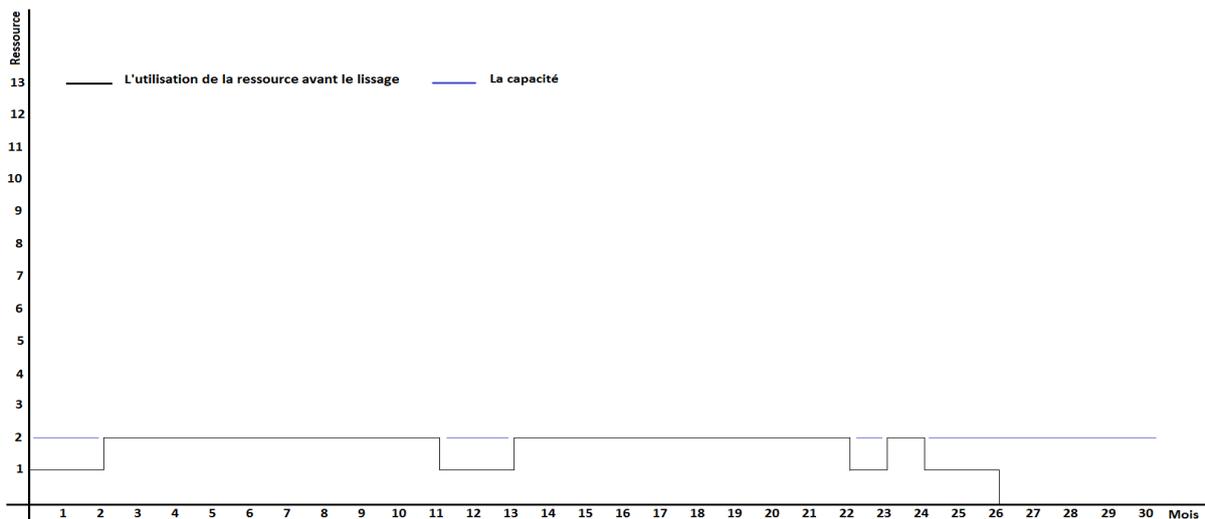


FIGURE 4.16 – Diagramme Grutier-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Camion avant le lissage

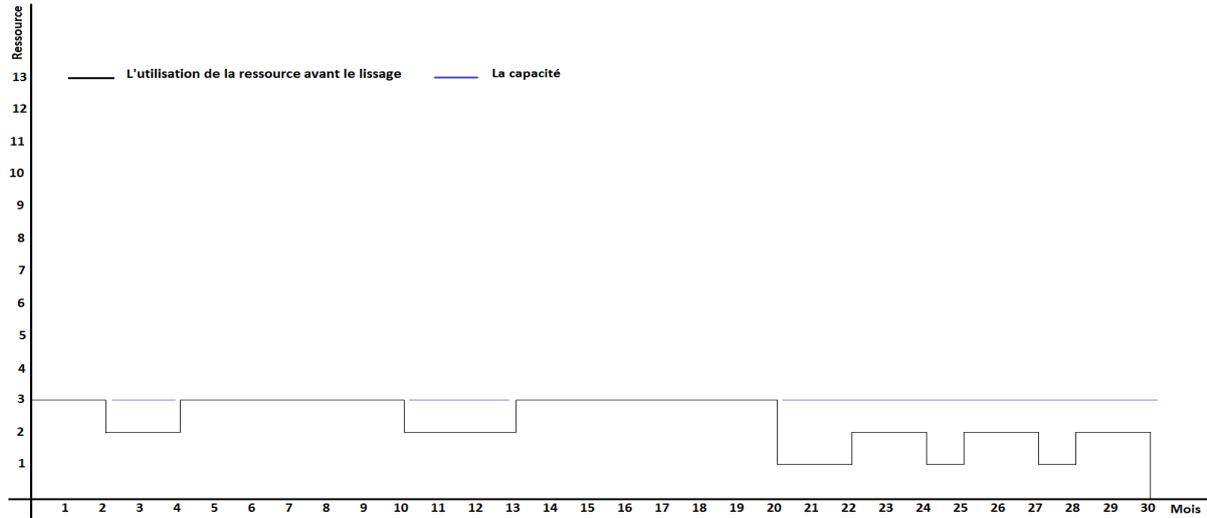


FIGURE 4.17 – Diagramme Camion-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Grue avant le lissage

