

Ministry of Higher Education and Scientific Research

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar - Annaba University

جامعة باجي مختار - عنابة

Faculty of Technology

كلية التكنولوجيا

Department of Mechanical Engineering

قسم الهندسة الميكانيكية



Domaine : Sciences et Technologie

الميدان: علوم وتكنولوجيا

Spécialité : Ingénierie de la maintenance

الشعبة: هندسة ميكانيكية

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

LA GESTION D'UN ARRET PROGRAMME (CAS D'UNE CHAINE DE PRODUCTION)

Présentée par : Merdaci Nadjib

Encadrant : Khelif Rabia

Jury de soutenance :

Djeddi lamine	MCA	Université Badji Mokhtar- Annaba	Président
Khelif Rabia	PR	Université Badji Mokhtar- Annaba	Encadrant
Kallouche Abdelkader	MCB	Université Badji Mokhtar- Annaba	Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur KHELIF**, mon encadrant, pour son accompagnement tout au long de ce travail. Sa disponibilité, ses conseils avisés et son exigence scientifique ont été d'un grand soutien et ont largement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Je remercie également les **membres du jury** pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Leur regard critique et leurs remarques constructives sont précieux pour mon parcours académique.

Mes **remerciements les plus sincères vont également à ma famille**, son soutien moral inconditionnel, et ses encouragements constants durant toutes les étapes de mes études. Sans leur présence et leur confiance, ce mémoire n'aurait pas vu le jour.

Table des matières

Introduction	2
Chapitre 1	2
I.1 Historique du complexe sidérurgique EL-HADJAR	3
I.1.1 Laminage à chaud	6
I.2 Présentation de l'unité LAC et de son processus de production	6
I.2.1 Les fours	7
I.2.2 Brise à oxydes	7
I.2.3 Laveuse	8
I.2.4 QUARTO	8
I.2.5 Finisseuses	9
I.2.6 Bobineuses	10
Chapitre 2	11
II.1 Définitions et concepts clés	12
II.1.1 L'arrêt programmé : une nécessité stratégique	12
II.1.2 Cycle de vie des équipements et arrêts programmés	12
II.1.3 Objectifs des arrêts programmés	12
II.1.4 Types d'arrêts programmés	13
II.2 Composantes de la gestion d'un arrêt programmé	14
1. Préparation	15
2. Planification	15
3. Exécution	15
II.3 Criticité des équipements	15
II.4 Gestion des risques	15
II.5 Outils et méthodologies de gestion de projet	16
II.6 Digitalisation des arrêts programmés	16
II.7 Enjeux économiques et opérationnels	17
II.7.1 Coûts associés aux arrêts programmés	17
II.7.2 Risques liés à la durée d'immobilisation	17
II.7.3 Gestion des parties prenantes	17
II.7.3 Enjeux environnementaux	18
Conclusion	18
Chapitre 3	19

III.1 Description des travaux à réaliser.....	20
Introduction	21
III.1.1 Contexte de l'arrêt programmé	21
III.1.2 Causes fondamentales des défaillances du banc alimentateur	21
III.1.3 Liste des tâches	21
III.1.4 Description des phases	27
III.1.5 Ressources et moyens	28
Conclusion	28
III.2 Planification de l'arrêt programmé	29
Introduction	30
III.2.1 Le diagramme PERT : (versions temps normal et temps aléatoire)	30
III.2.2 Le PERT Coût :	32
III.2.3 Le PERT Charge :	32
1.1 Construction du réseau PERT (Temps normal)	34
1.2. Le PERT Temps aléatoire (Approche probabiliste)	52
1.3. Diagramme de Gantt	63
1.4 Optimisation des coûts (PERT Coût)	65
1.5 Gestion des ressources (PERT Charge)	71
Conclusion générale	74
Conclusion	75

Liste des figures

Figure 1.1 : Historique du complexe sidérurgique SIDER EL HADJAR	4
Figure 1.2 : Organisme de la production de SIDER	5
Figure 1.3 : Train de laminage sur l'écran de supervision existant.	7
Figure 1.4 : Un four de réchauffage des brames.	7
Figure 1.5 : Une brise à oxydes.	8
Figure 1.6 : Les Cylindres QUARTO	9
Figure 1.7 : Les finisseuses.	9
Figure 1.8 La bobineuse et le produit finale.	10
Figure 3.1 : Exemple de diagramme PERT	30

Figure 3.2 : Exemple de diagramme de Gantt	31
Figure 3.3 : Type de diagramme de Gantt	32
Figure 3.4 : Représentation graphique des marges temporelles et des dates clés d'une tâche dans un planning.....	35
Figure 3.5 : LE RESEAU PERT TEMPS NORMAL	44-50
Figure 3.6 : LE RESEAU PERT TEMP ALEATOIR	57-63
Figure 3.7 DIAGRAMM DE GANTT	64
Figure 3.8 : Le nivellement des ressources	73-74
Liste des tableaux	
Tableau 1.1 : Liste des produits de SIDER	6
Tableau 3.1. Extrait des tâches pour le changement du banc alimentateur	21
Tableau 3.2 : Analyse quantitative	36
Tableau 3.3 : Estimation des durées des taches	52
Tableau 3.4 : cout accéléré et cout normal	65
Tableau 3.5 : annulation des marge libres	68
Tableau 3.5 : annulation des marge Totales	69

Introduction

Dans un monde industriel marqué par la mondialisation et l'exigence de rentabilité, les entreprises manufacturières sont confrontées à un impératif de maximiser la disponibilité des équipements tout en réduisant les coûts d'exploitation.

Les arrêts programmés, bien que nécessaires pour assurer la maintenance préventive, les réparations ou les mises à niveau technologiques, représentent un paradoxe. D'un côté, ils garantissent la pérennité des installations ; de l'autre, ils génèrent des pertes financières directes (coûts de maintenance, immobilisation des ressources) et indirectes (manque à produire, retard de livraison).

Malgré leur importance, les arrêts programmés restent souvent mal maîtrisés en raison :

- D'une planification inadéquate (sous-estimation des durées, méconnaissance des interdépendances entre tâches).
- D'une coordination défailante entre les services (maintenance, production, logistique).
- D'une absence de méthodologies standardisées pour anticiper les risques (retard, dépassements budgétaires).

En Algérie, où le secteur industriel est en pleine mutation, la gestion optimisée de ces arrêts devient un enjeu stratégique. Selon une étude de l'Agence Nationale de Développement Industriel (ANDI, 2022), près de 30 % des défaillances d'équipements dans les usines locales sont liées à une planification inadéquate des arrêts techniques. Cette réalité soulève une question importante :

Comment structurer une démarche de gestion des arrêts programme pour concilier efficacité technique, maîtrise des coûts et respect des délais, tout en garantissant la sécurité des interventions ?

Dans ce travail, nous tenterons de développer le PERT temps (normal et aléatoire), le PERT coût et le PERT Charge.

Chapitre 1

Présentation de l'entreprise d'accueil

I.1 Historique du complexe sidérurgique EL-HADJAR

Le complexe sidérurgique El-Hadjar est un organisme industriel situé dans la ville d'Annaba, dans le nord-est de l'Algérie. Il a été construit dans les années 1970 et est aujourd'hui exploité par le groupe industriel public SIDER. Le complexe est l'une des plus grandes installations sidérurgiques d'Afrique et il produit une grande variété de produits en acier, notamment des produits longs tels que des barres d'armature et des produits plats tels que des tôles et des bobines [1].

- L'entreprise nationale de sidérurgie a été créée par la société française SBS en 1959 suite à la mise en application du plan de Constantine [1].
- Après l'indépendance celle-ci devient (SNS) et ceci dans le cadre de la récupération des richesses du pays [1].
- Le SNS a bénéficié des différents plans de développement pour s'étendre aux fils des nécessités et devient enfin « entreprise nationale de sidérurgie » suite à la restructuration des sociétés nationales [1].
- L'ensemble a développé en 1969 un point sidérurgique à El-Hadjar pouvant répondre à une gamme de produits très variés et enfin devenir « SIDER » [1].
- Après la durée de l'implantation de la sidérurgie en Algérie, le complexe entre dans une phase finale, l'extension de la capacité de production de 400.000 tonnes à 200.000 T/A [1].
- Pour la deuxième phase de 1977 à 1980 c'est l'extension du complexe pour augmenter les capacités de production, celle-ci permet la création d'autres secteurs :
 - Une autre aciérie à oxygène « AC02 ».
 - Un autre haut fourneau « HF2 ».
 - Un secteur d'agglomération « PMA ».
 - Cokerie.
 - Centrale thermique.
- L'année 1980 marque dans l'histoire du complexe de grandes réalisations après la création de SNS dans l'Algérie indépendante, il a eu une réception complète de configuration de l'usine pour en faire un complexe intégré [1].
- L'effectif de cette société est plus de 18000 employés, qui sont répartis sur des sous-directions opérationnelles de production et de présentation des services et direction fonctionnelle centrales [1].

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE D'ACCUEIL

- Après la compression du personnel en octobre 1997 ou plus de 10000 travailleurs ont quittés SIDER, l'entreprise supprime et se divise en 24 filiales à la fin de 1998, cette application prend effet à partir de janvier 1999 [1].
- Le 18.10.2001 : Un contrat de partenariat entre SIDER et LNM donne naissance à ISPAT Annaba. LNM détient 70% du capital social et SIDER 30%. Cette nouvelle société regroupe les filiales de SIDER liées au métier de base de la sidérurgie qui sont : Alfasid, Almain, Gessit, Iman, Amm, Comersid, Alfatub, Cryosid, Coprosid et Fersid. ISPAT Tébessa est créé à la même période. Elle est le résultat d'un partenariat entre LNM (70%) et FERPHOS (30%). Elle comprend les mines de fer d'Ouenza et de BOUKHADRA.
- Décembre 2004 Mittal Steel Annaba : La société change de dénomination après la fusion de LNM holding et ISPAT International.
- Juin 2007, ArcelorMittal Annaba : Résultat de la fusion entre Mittal Steel et Arcelor.
- Octobre 2013, ArcelorMittal Algérie : La société change de dénomination après la signature d'un accord stratégique entre ArcelorMittal et Sider par lequel, la participation d'ArcelorMittal dans le capital de la société passe à 49% et celle de Sider à 51%.
- Août 2016, SIDER EL HADJAR : La société devient Algérienne à 100% suite à la signature de l'accord de transfert de la totalité des actions détenues auparavant par le groupe ArcelorMittal vers le groupe public IMETAL [1].



Figure 1.1 : Historique du complexe sidérurgique SIDER EL HADJAR.

Le complexe sidérurgique Arcelor Mittal Steel est situé dans la zone industrielle d'Annaba et à 15 km au sud de la ville. Il occupe une superficie de 800 hectares dont :

- ✓ 300 hectares pour les ateliers de production.
- ✓ 300 hectares pour le stockage.

✓ 200 hectares de service.

A l'intérieur, il y a près de 16 km de voie ferrée permettant la libre circulation des matières premières et près de 16 km de voie permettant la circulation des engins (auto bus, camions, véhicules légers ...).

L'organigramme suivant illustre les différentes unités du complexe sidérurgique EL HADJAR.