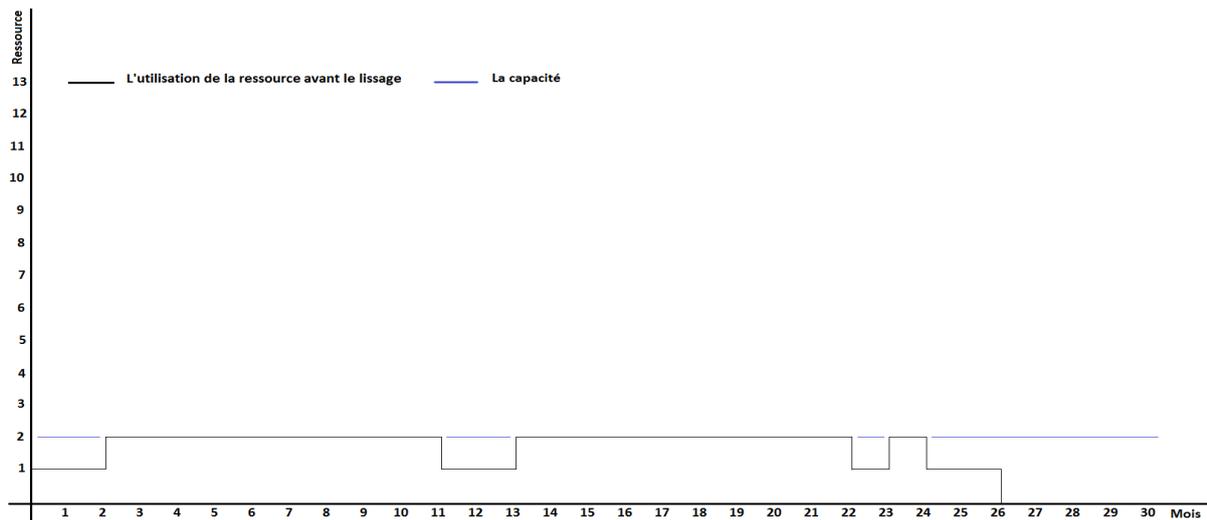


FIGURE 4.18 – Diagramme Grue-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Dumper avant le lissage

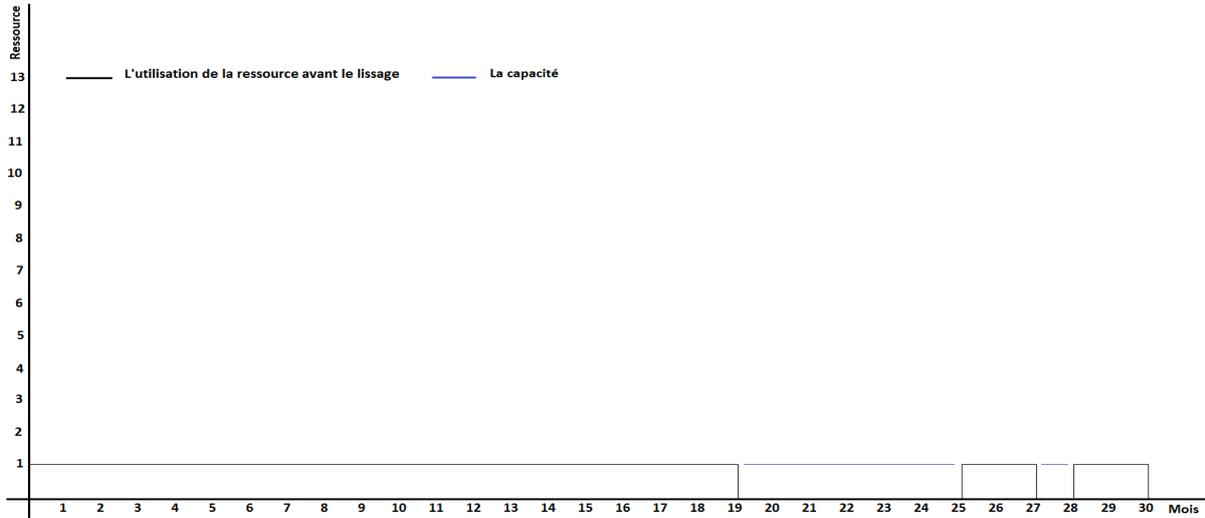


FIGURE 4.19 – Diagramme Dumper-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Bétonnière avant le lissage

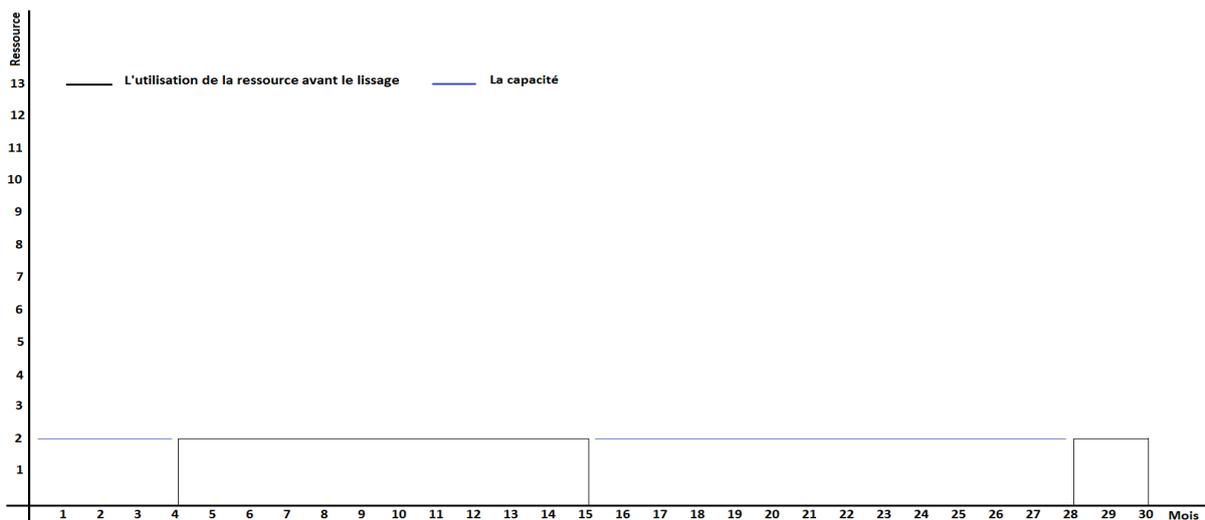


FIGURE 4.20 – Diagramme Bétonnière-temps avant le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Coffreur avant et après le lissage

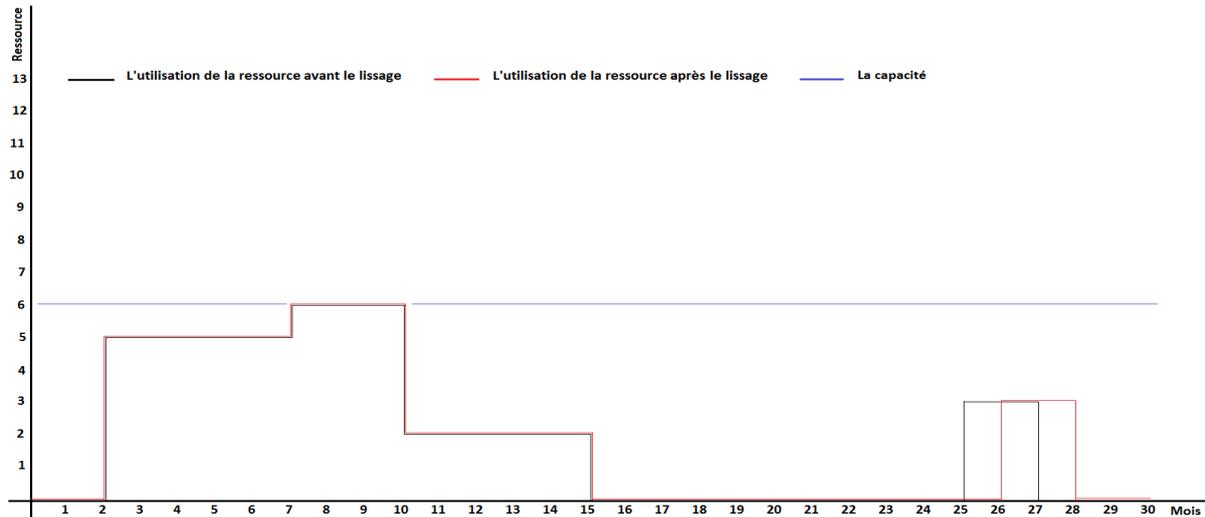


FIGURE 4.21 – Diagramme Coffreur-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Ferrailleur avant et après le lissage

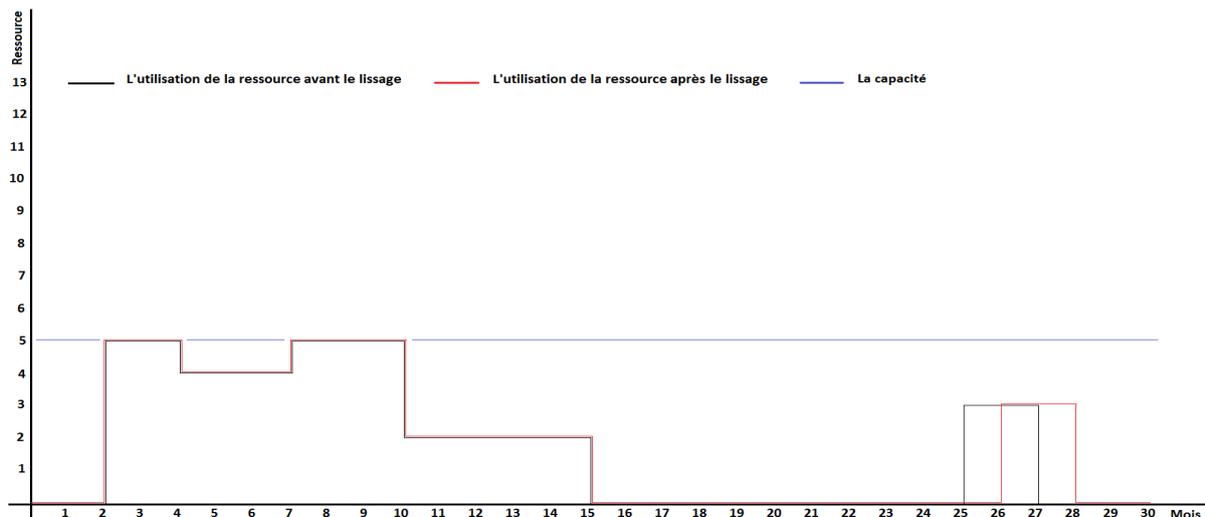


FIGURE 4.22 – Diagramme Ferrailleur-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Peintre avant et après le lissage