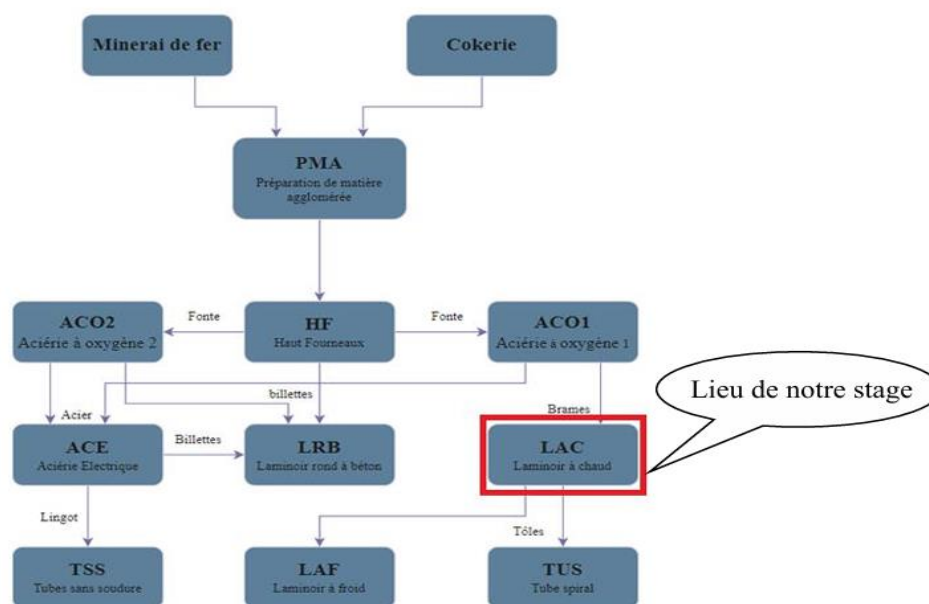


Figure 1.2 : Organisme de la production de SIDER.

Les différents produits extraits du minerai de fer issu de chaque unité du complexe sont décrits dans le tableau 1.

Tableau 1.1 : Liste des produits de SIDER

Installation	Produits	Principaux utilisateurs
Cokerie	Coke	Métallurgie
HF 1 et HF 2	Fonte	Métallurgie
ACO 1	Brames	Industrie de transformation
ACO 2	Billettes	Industrie de transformation
Laminoir à chaud (LAC)	Tôles fortes	Construction métallique chantiers navals tube bouteille à gaz
Laminoir à froid (LAF)	Tôles fines	Electroménager mobilier métallique industrie de transformation
Etamage	Fer blanc	Emballage métallique divers pour les industries alimentaires et chimiques
Galvanisation	Tôles galvanisées	Bâtiments pour l'agronomie Industrie et élevage
Aciérie électrique (ACE)	Lingots	Recherche et production pétrolière transport des Hydrocarbures
	Billettes	Industrie de transformation
Laminoir à fil rond (LRB)	Fil rond à béton	Bâtiment et travaux publics Hydraulique

I.1.1 Laminage à chaud

Le laminage à chaud est un processus de fabrication qui consiste à faire passer un matériau, généralement du métal, entre deux rouleaux chauffés à haute température pour le transformer en une forme plus fine et plus plate. Les rouleaux exercent une pression sur le matériau, le comprimant et le déformant progressivement jusqu'à atteindre l'épaisseur et la forme souhaitées. Les métaux couramment laminés à chaud comprennent l'acier, l'aluminium, le cuivre et le zinc. Le processus de laminage à chaud a de nombreux avantages, notamment la possibilité de produire des feuilles et des plaques de grande taille, une amélioration des propriétés mécaniques du matériau et une meilleure résistance à la corrosion. Cependant, le processus est également associé à des coûts élevés en raison de la consommation d'énergie nécessaire pour chauffer les rouleaux et les matières premières.

I.2 Présentation de l'unité LAC et de son processus de production

L'écran de supervision déjà existant et qui date de plus de 20 ans, est peu ergonomique, il affiche tout le procès sur le train de production sans aucun détail.

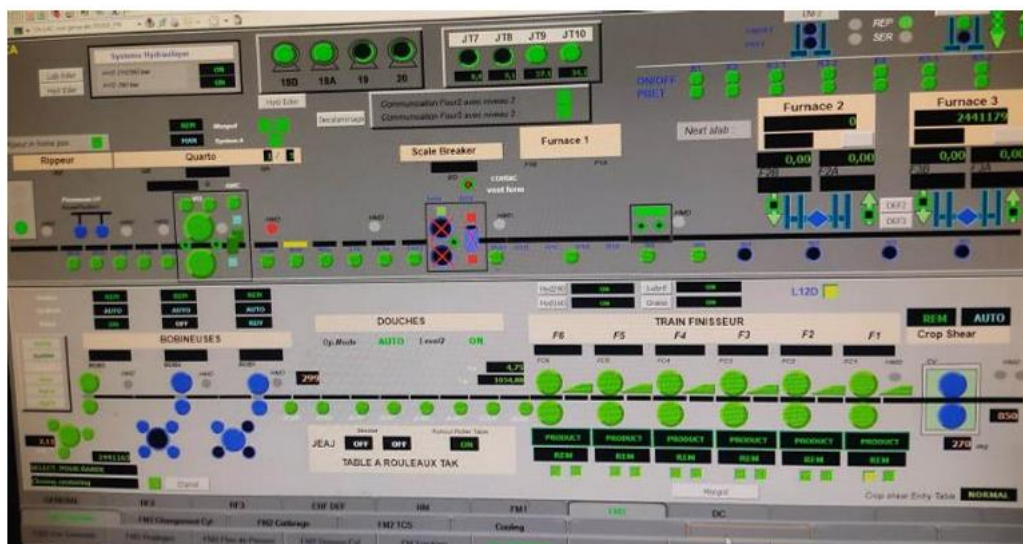


Figure 1.3 : Train de laminage sur l'écran de supervision existant.

I.2.1 Les fours

Il y a trois fours, dont deux sont en fonctionnement et un est éteint. Leur objectif est d'améliorer la malléabilité du métal, ce qui permet de réduire l'effort nécessaire pour le laminage et d'obtenir une meilleure réduction de l'épaisseur et de la largeur du métal.



Figure 1.4 : Un four de réchauffage des brames.

I.2.2 Brise à oxydes

Cette cage universelle est équipée de deux cylindres verticaux (BOV) et deux cylindres horizontaux (BOH) et est utilisée pour enlever la calamine qui recouvre la brame après qu'elle soit sortie du four. En outre, elle permet de légèrement réduire l'épaisseur et la largeur de la brame. Une fois ce processus est terminé, la brame est nettoyée à l'aide d'un jet d'eau sous

pression de 140 bars et les cylindres eux-mêmes sont refroidis avec une pression d'eau de 18 bars.



Figure 1.5 : Une brise à oxydes.

I.2.3 Laveuse

Le processus de nettoyage et de préparation de la brame en acier commence par un lavage à haute pression avec de l'eau chaude à l'aide d'une machine à laver. Ensuite, la brame est dirigée vers un équipement appelé "brise-oxyde" équipé d'une décalamineuse à eau sous pression de 140 bars, qui a pour fonction de désoxyder la surface de la brame et de la dégraisser en réduisant son épaisseur et sa largeur.

I.2.4 QUARTO

Le quarto en encore le dégrossisseur est le cœur du LAC, il est susceptible de laminier des brames et des lingots méplats jusqu'à 20 tonnes ayant des dimensions appropriées (9 à 12 m de longueur, 3 m de largeur et 20 cm épaisseur). Une fois qu'un certain nombre (maximum 7 passes) de passes (en avant et en arrière) ont été effectuées, le produit est ensuite dirigé vers une destination spécifique, en fonction de sa forme :

- Si le produit est sous forme de tôle, il est envoyé vers une machine appelée "planeuse à rouleaux" pour être aplanie avant d'être finalement refroidi.
- Si le produit est sous forme de bande, il est dirigé vers une "cisaille volante" pour couper les extrémités avant et arrière.

Le QUARTO est caractérisé par des cylindres de travail sur les cylindres d'appui entraîné par plusieurs machines électriques parmi lesquelles on trouve le groupe ILGNER (GI) .



Figure 1.6 : Les Cylindres QUARTO

I.2.5 Finisseuses

Le processus de transformation de la brame en bande se poursuit avec l'utilisation de six cages appelées "finisseuses". Leur rôle est de finaliser le travail effectué par la cage dégraisseuse "QUARTO" en transformant la brame en une bande d'épaisseur conforme aux exigences du client. Après avoir été refroidi sous des rampes de "douches" d'eau, le produit est ensuite enroulé sur l'une des trois "bobineuses".



Figure 1.7 : Les finisseuses.

I.2.6 Bobineuses

Il y a trois bobineuses utilisées dans le processus de fabrication :

- Les deux premières bobineuses sont équipées d'un rouleau entraîneur ou pinceur, de quatre rouleaux presseurs et d'un mandrin à expansion.
- La troisième bobineuse est équipée d'un rouleau entraîneur ou pinceur, de trois rouleaux presseurs et d'un mandrin à expansion.

Une fois que les bandes ont été transformées en bobines, elles sont déposées sur un convoyeur à bobines qui transporte les bobines de la zone de déchargement des trois bobineuses vers le dépôt de stockage des bobines. Il est important que ces bobines soient transportées dans des conditions optimales pour éviter toute déformation structurelle. Le convoyeur est composé de plusieurs parties, y compris un convoyeur rapide, un convoyeur lent, un convoyeur descendant et un convoyeur ascendant. Des dispositifs de transfert sont également utilisés pour déplacer les bobines entre les différents convoyeurs.



Figure 1.8 La bobineuse et le produit finale.

Chapitre 2

Notions de base de la gestion d'un arrêt programmé

1. Chapitre 1 : Notions de base de la gestion d'un arrêt programmé

II.1 Définitions et concepts clés

II.1.1 L'arrêt programmé : une nécessité stratégique

Un arrêt programmé désigne une interruption planifiée et contrôlée des activités d'une chaîne de production ou d'une installation industrielle, visant à effectuer des opérations de maintenance, d'inspection, de réparation ou de modernisation [1].

Cette démarche proactive s'inscrit dans une stratégie de gestion des actifs industriels, où la fiabilité, la sécurité et la durabilité des équipements sont prioritaires. Contrairement aux arrêts non planifiés causés par des pannes, les arrêts programmés permettent de minimiser les risques d'incidents graves, d'optimiser les performances opérationnelles et de se conformer aux réglementations en matière de sécurité, de qualité et d'environnement. Ils constituent un levier stratégique pour les entreprises cherchant à concilier productivité et maîtrise des coûts dans un contexte industriel compétitif marqué par la mondialisation.

II.1.2 Cycle de vie des équipements et arrêts programmés

Les arrêts programmés s'intègrent dans la gestion du cycle de vie des équipements industriels, qui comprend les phases de conception, d'installation, d'exploitation, de maintenance et de démantèlement [2]. Les interventions planifiées contribuent à prolonger la durée de vie des actifs en prévenant l'usure prématurée, en maintenant les performances à un niveau optimal et en évitant les coûts élevés des remplacements imprévus. Cette approche est cruciale pour les équipements stratégiques, dont la défaillance peut paralyser la production ou compromettre la sécurité des opérations.

II.1.3 Objectifs des arrêts programmés

Les arrêts programmés répondent à plusieurs objectifs stratégiques, alignés sur les priorités des entreprises industrielles :

- **Prévention des défaillances** : Identifier et corriger les anomalies avant qu'elles ne provoquent des pannes coûteuses.
- **Amélioration des performances** : Intégrer des mises à jour technologiques ou optimiser les processus pour augmenter l'efficacité.
- **Conformité réglementaire** : Respecter les normes de sécurité (ex. : OSHA), de qualité (ISO 9001) et d'environnement (ISO 14001).
- **Réduction des coûts à long terme** : Minimiser les dépenses liées aux réparations d'urgence et aux arrêts imprévus.
- **Sécurisation des opérations** : Éliminer les risques liés à des équipements défectueux pour protéger les opérateurs et les installations.
- **Adaptation aux évolutions du marché** : Permettre l'intégration de nouvelles technologies ou l'ajustement des capacités de production face aux fluctuations de la demande.