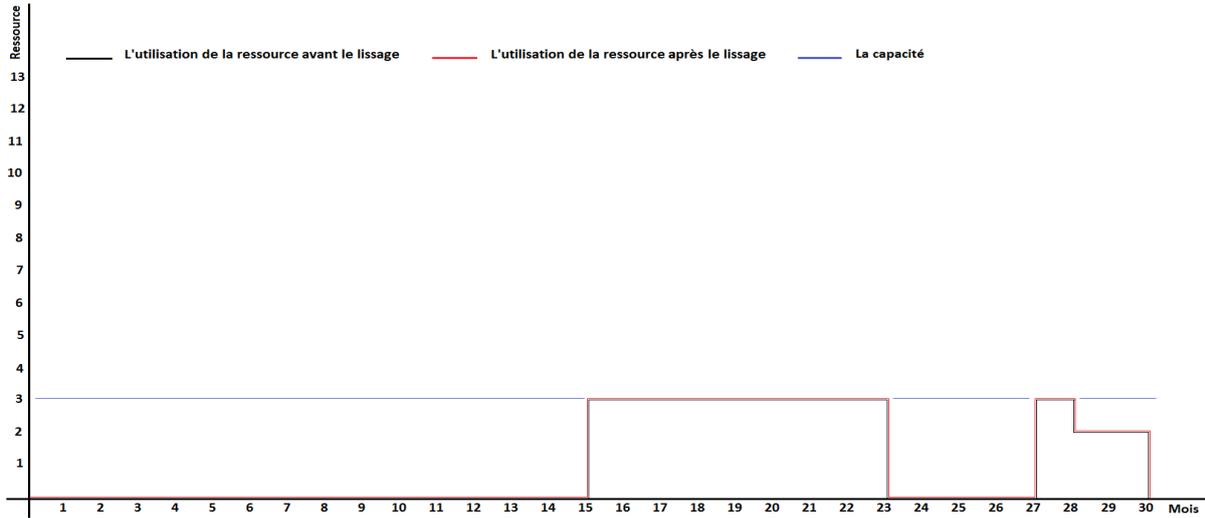


FIGURE 4.23 – Diagramme Peintre-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Plombier avant et après le lissage

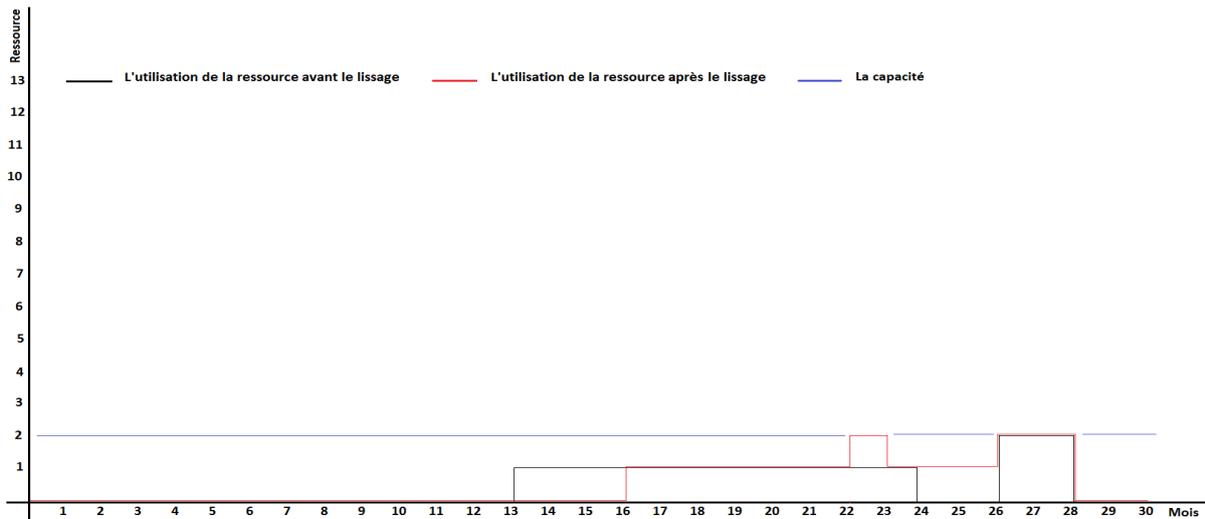


FIGURE 4.24 – Diagramme Plombier-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Electricien bâtiment avant et après le lissage

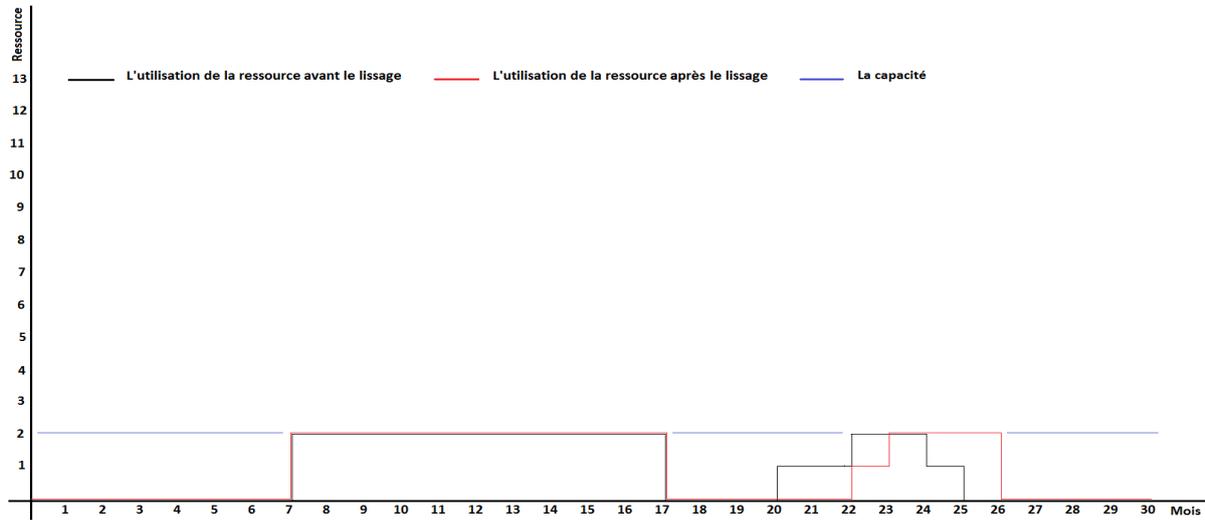


FIGURE 4.25 – Diagramme Electricien bâtiment-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Chauffeur VL/PL avant et après le lissage

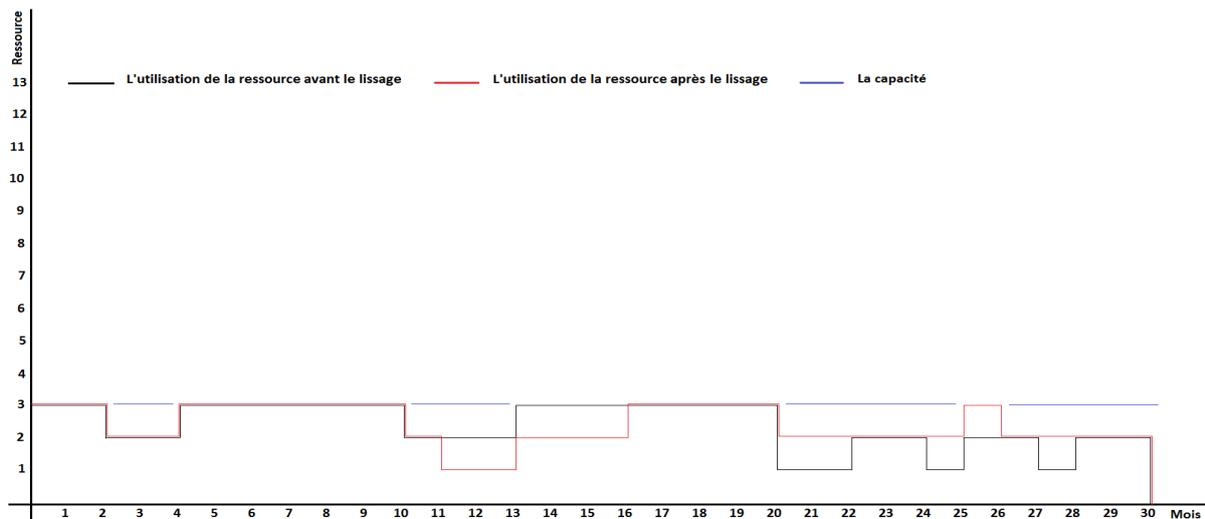


FIGURE 4.26 – Diagramme Chauffeur VL/PL-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Conducteur bétonnière/Dumper avant et après le lissage

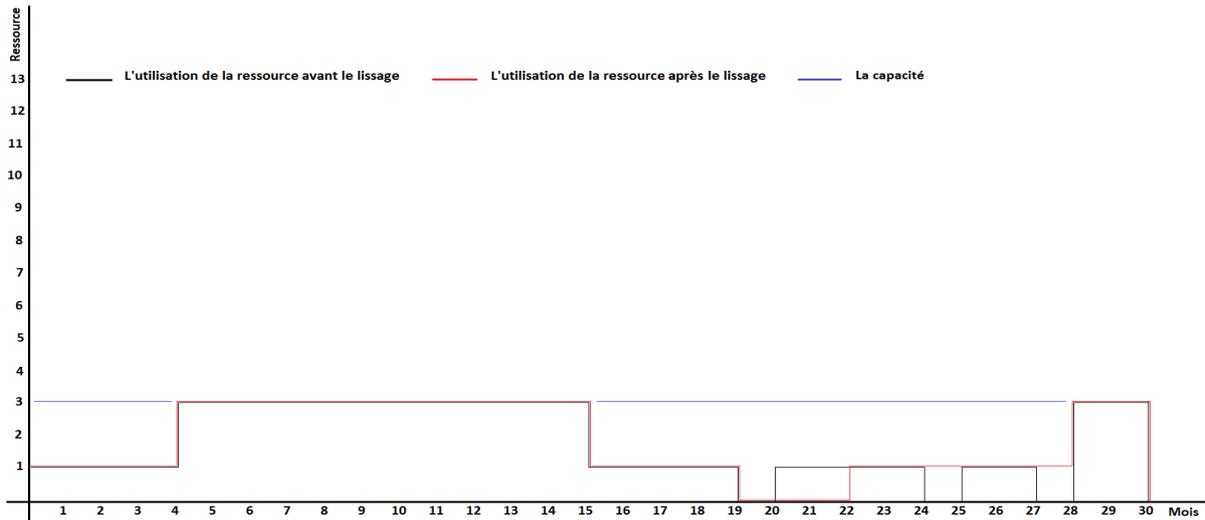


FIGURE 4.27 – Diagramme Conducteur bétonnière/Dumper-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Grutier avant et après le lissage