II.1.4 Types d'arrêts programmés

Les arrêts programmés se déclinent en plusieurs catégories selon leur finalité, leur ampleur et leur contexte :

- **Arrêt de maintenance préventive** : Planifié selon un calendrier fixe (systématique) ou en fonction de l'usure (conditionnelle), il vise à prévenir les défaillances par des inspections et des entretiens réguliers.
- **Arrêt de maintenance corrective planifiée** : Ciblé sur la réparation ou le remplacement de composants défaillants identifiés avant une panne.
- **Grand arrêt (shutdown)** : Arrêt complet d'une usine pour des interventions majeures, comme des inspections générales ou le remplacement d'équipements stratégiques.
- **Arrêt opportuniste** : Réalisé lors d'une baisse temporaire de l'activité, permettant d'effectuer des travaux prévus sans perturber la production.

- **Arrêt de mise à niveau technologique** : Consacré à l'installation de nouvelles technologies, comme l'automatisation ou l'Internet des objets (IoT).
- **Arrêt réglementaire** : Imposé par les autorités pour vérifier la conformité aux normes de sécurité ou d'environnement (ex. : inspection des cuves sous pression).
- **Arrêt de reconfiguration** : Modifie la configuration de la chaîne de production pour répondre à de nouveaux besoins (ex. : changement de produit fabriqué).

1.1.1 Maintenance basée sur la fiabilité (RCM)

La gestion des arrêts programmés s'appuie souvent sur la Reliability-Centered Maintenance (RCM), une méthodologie qui priorise les interventions en fonction de la criticité des équipements et de leur impact sur la production [3].

La RCM analyse les modes de défaillance potentiels, évalue leurs conséquences et définit des stratégies de maintenance (préventive, prédictive ou corrective) pour maximiser la disponibilité tout en minimisant les coûts.

Cette approche est particulièrement adaptée aux arrêts programmés, car elle optimise le choix des tâches et réduit les interventions inutiles.

1.1.2 Maintenance prédictive

La maintenance prédictive utilise des technologies avancées, telles que les capteurs IoT, l'analyse de données et l'intelligence artificielle, pour surveiller l'état des équipements en temps réel et prévoir les défaillances avant qu'elles ne surviennent [1]. En intégrant la maintenance prédictive dans les arrêts programmés, les entreprises peuvent planifier des interventions ciblées, réduire les temps d'arrêt et optimiser l'utilisation des ressources. Par exemple, l'analyse des vibrations ou des températures peut indiquer le moment optimal pour remplacer un composant.

II.2 Composantes de la gestion d'un arrêt programmé

La gestion efficace d'un arrêt programmé repose sur cinq piliers fondamentaux [4] :

1. Préparation

Analyse des besoins (diagnostics, historique des équipements) pour identifier les tâches nécessaires et anticiper les risques (ex. : indisponibilité des pièces).

2. Planification

Définition des tâches, estimation des durées, séquençage des activités et allocation des ressources. Une planification rigoureuse tient compte des interdépendances et des contraintes logistiques.

3. Exécution

Coordination des équipes internes (maintenance, production, logistique) et externes (sous-traitants), gestion des ressources et suivi en temps réel.

4. Contrôle

Surveillance des indicateurs clés (délais, coûts, qualité) via des tableaux de bord pour détecter les écarts et ajuster les actions.

5. Clôture

Analyse des écarts entre prévisions et résultats, capitalisation des retours d'expériences (REX) et mise à jour des bases de données de maintenance.

II.3 Criticité des équipements

La planification des arrêts repose sur l'évaluation de la criticité des équipements, c'est à-dire leur importance pour la continuité de la production et la sécurité [5]. L'analyse AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) permet de classer les équipements selon leur impact potentiel (ex. : turbines, pompes principales) et de prioriser les interventions, optimisant ainsi l'allocation des ressources.

II.4 Gestion des risques

La gestion des risques est essentielle pour garantir le succès d'un arrêt programmé. Elle consiste à identifier, évaluer et atténuer les risques potentiels, tels que les retards, les dépassements budgétaires, les accidents ou les défaillances techniques [6].

Une analyse des risques peut inclure :

- **Risques techniques** : Défaillance d'un équipement pendant l'arrêt ou incompatibilité des pièces de rechange.
- **Risques humains** : Erreurs des opérateurs ou manque de compétences des sous-traitants.

- **Risques logistiques** : Retards dans la livraison des matériaux ou indisponibilité des ressources. Des plans de contingence, comme des ressources de secours ou des marges de temps, sont mis en place pour minimiser ces risques.

II.5 Outils et méthodologies de gestion de projet

La complexité des arrêts programmés nécessite des outils et méthodologies avancés pour structurer les activités et minimiser les risques :

- **Diagramme PERT** : Modélise les tâches, identifie les interdépendances et détermine le chemin critique [7].
- **Diagramme de Gantt** : Visualise le planning et suit l'avancement des tâches.
- **MS Project** : Facilite la planification, la gestion des ressources et le suivi des délais.
- **GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur)** : Centralise les données techniques pour une planification basée sur des données fiables.
- **Méthode CPM (Critical Path Method)** : Optimise l'allocation des ressources pour respecter les délais.
- **Lean Maintenance** : Élimine les gaspillages (ex. : interventions inutiles, surstock) pour améliorer l'efficacité [8].
- **Tableau Kanban** : Outil visuel pour gérer le flux des tâches et assurer une coordination fluide entre les équipes.

II.6 Digitalisation des arrêts programmés

La transformation numérique révolutionne la gestion des arrêts programmés. Les technologies comme la GMAO avancée, les jumeaux numériques (digital twins) et l'analyse de données permettent de :

- **Prévoir les besoins** : Les jumeaux numériques simulent le comportement des équipements pour anticiper les défaillances.
- **Optimiser la planification** : Les algorithmes d'optimisation ajustent les plannings en temps réel.
- **Améliorer le suivi** : Les applications mobiles et les tableaux de bord numériques offrent une visibilité instantanée sur l'avancement 1.

II.7 Enjeux économiques et opérationnels

II.7.1 Coûts associés aux arrêts programmés

Les arrêts programmés représentent une part significative du budget de maintenance. Environ 40 % des dépenses de maintenance sont consacrées aux arrêts programmés 2. Les coûts se répartissent en :

- **Coûts directs** : Main-œuvre, pièces de rechange, équipements spécifiques, sous-traitance.
- **Coûts indirects** : Pertes de production, pénalités pour retard, impact sur les clients.
- **Coûts cachés** : Dégradation de l'image de l'entreprise, démotivation des équipes, coûts de formation.

Une budgétisation rigoureuse et une analyse des coûts cachés sont essentielles pour limiter l'impact financier.

II.7.2 Risques liés à la durée d'immobilisation

La durée d'un arrêt est un facteur clé. Une prolongation imprévue peut entraîner :

- **Désorganisation de la supply chain** : Perturbations des livraisons et approvisionnements.
- **Surcharge des équipes** : Fatigue, stress et erreurs humaines.
- **Problèmes de qualité** : Reprises précipitées compromettant la fiabilité.
- **Risques pour la sécurité** : Accidents dus à des interventions sous pression.

Des marges de sécurité et un suivi en temps réel minimisent ces risques.

II.7.3 Gestion des parties prenantes

Les arrêts impliquent des parties prenantes internes (maintenance, production, direction) et externes (fournisseurs, sous-traitants, autorités). Une gestion efficace repose sur :

- **Communication claire** : Partage d'informations sur l'avancement et les ajustements.
- **Alignement des objectifs** : Harmonisation des priorités entre départements.
- **Gestion des sous-traitants** : Sélection rigoureuse et suivi des performances 1.

II.7.3 Enjeux environnementaux

Les arrêts programmés doivent intégrer des considérations environnementales, telles que :

- **Gestion des déchets** : Traitement des huiles usagées, des pièces obsolètes ou des substances dangereuses.
- **Réduction de l'empreinte carbone** : Optimisation des interventions pour limiter la consommation énergétique.
- **Conformité aux normes environnementales** : Respect des réglementations (ex. : ISO 14001) 2.

Conclusion

La gestion d'un arrêt programmé est un processus complexe nécessitant une approche structurée, intégrant des méthodologies avancées (RCM, AMDEC, Lean Maintenance) et des outils numériques (GMAO, jumeaux numériques). Les enjeux économiques, opérationnels, humains et environnementaux soulignent l'importance de pratiques standardisées et de retours d'expérience. En s'appuyant sur une analyse de la criticité des équipements, une gestion des risques et une digitalisation accrue, les entreprises peuvent transformer les arrêts programmés en opportunités pour renforcer leur compétitivité. Les sections suivantes exploreront les étapes concrètes, les bonnes pratiques et les défis spécifiques au contexte industriel algérien.

Chapitre 3

Etude d'un cas d'un arrêt programmé

III.1 Description des travaux à réaliser

Introduction

L'arrêt programmé pour le changement du banc alimentateur de la cage quarto à LAC Sider El Hadjar est une opération complexe nécessitant une coordination rigoureuse des tâches, des ressources et des moyens techniques. Ce chapitre décrit les travaux à réaliser, en détaillant les 70 tâches identifiées, leurs objectifs, leurs durées, leurs antécédents.

Cette description constitue la base pour la planification détaillée présentée dans le chapitre suivant.

III.1.1 Contexte de l'arrêt programmé

Le banc alimentateur de la cage quarto est un composant essentiel du laminoir à chaud, permettant l'alimentation en matière première brame après sa sortie du four pour la production de tôles. Son remplacement est nécessaire pour garantir la continuité de la production, améliorer l'efficacité et répondre aux normes de sécurité. L'arrêt programmé implique des opérations de démontage, de remplacement, d'inspection, de réglage et de tests, réalisées par des équipes spécialisées et avec des équipements adaptés.

III.1.2 Causes fondamentales des défaillances du banc alimentateur

Usure ou casse des galets : les rouleaux d'entraînement peuvent s'user, se fissurer ou se casser sous l'effet de la chaleur et des contraintes mécaniques.

Désalignement des galets : un mauvais alignement peut entraîner des frottements excessifs ou un blocage de la brame.

Blocage mécanique : présence de calamine, débris métalliques ou autres objets étrangers sur la table.

Pannes de roulements : échauffement ou grippage des roulements supportant les galets.

Déformation thermique : à cause des hautes températures, certaines pièces peuvent se dilater ou se déformer.

III.1.3 Liste des tâches

Les travaux ont été décomposés en 70 tâches, regroupées en six phases principales : préparation, démontage, remplacement, réglage, tests et remise en service. Le tableau suivant résume un extrait des tâches principales, incluant leurs durées, antécédents, coûts et moyens utilisés.

CHAPITRE 3.2 : PLANIFICATION DE L'ARRET PROGRAMME

Tableau 3.1. Extrait des tâches pour le changement du banc alimentateur

TACHES	DESIGNATIONS	T/ ANTECEDENTS	DUREE/H
A	Configuration allonges Q a la verticale (pos .Chgt cyl)	/	0,5
B	Consignation Quarto, Sys G, 140b, 13b et 4bar	/	1
C	Extraction Cyl de travail et d'appui	A,B	4
D	Ouverture règles au maximum	/	1
E	Consignation bancs rouleaux alimentateurs, tables et règles	/	1
F	Eloignement jauge entrée Quarto et verrouillage	D	1
G	Démontage traverse et poutre d'écartement supérieure et inférieure	E	1
H	Démontage cassette Edger	G	2
I	Ecartement allonges Edger et verrouillage vers les Colonnes	H	1
J	Démontage flexibles hydrauliques et 140 bar, 13 bar décalamineuse entrée	B	4
K	Préparation et mise en place d'une tôle de 1200x4000x30entre allonges Edger a la place de la traverse supérieure	E	3
L	Démontage décalamineuse SORTIE et dégagement hors ligne et (language entre edger et quarto ! (pose sur tôle ! glissement avec tirefort et palan)	M	8
M	Démontage flexibles hydrauliques et 140bar ;13bar ; décalamineuse sortie	B	4
N	Démontage decalamineuse entrée et dégagement	J,C	3
O	Démontage des deux règles sortie quarto	F	3

CHAPITRE 3.2 : PLANIFICATION DE L'ARRET PROGRAMME

P	Démontage rouleaux NAR 401	O	3
Q	DEMONTAGE ROMPE 140 bar inferieure sortie	L,N	3
R	Démontage rompe 13 bar inf entrée et sortie (couverture , raccordement flexible 13 et 140 bar)	Q	2
S	Déconnexion circuit de graissage bancs rouleaux alimentateur entrée et sortie des deux cote	E	7
T	Démontage passerelle cote s ! moteurs Q6A Q6B	S	2
U	Débranchement moteur rouleaux alimentateur (N°6)	T	6
V	Démontage moteur et allonge longues des rouleaux Q6A (401 et 403) + Q6B (401 et 403) et moteurs Q6A 402 + Q6B (401 et 403) et moteurs Q6A 402 + Q6B 402	U,P	8
W	Tirer les allonge court vers l'extérieure ou maximum (N° 6) et verrouillage – voir plan AWC21.2220415-M4000/ZSZ	V	2,5
X	Démontage clavette a talon (N° 2) rep 4027C du banc alimentateur sortie ,plaque de verrouillage rep 4025C du banc alimentateur sortie ,02 clams inferieure rep J135118N Banc sortie tirants de fixation empoise de sortie (N°6)	W	12
Y	Soudure de 02 anneaux au chaque empoise, montage de 02 tendeur et rapprochement des 02 empoise (banc sortie) d'une valeur d' environ 20mm	X	3
Z	Soulèvement banc de sortie avec des vérin jusqu'au dégagement des clavettes sous empoise	Y,I	4
AA	Elinguage banc de sortie avec des dispositif (contre poids) et mise hors ligne	Z	8

CHAPITRE 3.2 : PLANIFICATION DE L'ARRET PROGRAMME

AB	Démontage clavette banc de sortie, clavette a talon N°02 banc d'entrée rep 4027C ,plaque de verrouillage rep 4025C du banc alimentateur entrée, tirants de fixation empoises banc entrée (N °6) + démontage 2 clames inf Rep J135118N banc entrée	W,I	12
AC	Soudure de 02 anneaux sur chaque empoise, montage de 2 tendeurs et rapprochent des 2 empoise (banc entrée) d'une valeur environ 20 mm	AB	3
AD	Soulèvement banc entrée avec des vérins (jusqu'au dégagements clavette sous empoises) dégagement environ 60mm par rapport au clavettes	AC	3
AE	Soulèvement empoise du banc entrée avec 2 vérin, extraction cales et pose sur rails	AD	4
AF	Arrive du banc à la sortie, dégagement du banc entré hors ligne l'aide d'un système du contre poids	AA,AE	8
AG	Nettoyage intérieur de la cage quarto	AF	8
AH	Pose du banc entrée dans la cage quarto cote sortie a l'aide du système contre poids et tirefort (pose sur rails) s'assurer avant que l'écartement des 2 empoise est minimal	AG	8
AI	Soulèvement banc entrée avec des vérin et calage	AH	4
AJ	Dégagement rails a l'extérieur de la cage quarto	AH	4
AK	Pose banc entrée démontage tendeurs et contrôle positionnement	AI,AJ	4
AL	Montage tirants banc entrée et fixation	AK	4
AM	Essai rotation des rouleaux pendant serrage des tirants banc entrée	AL	0,5
AN	Montage des 2 plaques de verrouillage banc entrée et serrage, 2 clavettes a talons banc entrée et serrage, clames inf fixation et serrage (banc entrée)	AM	6

CHAPITRE 3.2 : PLANIFICATION DE L'ARRET PROGRAMME

AO	Montage moteurs et allonges entrainement banc d'entrée	AN	12
AP	Branchement moteurs (N°3) banc entrée	AO	3
AQ	Pose du banc sortie dans la cage quarto cote sortie a l'aide de système contre poids, s'assurer avant que l'écartement des 2 empoise est minimal	AO	4
AR	Soulèvement banc de sortie avec des vérin et calage	AQ,AP	4
AS	Pose banc de sortie , démontage tendeurs et contrôle positionnement	AR	1
AT	Engagement allonge courtes banc de sortie (manchons)	AS	4
AU	Montage tirants banc de sortie et fixation	AT	6
AV	Essai de rotation des rouleaux pendant serrage des tirants banc de sortie	AU	0,5
AW	Montage des 2 plaques de verrouillage banc de sortie et serrage, 2 clavettes a talons banc sortie et serrage, clames inf fixation et serrage (banc sortie)	AV	6
AX	Montage moteurs et allonges entrainement banc de sortie	AW	12
AY	Branchement moteurs (N°3) banc sortie	AZ	3
AZ	Verrouillage accouplement avec taquets manchons sur arbres	AX	6
BA	Montage rompes 13 bar entrée	AY	4
BB	Montage rompes inf 140 bar et 13 bar sortie	AY	4
BC	Montage rouleau NAR 401 et verrouillage accouplements et paliers	AY	6

CHAPITRE 3.2 : PLANIFICATION DE L'ARRET PROGRAMME

BD	Montage décalamineuse entrée	BA	8
BE	Montage flexible hyd et 140 bar+ 13 bar entrée	BD	3
BF	Montage décalamineuse sortie	BB	3
BG	Montage flexible hyd et 140 bar+ 13 bar sortie	BF	3
BH	Montage règles de sortie	BC	6
BI	Montage cassettes edger	BH,BG,BE	4
BJ	Mise en place poutre d'écartement sup, inf et verrouillage	BI	6
BK	Montage traverse (entre edger)	BI	3
BL	Surpressage de graisse des banc (palier empoises)	BI	16
BM	Connection circuit de graissage des banc entrée et sortie	BL	12
BN	Connection circuit de graissage paliers allonges des banc entrée et sortie	BL	4
BO	Remise en place jauge entrée edger et verrouillage	BK,BJ	2
BP	Insertion cylindres de travail et appui	BO,BM,BN	4
BQ	Déconsignation banc , tables et règles	BP	1
BR	Déconsignation système G 140 bar,13 bar et 4 bar	BQ	1

III.1.4 Description des phases

1. Préparation

Objectif : Sécuriser le site, préparer les outils, et former les équipes.

Exemples de tâches :

Tâche **A** : Configuration allonges Q à la verticale – préparation mécanique des équipements.

Tâche **B** : Consignation des systèmes (Quarto, Sys G, etc.) – sécurité hydraulique et pneumatique.

Tâche **E** : Consignation bancs, tables et règles – sécurisation des éléments de manutention.

2. Démontage

Objectif : Dépose sécurisée des éléments existants.

Exemples de tâches :

Tâche **G** : Démontage traverse et poutre d'écartement sup./inf. – structure lourde nécessitant manutention.

Tâche **H** : Démontage cassette Edger – retrait de sous-ensemble mécanique.

Tâche **AA** : Elingage banc de sortie et mise hors ligne – nécessite vérins, contrepoids, et planification fine.

3. Inspection

Objectif : Vérifier la conformité des supports avant l'installation du nouveau matériel.

Exemples de tâches :

Tâche **AG** : Nettoyage intérieur de la cage quarto – préparation à l'inspection visuelle.

Tâche **AH** : Pose du banc d'entrée (vérification de l'écartement) – vérifie la compatibilité géométrique.

Tâche **AK** : Contrôle du positionnement après pose – validation métrologique.

4. Remplacement

Objectif : Installer le nouveau banc et ses composants.

Exemples de tâches :

Tâche **AL** : Montage tirants banc entrée – fixation structurelle.

Tâche **AO** : Montage moteurs et allonges – installation mécanique/électrique.

Tâche **AX** : Montage moteurs banc de sortie – symétrique au banc d'entrée.

5. Réglage

Objectif : Ajuster les composants pour assurer un alignement et un fonctionnement optimal.

Exemples de tâches :

Tâche **AM** : Essai rotation des rouleaux – vérification du fonctionnement.

Tâche **AV** : Essai rotation banc sortie – contrôle de bon montage.

Tâche **BL** : Surpressage de graisse – ajustement des paramètres de lubrification.

6. Tests et remise en service

Objectif : Valider le système avant de le remettre en production.

Exemples de tâches :

Tâche **BP** : Insertion des cylindres de travail – dernière étape mécanique avant essais finaux.

Tâche **BQ** : Déconsignation banc, tables et règles – autorisation de remise en fonctionnement.

Tâche **BR** : Déconsignation système G, hydraulique et pneumatique – fin des travaux de maintenance.

III.1.5 Ressources et moyens

Les moyens utilisés incluent des équipements lourds (pont roulant, outils de levage), des instruments de mesure (lasers, capteurs), et des équipes spécialisées (techniciens de maintenance, opérateurs, ingénieurs). Les coûts associés couvrent la main-œuvre, les matériaux et la location d'équipements.

Conclusion

Ce sous chapitre a détaillé les 70 tâches nécessaires au changement du banc alimentateur de la cage quarto, organisées en phases logiques. Cette décomposition fournit une base solide pour la planification détaillée dans le chapitre suivant, où les outils comme PERT et le diagramme de Gantt seront utilisés pour optimiser les délais, les coûts et les ressources

III.2 Planification de l'arrêt programmé

Introduction

Le présent chapitre détaille la planification opérationnelle de l'arrêt programmé pour le remplacement du banc alimentateur de la cage quarto. Fondée sur les 70 tâches identifiées au Chapitre 3, cette planification intègre une analyse multicritère via :

III.2.1 Le diagramme PERT : (versions temps **normal** et temps **aléatoire**)

➤ Qu'est-ce qu'un diagramme PERT

Un diagramme PERT (Program Evaluation and Review Technique) est un outil de gestion de projet utilisé pour planifier et coordonner des tâches. Il représente les activités sous forme de nœuds (ou de flèches, selon la variante) et leurs dépendances, en mettant l'accent sur les relations entre les tâches et les délais. Il permet d'identifier le chemin critique, c'est-à-dire la séquence de tâches qui détermine la durée minimale du projet. Chaque tâche est associée à une estimation de temps (optimiste, pessimiste et probable).

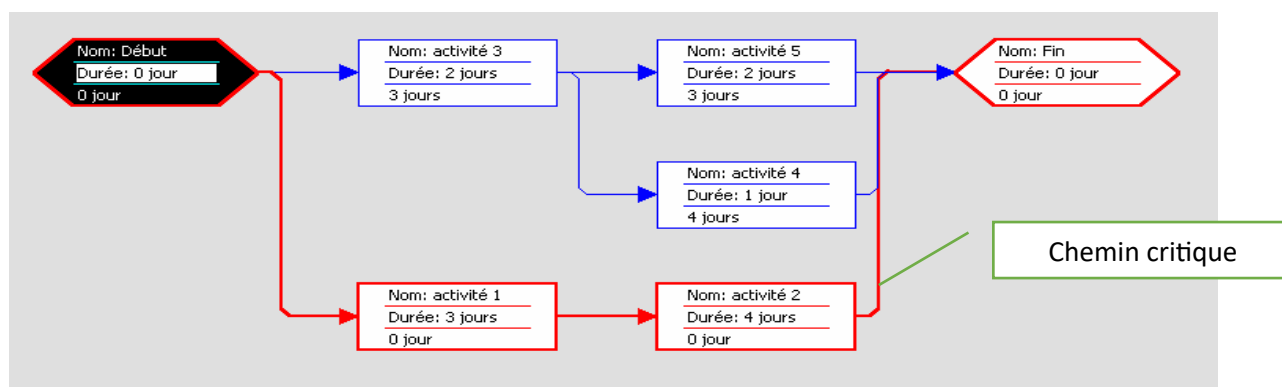


Figure 3.1 : Exemple de diagramme PERT

➤ Objectif de l'utilisation de diagramme PERT

L'objectif d'un diagramme PERT (Program Evaluation and Review Technique) est de planifier et optimiser la gestion de projets complexes en identifiant les dépendances entre les tâches et en déterminant le chemin critique, c'est-à-dire la séquence de tâches qui conditionne la durée totale du projet. Il aide à estimer les délais (via des temps optimiste, pessimiste et probable) et à anticiper les risques de retards, en particulier dans des projets avec de nombreuses interdépendances.