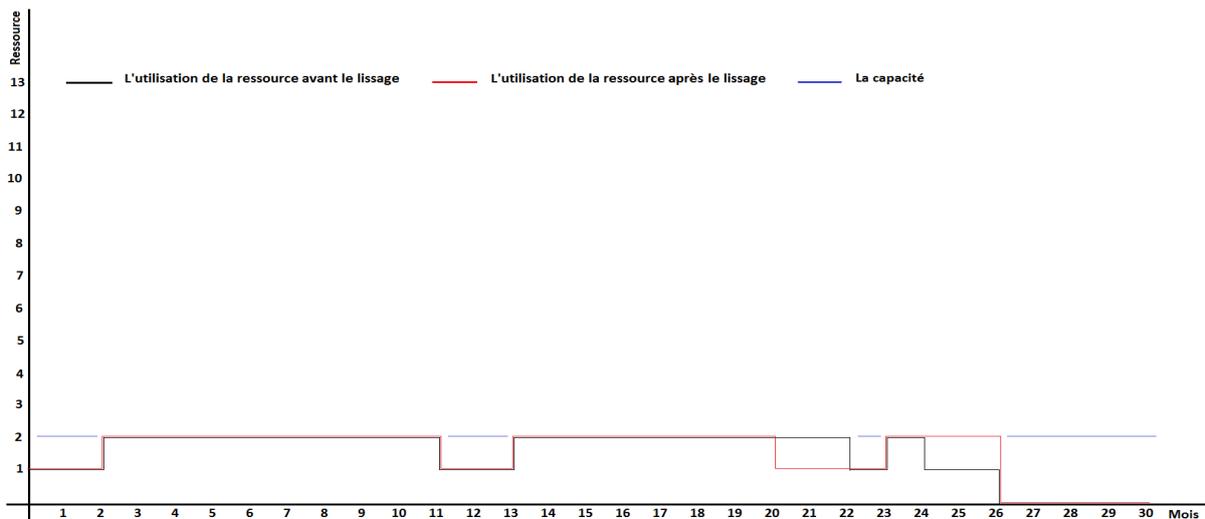


FIGURE 4.28 – Diagramme Grutier-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Camion avant et après le lissage

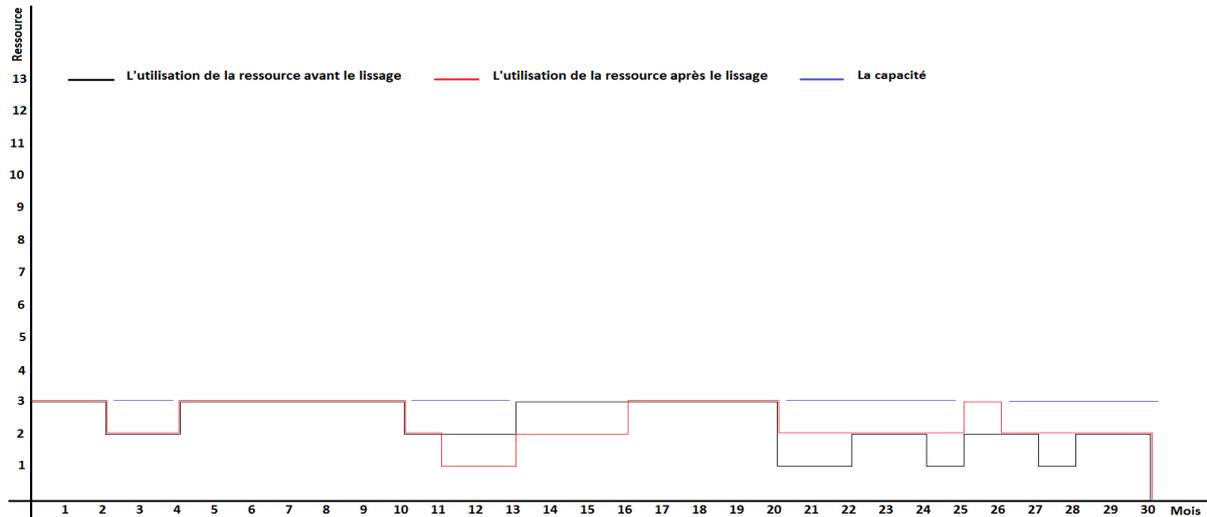


FIGURE 4.29 – Diagramme Camion-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Grue avant et après le lissage