➤ Qu'est-ce qu'un diagramme Gantt

Un diagramme de Gantt est un autre outil de gestion de projet, présenté sous forme de graphique à barres horizontales. Chaque barre représente une tâche, avec sa durée, son début et sa fin sur

une échelle de temps. Il montre visuellement la progression des tâches, les chevauchements et les délais. Contrairement au PERT, il ne met pas directement en évidence le chemin critique, mais il est plus intuitif pour suivre l'avancement.

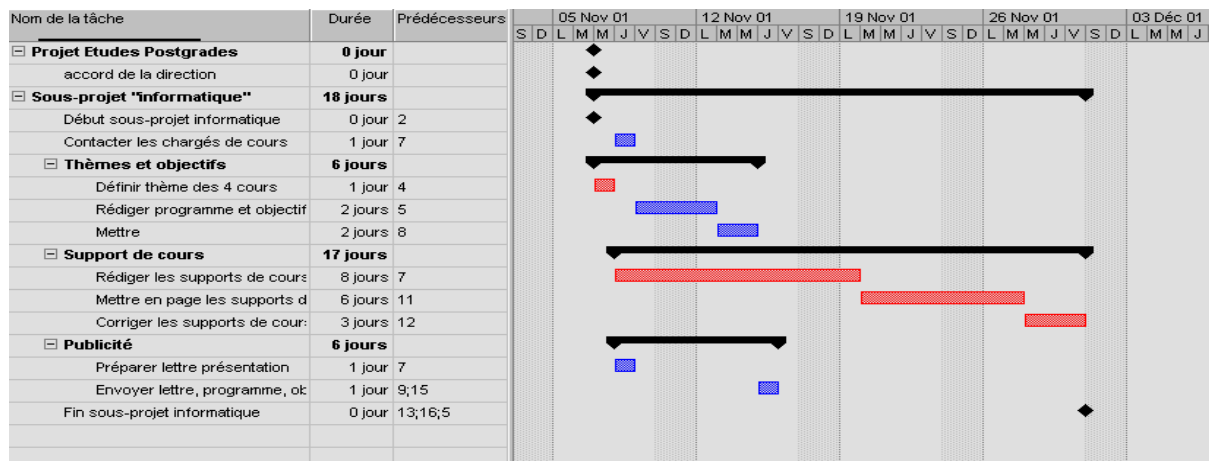


Figure 3.2 : Exemple de diagramme de Gantt

L'objectif de l'utilisation de diagramme Gantt

L'objectif d'un diagramme de Gantt est de visualiser et suivre l'avancement d'un projet de manière claire et intuitive. Il permet de représenter les tâches sous forme de barres sur une échelle de temps, montrant leurs dates de début, de fin, leur durée et leurs éventuels chevauchements. Il est utilisé pour coordonner les activités, communiquer les plannings à l'équipe et surveiller si le projet respecte les échéances.

Différents types de diagramme de Gantt

Il existe trois types de GANTT.

- Diagramme de GANTT au plus tôt
- Diagramme de GANTT au plus tard
- Diagramme de GANTT à la date de marge libre

Ces trois types sont schématisés comme suit :

- $\text{Date de marge libre} = \text{Date de début au plus tôt} + \text{marge libre}$

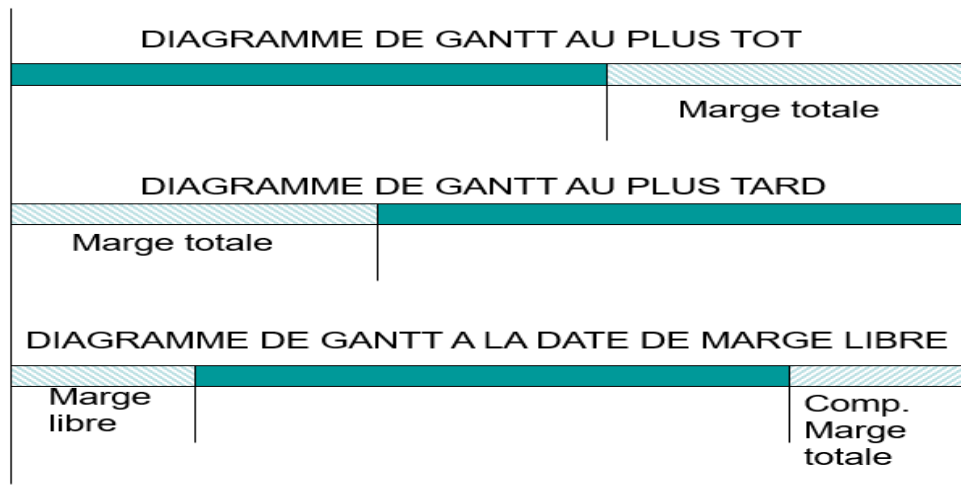


Figure 3.3 : Type de diagramme de Gantt

III.2.2 Le PERT Coût :

Le PERT COÛT a deux objectifs :

- Déterminer le coût de réalisation d'un projet
- Rechercher la meilleure solution (compromis Temps/coût)

Deux problèmes différents peuvent être traités :

1. Diminution du coût du projet
2. Accélération du projet au moindre coût

$$C = f(t)$$

Dans notre travail, nous prenons le premier cas (diminution du coût).

MISE EN ŒUVRE DANS LE CAS DE DIMINUTION DU COUT DU PROJET :

Pour sa mise en œuvre, deux étapes doivent être suivies :

- a) Résolution du Pert Temps en prenant en compte les durées accélérées des tâches
- b) Diminution du coût du programme en allongeant les durées des opérations non critiques :
 - 1) En annulant les ML dans la mesure du possible
 - 2) En annulant les MT

Ces deux points vont être développés dans la partie pratique (étude de cas).

III.2.3 Le PERT Charge :

pour équilibrer les ressources humaines et matérielles.

L'objectif est d'établir un planning réaliste, d'identifier le chemin critique, et de minimiser l'impact sur la production tout en garantissant la sécurité des interventions. C'est un problème qui consiste à ordonner (agencer) les différentes tâches dans le temps afin de minimiser la durée totale du projet, en tenant compte d'un certain nombre de contraintes et en essayant de répartir les charges de la façon la plus régulière. Il est à noter que :

- Il y a une difficulté d'obtenir la solution optimale ;
- Les méthodes utilisées pour la résolution sont basées sur la simulation.

Pour appliquer le PERT Charge, on peut choisir entre deux méthodes.

1. Ordonnancement des activités à la date au plus tôt et sommation des ressources nécessaires.

Pour cela :

- Les tâches sont planifiées à leur date au plus tôt ;
- On ne tient pas compte des ressources disponibles ;
- On détermine le niveau de ressources nécessaires.

2. Ordonnancement des activités à leur date au plus tard et sommation des ressources nécessaires.

Pour cela :

- Les tâches sont planifiées à leur date au plus tard ;
- On respecte le délai prévu pour le projet ;
- On ne tient pas compte des ressources disponibles.
- On détermine le niveau de ressources nécessaires.

3. Nivellement des ressources

- Tenir compte du niveau existant des ressources
- Planifier les tâches de manière à ne pas dépasser le niveau disponible
- Si les ressources ne sont pas suffisantes alors la date de fin de projet sera retardée.

III.2.4 Méthodologie de planification

1.1 Construction du réseau PERT (Temps normal)

Le réseau PERT modélise les dépendances entre les 70 tâches et on calcule :

- **Les dates au plus tôt ($Début_{tot}$ et Fin_{tot})** : Déterminées par un parcours **avant** à partir des tâches sans antécédents.

-Date de début au plus tôt

C'est la date minimum à laquelle peut commencer une tâche

-Date de fin au plus tôt

C'est la date minimum à laquelle peut se terminer une tâche. Elle est égale à la Date de début au plus tôt augmentée de la durée de la tâche.

- **Les dates au plus tard ($Début_{tar}^d$ et Fin_{tar}^d)** : Calculées par un parcours **arrière** à partir de la date de fin du projet.

-Date de début au plus tard

C'est la date maximum à laquelle une tâche doit commencer de manière à ne pas allonger la durée totale du projet.

Généralement, on détermine d'abord la date de fin au plus tard .Elle est égale à la date de fin au plus tard diminuée de la durée de la tâche.

-Date de fin au plus tard

C'est la date maximum à laquelle une tâche doit se terminer de manière à ne pas allonger la durée totale du projet.

Il est plus commode de déterminer cette date en partant de la fin du projet.

- **La marge totale** : C'est le délai pouvant être accordé au commencement d'une tâche sans allonger la durée totale du projet

$$MT = Début_{tar}^d - Début_{tot}.$$

- **La marge libre** : C'est le délai pouvant être accordé au commencement d'une tâche sans modifier la marge totale des tâches suivantes.

$ML = \text{Début}_{\text{tot}} \text{ max des tâches suivantes} - \text{Fin}_{\text{tot}} \text{ de la tâche en question.}$

Intervalle de placement ou intervalle de flottement d'une tâche :

C'est l'intervalle de temps séparant la date de début au plus tôt d'une tâche, de sa date de fin au plus tard

$\text{Intervalle de placement} = \text{Date de Fin}_{\text{tar}}^d - \text{Date de Début}_{\text{tot}}$

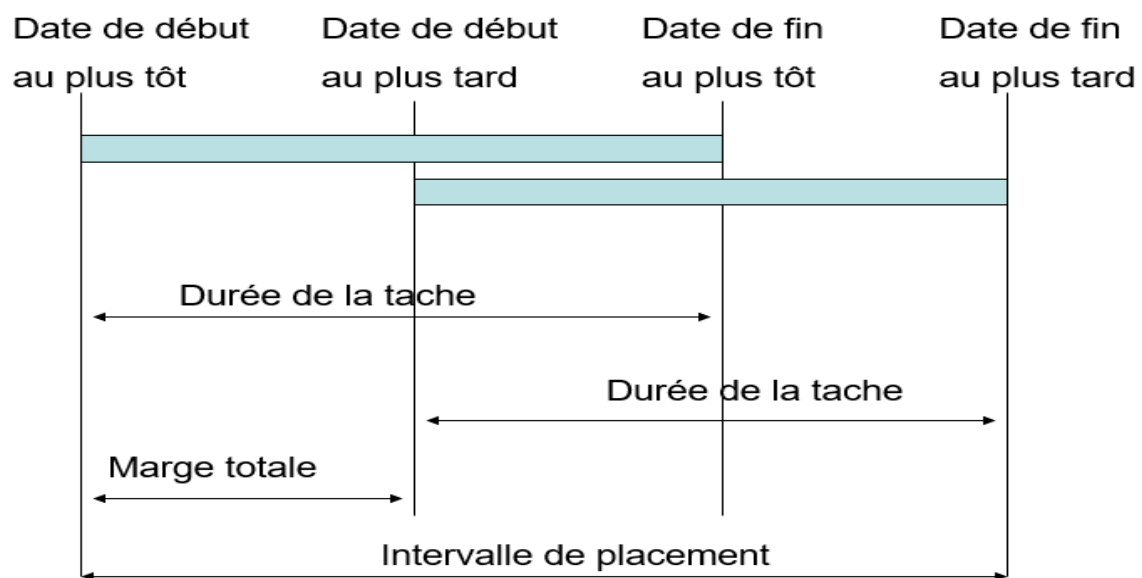


Figure 3.4 : Représentation graphique des marges temporelles et des dates clés d'une tâche dans un planning.

Chemin critique :

C'est le chemin le plus long situé entre le début et la fin d'un projet et c'est celui qui détermine la durée la plus courte de réalisation du projet.

Niveau ou classe d'une tâche

C'est le nombre maximum de tâches séparant la tâche en question du début du projet

Il existe plusieurs façons de déterminer ce niveau. Nous citons :

- La méthode des tableaux
- La méthode matricielle

Tableau 3.2 : Analyse quantitative

TACHES	DUREE	DATE DE DEBUT AU PLUS TOT	DATE DE DEBUT AU PLUS TARD	DATE DE FIN AU PLUS TOT	DATE DE FIN AU PLUS TARD	MARGE LIBRE	MARGE TOTALE	INTERVALLE DE FLOTTEMENT
A	0,5	15 Juillet 2025 08:00	15 Juillet 2025 19:30	15 Juillet 2025 08:30	15 Juillet 2025 20:00	0,5 heure	11,5 heures	12
B	1	15 Juillet 2025 08:00	15 Juillet 2025 14:00	15 Juillet 2025 09:00	15 Juillet 2025 15:00	0 heure	6 heures	7
C	4	15 Juillet 2025 09:00	15 Juillet 2025 20:00	15 Juillet 2025 13:00	16 Juillet 2025 00:00	0 heure	11 heures	15
D	1	15 Juillet 2025 08:00	15 Juillet 2025 16:00	15 Juillet 2025 09:00	15 Juillet 2025 17:00	0 heure	8 heures	9
E	1	15 Juillet 2025 08:00	15 Juillet 2025 08:00	15 Juillet 2025 09:00	15 Juillet 2025 09:00	0 heure	0 heure	1
F	1	15 Juillet 2025 09:00	15 Juillet 2025 17:00	15 Juillet 2025 10:00	15 Juillet 2025 18:00	0 heure	8 heures	9
G	1	15 Juillet 2025 09:00	16 Juillet 2025 21:30	15 Juillet 2025 10:00	16 Juillet 2025 22:30	2 heures	36,5 heures	3
H	2	15 Juillet 2025 12:00	16 Juillet 2025 22:30	15 Juillet 2025 14:00	17 Juillet 2025 00:30	0 heure	34,5 heures	36,5

I	1	15 Juillet 2025 14:00	17 Juillet 2025 00:30	15 Juillet 2025 15:00	17 Juillet 2025 01:30	34,5 heures	34,5 heures	35,5
J	4	15 Juillet 2025 09:00	15 Juillet 2025 20:00	15 Juillet 2025 13:00	16 Juillet 2025 00:00	0 heure	11 heures	15
K	3	15 Juillet 2025 09:00	16 Juillet 2025 19:30	15 Juillet 2025 12:00	16 Juillet 2025 22:30	0 heure	34,5 heures	37,5
L	8	15 Juillet 2025 13:00	15 Juillet 2025 19:00	15 Juillet 2025 21:00	16 Juillet 2025 03:00	0 heure	6 heures	14
M	4	15 Juillet 2025 09:00	15 Juillet 2025 15:00	15 Juillet 2025 13:00	15 Juillet 2025 19:00	0 heure	6 heures	10
N	3	15 Juillet 2025 13:00	16 Juillet 2025 00:00	15 Juillet 2025 16:00	16 Juillet 2025 03:00	5 heures	11 heures	14
O	3	15 Juillet 2025 10:00	15 Juillet 2025 18:00	15 Juillet 2025 13:00	15 Juillet 2025 21:00	0 heure	8 heures	11
P	3	15 Juillet 2025 13:00	15 Juillet 2025 21:00	15 Juillet 2025 16:00	16 Juillet 2025 00:00	8 heures	8 heures	11
Q	3	15 Juillet 2025 21:00	16 Juillet 2025 03:00	16 Juillet 2025 00:00	16 Juillet 2025 06:00	0 heure	6 heures	9
R	2	16 Juillet 2025 00:00	16 Juillet 2025 06:00	16 Juillet 2025 02:00	16 Juillet 2025 08:00	6 heures	6 heures	8

S	7	15 Juillet 2025 09:00	15 Juillet 2025 09:00	15 Juillet 2025 16:00	15 Juillet 2025 16:00	0 heure	0 heure	7
T	2	15 Juillet 2025 16:00	15 Juillet 2025 16:00	15 Juillet 2025 18:00	15 Juillet 2025 18:00	0 heure	0 heure	2
U	6	15 Juillet 2025 18:00	15 Juillet 2025 18:00	16 Juillet 2025 00:00	16 Juillet 2025 00:00	0 heure	0 heure	6
V	8	16 Juillet 2025 00:00	16 Juillet 2025 00:00	16 Juillet 2025 08:00	16 Juillet 2025 08:00	0 heure	0 heure	8
W	2,5	16 Juillet 2025 08:00	16 Juillet 2025 08:00	16 Juillet 2025 10:30	16 Juillet 2025 10:30	0 heure	0 heure	2,5
X	12	16 Juillet 2025 10:30	16 Juillet 2025 10:30	16 Juillet 2025 22:30	16 Juillet 2025 22:30	0 heure	0 heure	12
Y	3	16 Juillet 2025 22:30	16 Juillet 2025 22:30	17 Juillet 2025 01:30	17 Juillet 2025 01:30	0 heure	0 heure	3
Z	4	17 Juillet 2025 01:30	17 Juillet 2025 01:30	17 Juillet 2025 05:30	17 Juillet 2025 05:30	0 heure	0 heure	4
AA	8	17 Juillet 2025 05:30	17 Juillet 2025 05:30	17 Juillet 2025 13:30	17 Juillet 2025 13:30	0 heure	0 heure	8
AB	12	16 Juillet 2025 10:30	16 Juillet 2025 15:30	16 Juillet 2025 22:30	17 Juillet 2025 03:30	0 heure	5 heures	17

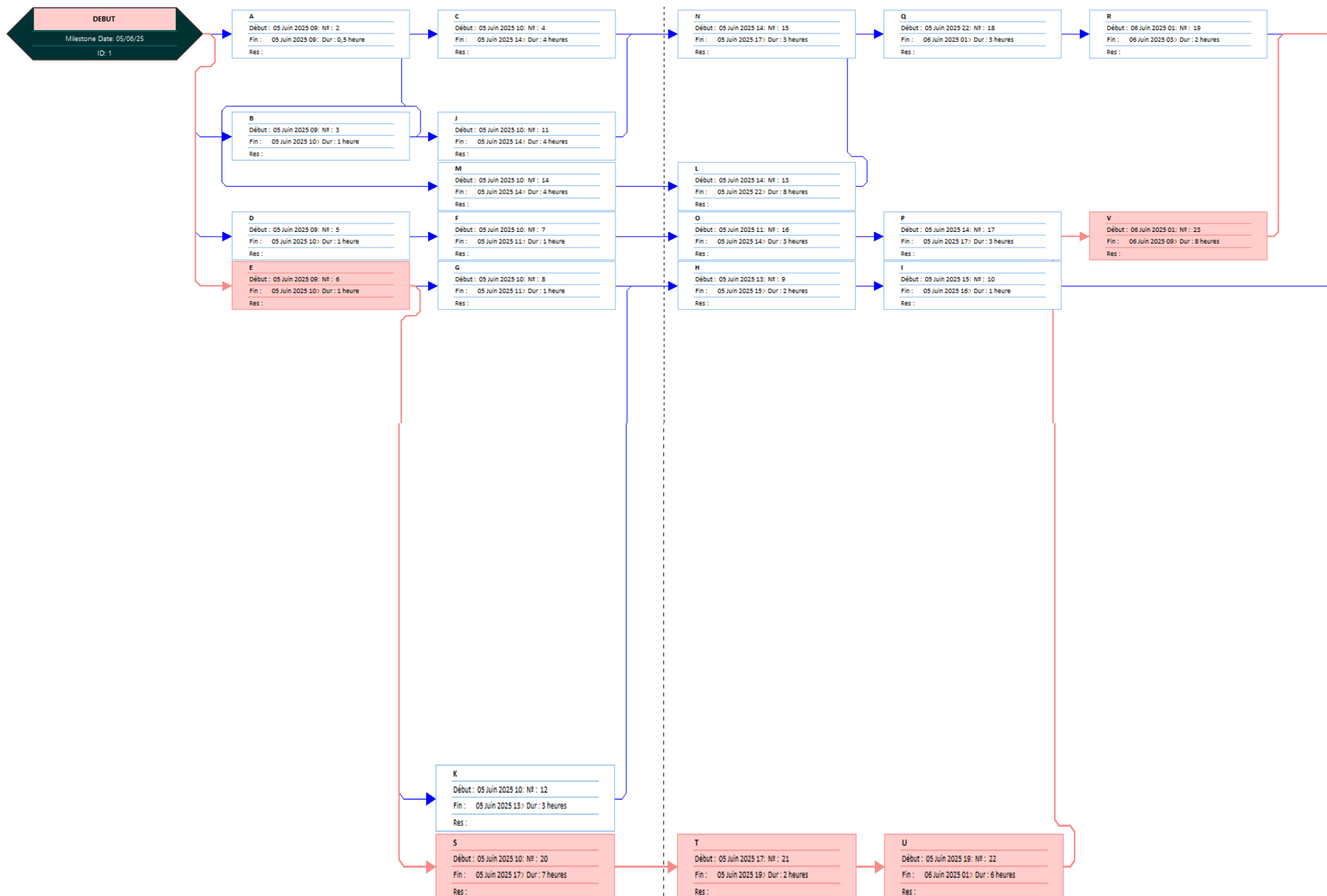
AC	3	16 Juillet 2025 22:30	17 Juillet 2025 03:30	17 Juillet 2025 01:30	17 Juillet 2025 06:30	0 heure	5 heures	8
AD	3	17 Juillet 2025 01:30	17 Juillet 2025 06:30	17 Juillet 2025 04:30	17 Juillet 2025 09:30	0 heure	5 heures	8
AE	4	17 Juillet 2025 04:30	17 Juillet 2025 09:30	17 Juillet 2025 08:30	17 Juillet 2025 13:30	5 heures	5 heures	9
AF	8	17 Juillet 2025 13:30	17 Juillet 2025 13:30	17 Juillet 2025 21:30	17 Juillet 2025 21:30	0 heure	0 heure	8
AG	8	17 Juillet 2025 21:30	17 Juillet 2025 21:30	18 Juillet 2025 05:30	18 Juillet 2025 05:30	0 heure	0 heure	8
AH	8	18 Juillet 2025 05:30	18 Juillet 2025 05:30	18 Juillet 2025 13:30	18 Juillet 2025 13:30	0 heure	0 heure	8
AI	4	18 Juillet 2025 13:30	18 Juillet 2025 13:30	18 Juillet 2025 17:30	18 Juillet 2025 17:30	0 heure	0 heure	4
AJ	4	18 Juillet 2025 13:30	18 Juillet 2025 13:30	18 Juillet 2025 17:30	18 Juillet 2025 17:30	0 heure	0 heure	4
AK	4	18 Juillet 2025 17:30	18 Juillet 2025 17:30	18 Juillet 2025 21:30	18 Juillet 2025 21:30	0 heure	0 heure	4
AL	4	18 Juillet 2025 21:30	18 Juillet 2025 21:30	19 Juillet 2025 01:30	19 Juillet 2025 01:30	0 heure	0 heure	4