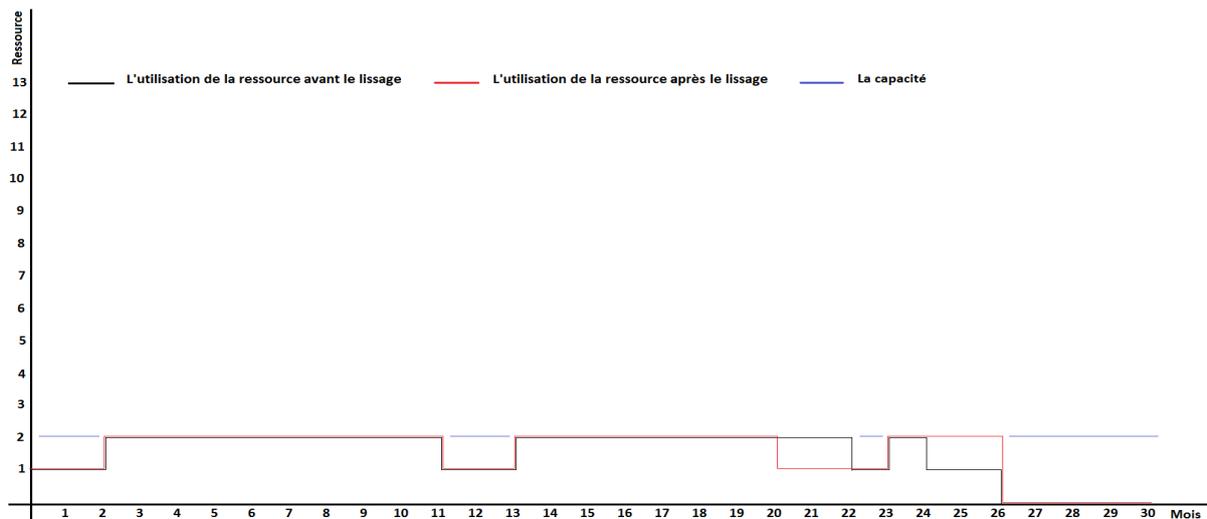


FIGURE 4.30 – Diagramme Grue-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Dumper avant et après le lissage