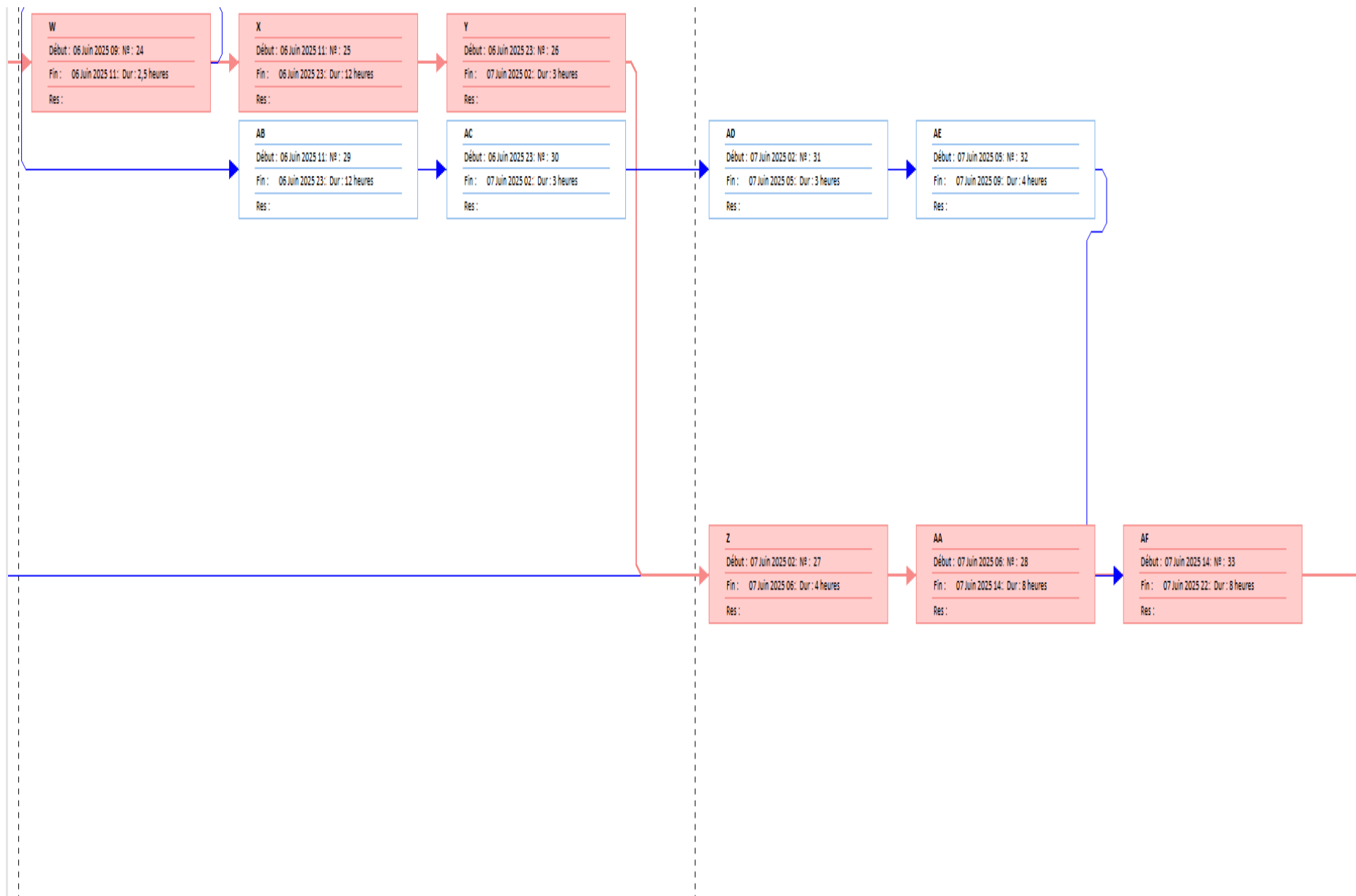
AM	0,5	19 Juillet 2025 01:30	19 Juillet 2025 01:30	19 Juillet 2025 02:00	19 Juillet 2025 02:00	0 heure	0 heure	0,5
AN	6	19 Juillet 2025 02:00	19 Juillet 2025 02:00	19 Juillet 2025 08:00	19 Juillet 2025 08:00	0 heure	0 heure	6
AO	12	19 Juillet 2025 08:00	19 Juillet 2025 08:00	19 Juillet 2025 20:00	19 Juillet 2025 20:00	0 heure	0 heure	12
AP	3	19 Juillet 2025 20:00	19 Juillet 2025 21:00	19 Juillet 2025 23:00	20 Juillet 2025 00:00	1 heure	1 heure	4
AQ	4	19 Juillet 2025 20:00	19 Juillet 2025 20:00	20 Juillet 2025 00:00	20 Juillet 2025 00:00	0 heure	0 heure	4
AR	4	20 Juillet 2025 00:00	20 Juillet 2025 00:00	20 Juillet 2025 04:00	20 Juillet 2025 04:00	0 heure	0 heure	4
AS	1	20 Juillet 2025 04:00	20 Juillet 2025 04:00	20 Juillet 2025 05:00	20 Juillet 2025 05:00	0 heure	0 heure	1
AT	4	20 Juillet 2025 05:00	20 Juillet 2025 05:00	20 Juillet 2025 09:00	20 Juillet 2025 09:00	0 heure	0 heure	4
AU	6	20 Juillet 2025 09:00	20 Juillet 2025 09:00	20 Juillet 2025 15:00	20 Juillet 2025 15:00	0 heure	0 heure	6
AV	0,5	20 Juillet 2025 15:00	20 Juillet 2025 15:00	20 Juillet 2025 15:30	20 Juillet 2025 15:30	0 heure	0 heure	0,5

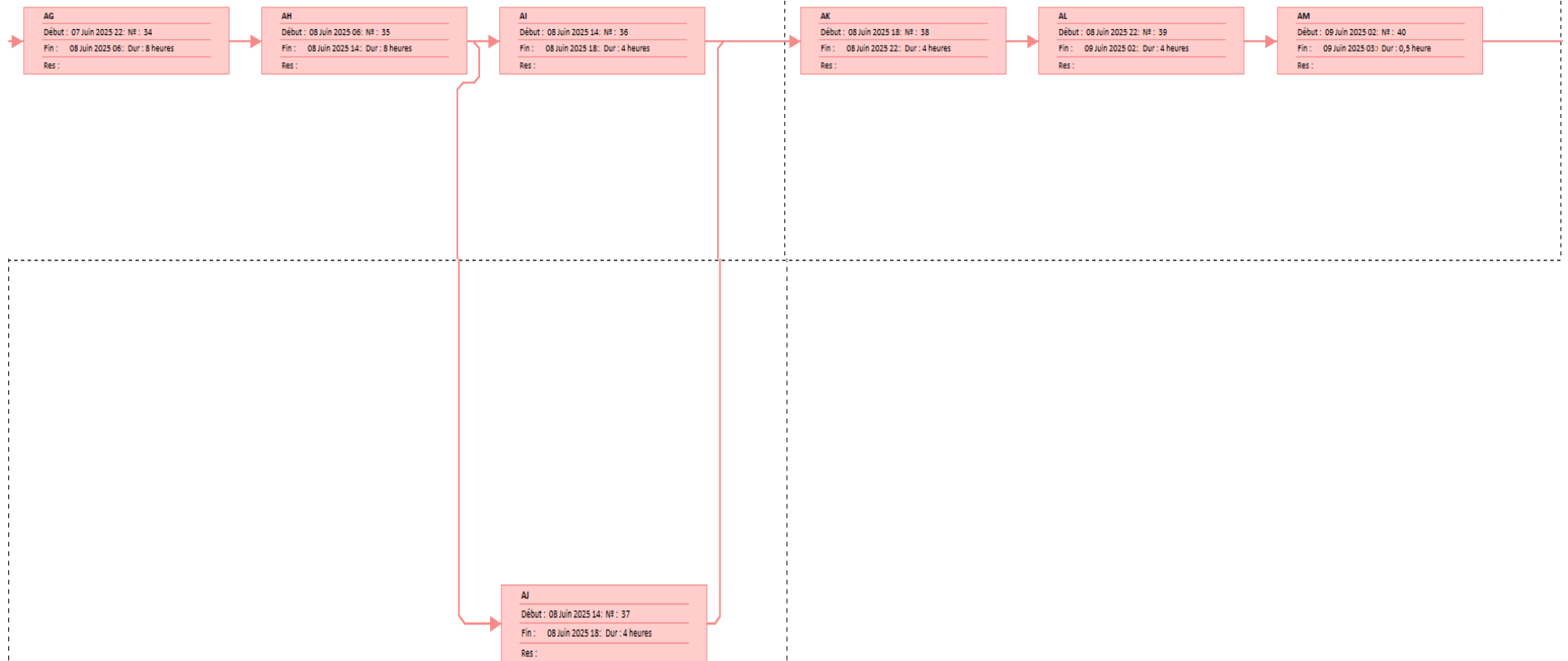
AW	6	20 Juillet 2025 15:30	20 Juillet 2025 15:30	20 Juillet 2025 21:30	20 Juillet 2025 21:30	0 heure	0 heure	6
AX	12	20 Juillet 2025 21:30	20 Juillet 2025 21:30	21 Juillet 2025 09:30	21 Juillet 2025 09:30	0 heure	0 heure	12
AY	3	21 Juillet 2025 15:30	21 Juillet 2025 15:30	21 Juillet 2025 18:30	21 Juillet 2025 18:30	0 heure	0 heure	3
AZ	6	21 Juillet 2025 09:30	21 Juillet 2025 09:30	21 Juillet 2025 15:30	21 Juillet 2025 15:30	0 heure	0 heure	6
BA	4	21 Juillet 2025 18:30	21 Juillet 2025 18:30	21 Juillet 2025 22:30	21 Juillet 2025 22:30	0 heure	0 heure	4
BB	4	21 Juillet 2025 18:30	21 Juillet 2025 23:30	21 Juillet 2025 22:30	22 Juillet 2025 03:30	0 heure	5 heures	9
BC	6	21 Juillet 2025 18:30	21 Juillet 2025 18:30	22 Juillet 2025 00:30	22 Juillet 2025 00:30	0 heure	0 heure	6
BD	8	21 Juillet 2025 22:30	21 Juillet 2025 22:30	22 Juillet 2025 06:30	22 Juillet 2025 06:30	0 heure	0 heure	8
BE	3	22 Juillet 2025 06:30	22 Juillet 2025 06:30	22 Juillet 2025 09:30	22 Juillet 2025 09:30	0 heure	0 heure	3
BF	3	21 Juillet 2025 22:30	22 Juillet 2025 03:30	22 Juillet 2025 01:30	22 Juillet 2025 06:30	5 heures	5 heures	8