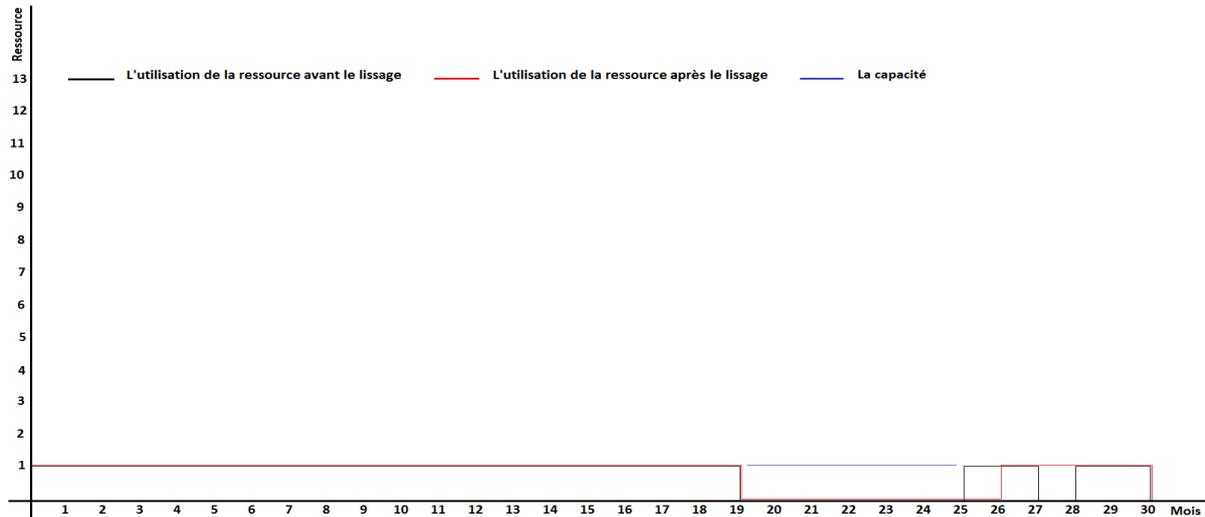


FIGURE 4.31 – Diagramme Dumper-temps avant et après le lissage

## Diagramme d'utilisation de la ressource Bétonnière avant et après le lissage

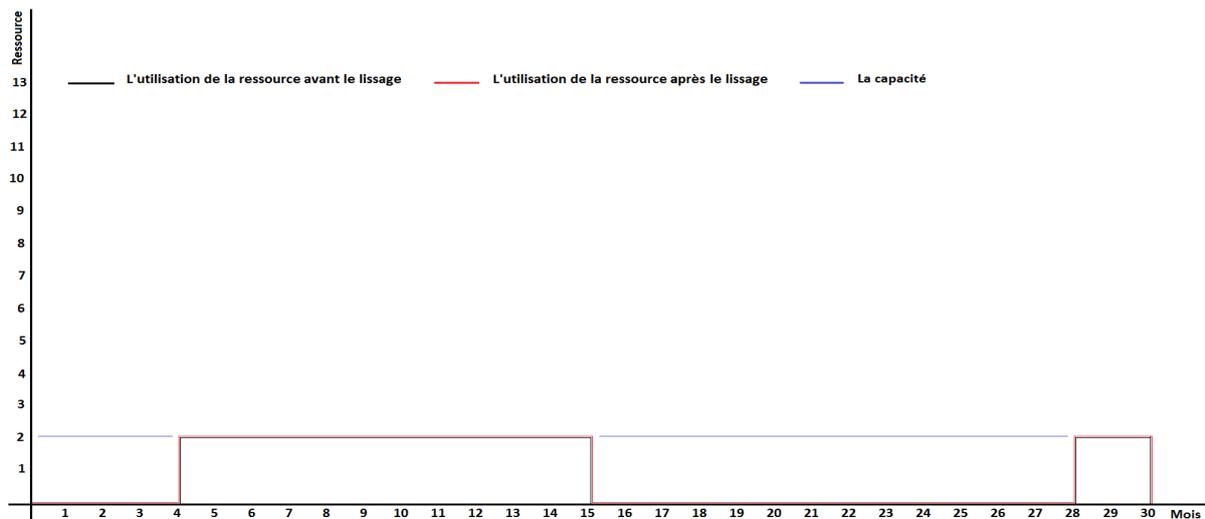


FIGURE 4.32 – Diagramme Bétonnière-temps avant et après le lissage

## Le programme de la méthode P.E.R.T en C++

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<stdlib.h>
#define MAX_INT 10000
typedef struct {int date_plutot, date_plutard, marge, num_tache;}tache;
tache*projet;
int**matrice;
int main()
{
int chemin [100];
int associe[100];
int som_ch=0;
int nbr_tache;
int i,j,k;
int num_succ;
int nbr_succ;
int duree;
int som=0;
int *pile;
printf("\n Donner le nombre des taches: ");
scanf("%d",&nbr_tache);
projet=(tache*)malloc((nbr_tache+2)*sizeof(tache));
if(projet==NULL)
{
printf("\n Impossible d'allouer de l'espace pour projet");
exit(1);
}
else
printf("\n Espace allouer avec succe");
matrice=(int**)malloc((nbr_tache+2)*sizeof(int*));
for(i=0; i<nbr_tache+2; i++)
{
matrice[i]=(int*)malloc((nbr_tache+2)*sizeof(int));
}
for(i=0; i<nbr_tache+2; i++)
for(j=0; j<nbr_tache+2; j++)
```

```
{
matrice[i][j]=-1;
}
matrice[0][1]=0;
pile=(int*)malloc((nbr_tache+2)*sizeof(int));
for(i=1; i < nbr_tache; i++)
{
printf("\n Donner le nombre des secesseurs de %d:",i);
scanf("%d",& nbr_succ);
for(j=0; j<nbr_succ; j++)
{
printf("Donner le numero du succesneur de %d:",j+1);
scanf("%d",& num_succ);
printf("Donner la duree entre %d et %d:",i,num_succ);
scanf("%d",& duree);
matrice[i][num_succ]=duree;
}
}
matrice[nbr_tache][nbr_tache+1]=2;
projet[0].date_plutot=0;
for(j=1; j<nbr_tache+2; j++)
{
projet[j].date_plutot=0;
for(i=0; i<j; i++)
{
if(matrice[i][j]!=-1)
{
projet[j].date_plutot=max(projet[j].date_plutot,projet[i].date_plutot+matrice[i][j]);
}
}
printf("\n date_plutot de %d: %d",j,projet[j].date_plutot);
}
printf("\n Tapper A");
scanf("%d",i);
projet[nbr_tache+1].date_plutard=projet[nbr_tache+1].date_plutot;
for(i=nbr_tache; i>=0; i--)
{
```

```
projet[i].date_plutard=MAX_INT;
for(j=i+1; j<=nbr_tache+1; j++)
{
if(matrice[i][j]!=-1)
projet[i].date_plutard = min(projet[j].date_plutard-matrice[i][j],projet[i].date_plutard);
}
printf("\n date_plutard de %d:%d",i,projet[i].date_plutot);
}
printf("\n Tapper A");
scanf("%d",i);
for(i=0; i<nbr_tache+2; i++)
{
projet[i].marge=projet[i].date_plutard-projet[i].date_plutot;
printf("\n La marge de %d:%d",i,projet[i].marge);
}
printf("\n Tapper A");
scanf("%d",i);
associe[som_ch]=-1;
pile[som]=1;
som++;
som_ch++;
while(som>0)
{
som--;
i=pile[som];
chemin[som_ch]=i;
som_ch++;
for(j=i+1;j<nbr_tache+2;j++)
if(matrice[i][j]!=-1)
if(projet[i].marge==0 && projet[j].marge==0)
{
if(j!=nbr_tache+1)
{
pile[som]=j;
associe[som]=i;
som++;
}
}
```

```
else
printf("\n ==>");
for(k=1;k<som_ch;k++)
printf("%d",chemin[k]);
for(k=0;k<som_ch;k++)
if(som >0 && chemin[k]==associe[som-1])
{
som_ch=k+1; break;
}
}
printf("\n");
return 0;
}
```

## ***Résumé***

L'objectif principal de ce travail est de présenter une méthode pour la résolution du problème d'ordonnancement de projet à ressources limitées avec contrainte de délai (problème de lissage des ressources). Ce problème consiste à planifier dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches régies par des contraintes temporelles et de ressources, où chaque ressource est limitée par une capacité fixe au cours d'un délai fixe.

Une application de la méthode de Burgess-Killebrew a été réalisée sur un projet soumis par la RTC-Sonatrach de Béjaïa, nous a permis de réduire les conflits des charges du travail sans augmenter le délai de réalisation du projet.

**Mots clés:** Ordonnancement, Projet, Gestion de projet, Lissage de ressources.

## ***Abstract***

The aim objective of this work is to present a method for solving the project scheduling with limited resources with delay constraint problem (resource leveling problem). This problem is to plan a set of tasks governed by time and resource constraints, where each resource is limited by a fixed capacity over a fixed period.

An application of the method of Burgess-Killebrew was performed on a draft submitted by the RTC-Sonatrach Béjaïa, has enabled us to reduce the conflict loads of work without increasing the period of the project.

**Key words:** Scheduling, Project, Project management, Resources leveling.