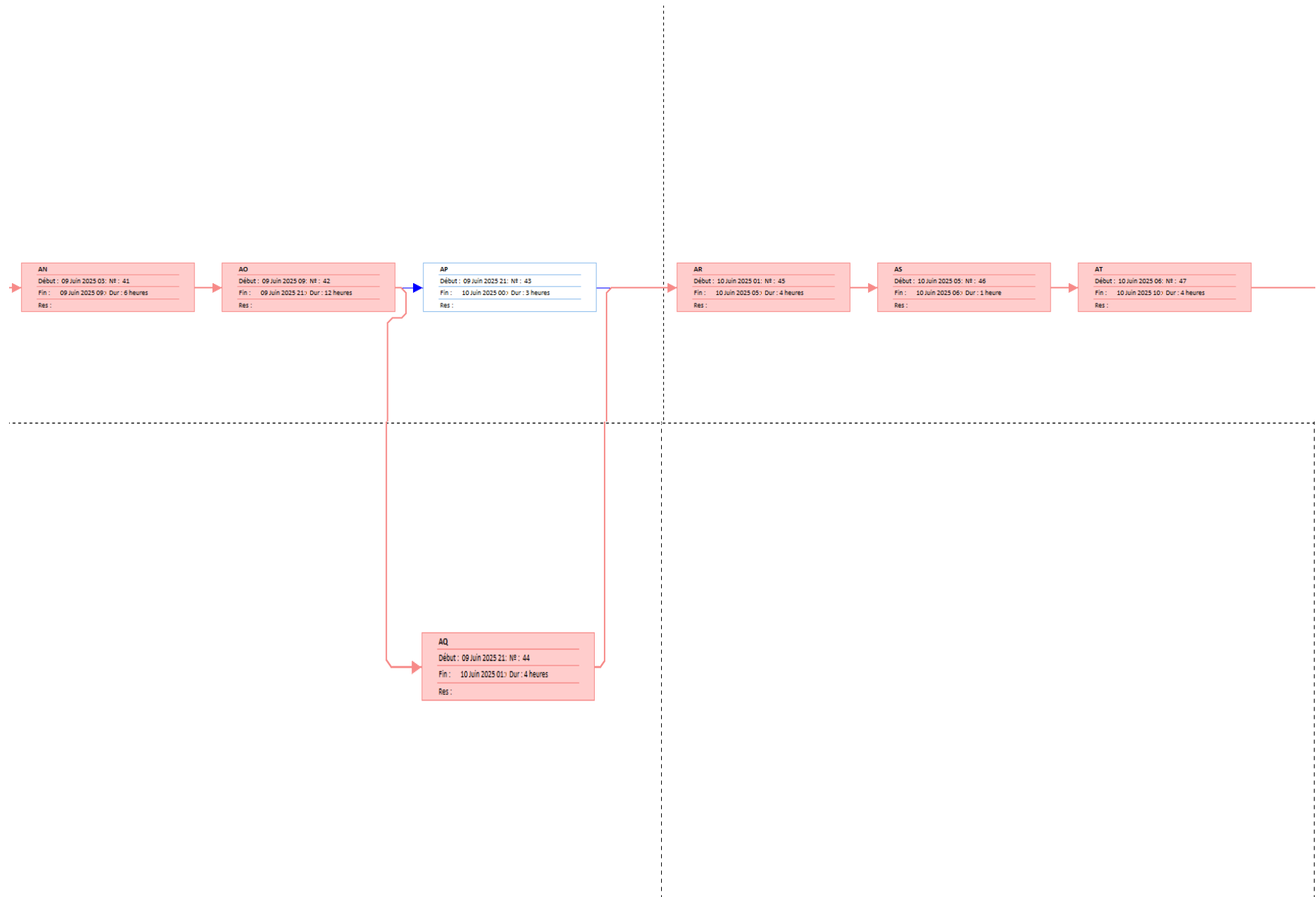
BG	3	22 Juillet 2025 06:30	22 Juillet 2025 06:30	22 Juillet 2025 09:30	22 Juillet 2025 09:30	0 heure	0 heure	3
BH	6	22 Juillet 2025 00:30	22 Juillet 2025 00:30	22 Juillet 2025 06:30	22 Juillet 2025 06:30	0 heure	0 heure	6
BI	4	22 Juillet 2025 09:30	22 Juillet 2025 09:30	22 Juillet 2025 13:30	22 Juillet 2025 13:30	0 heure	0 heure	4
BJ	6	22 Juillet 2025 13:30	23 Juillet 2025 09:30	22 Juillet 2025 19:30	23 Juillet 2025 15:30	0 heure	20 heures	26
BK	3	22 Juillet 2025 13:30	23 Juillet 2025 12:30	22 Juillet 2025 16:30	23 Juillet 2025 15:30	3 heures	23 heures	6
BL	16	22 Juillet 2025 13:30	22 Juillet 2025 13:30	23 Juillet 2025 05:30	23 Juillet 2025 05:30	0 heure	0 heure	16
BM	12	23 Juillet 2025 05:30	23 Juillet 2025 05:30	23 Juillet 2025 17:30	23 Juillet 2025 17:30	0 heure	0 heure	12
BN	4	23 Juillet 2025 05:30	23 Juillet 2025 13:30	23 Juillet 2025 09:30	23 Juillet 2025 17:30	8 heures	8 heures	12
BO	2	22 Juillet 2025 19:30	23 Juillet 2025 15:30	22 Juillet 2025 21:30	23 Juillet 2025 17:30	20 heures	20 heures	22
BP	4	23 Juillet 2025 17:30	23 Juillet 2025 17:30	23 Juillet 2025 21:30	23 Juillet 2025 21:30	0 heure	0 heure	4

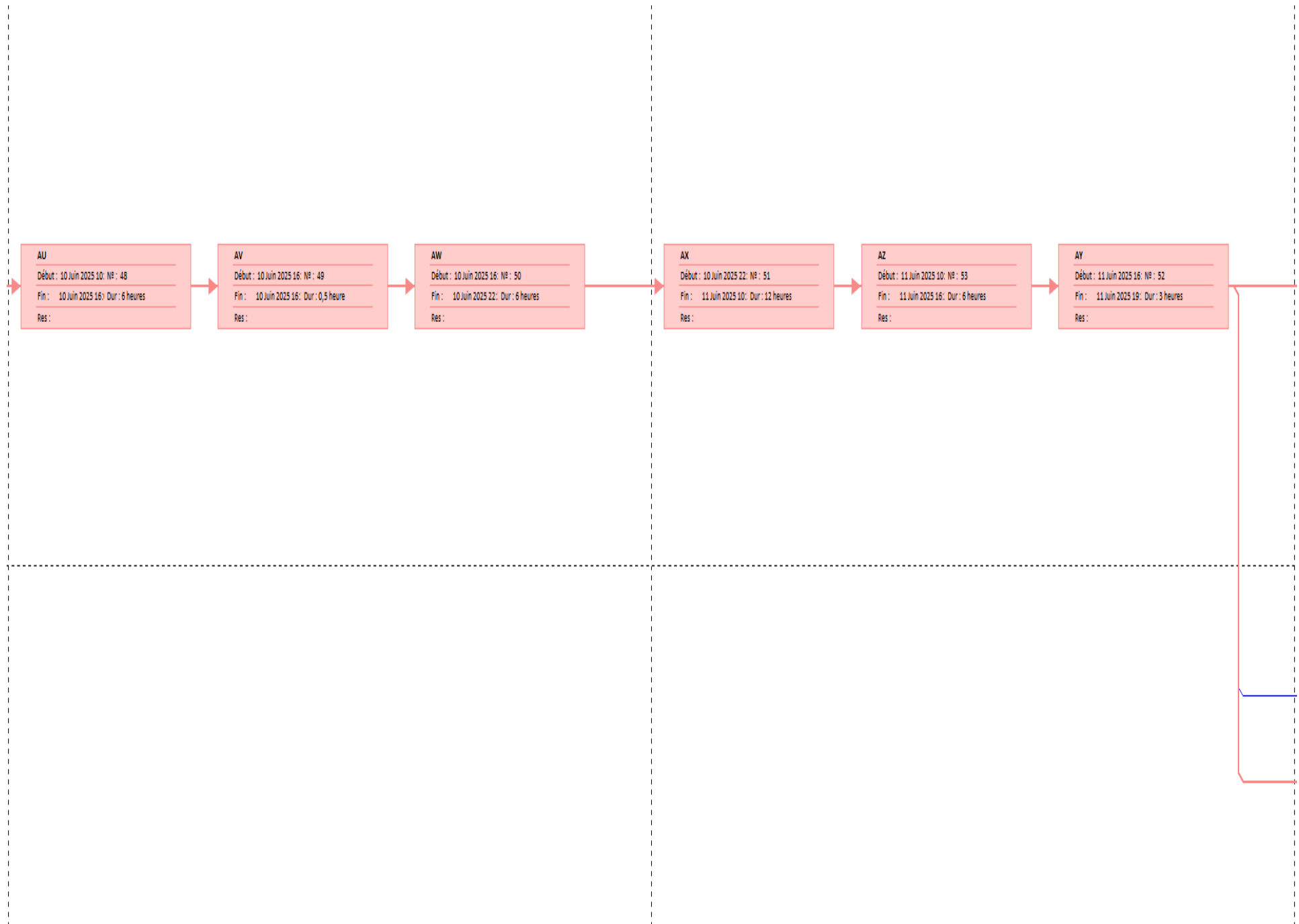
BQ	1	23 Juillet 2025 21:30	23 Juillet 2025 21:30	23 Juillet 2025 22:30	23 Juillet 2025 22:30	0 heure	0 heure	1
BR	1	23 Juillet 2025 22:30	23 Juillet 2025 22:30	23 Juillet 2025 23:30	23 Juillet 2025 23:30	0 heure	0 heure	1

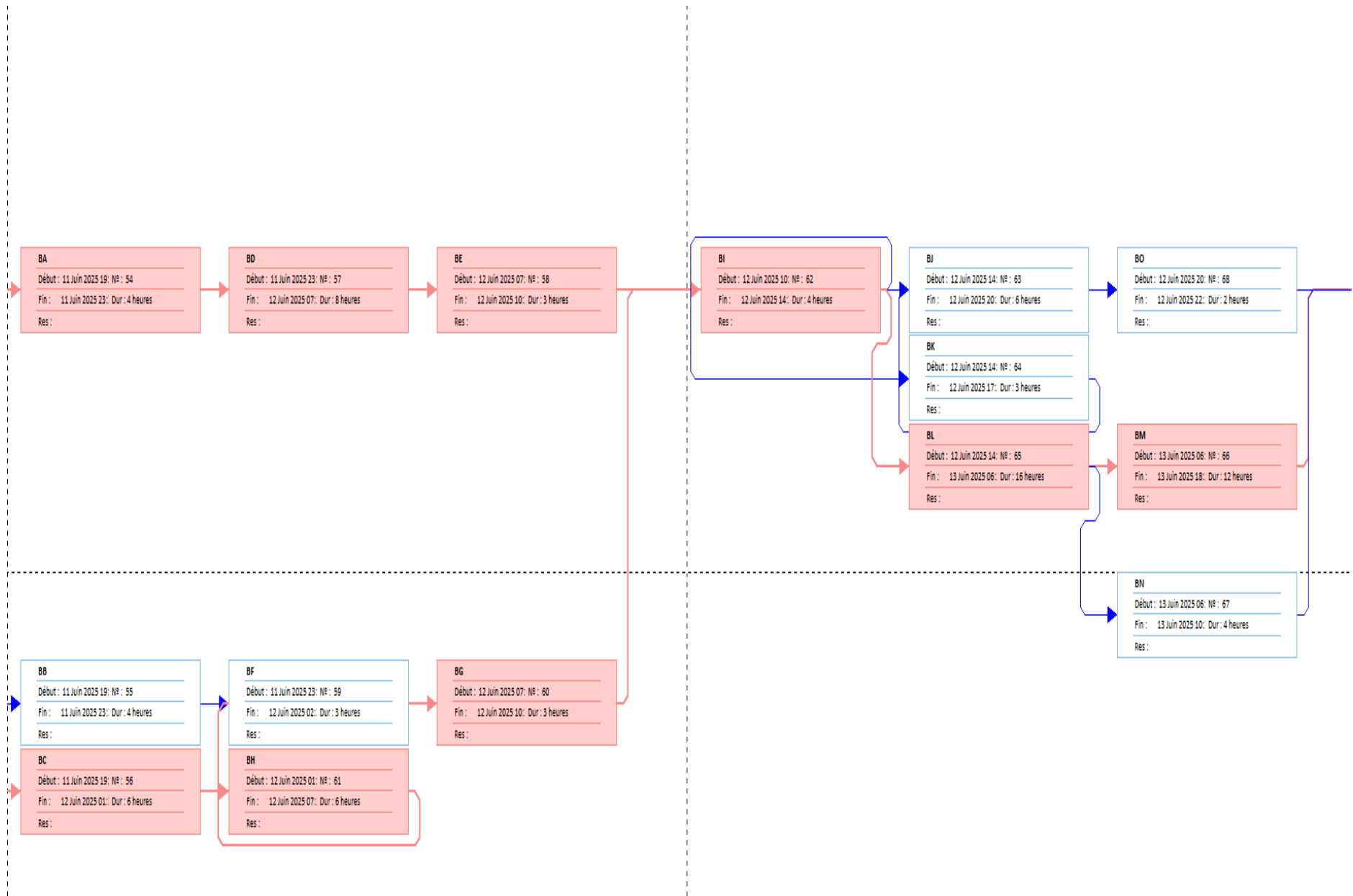












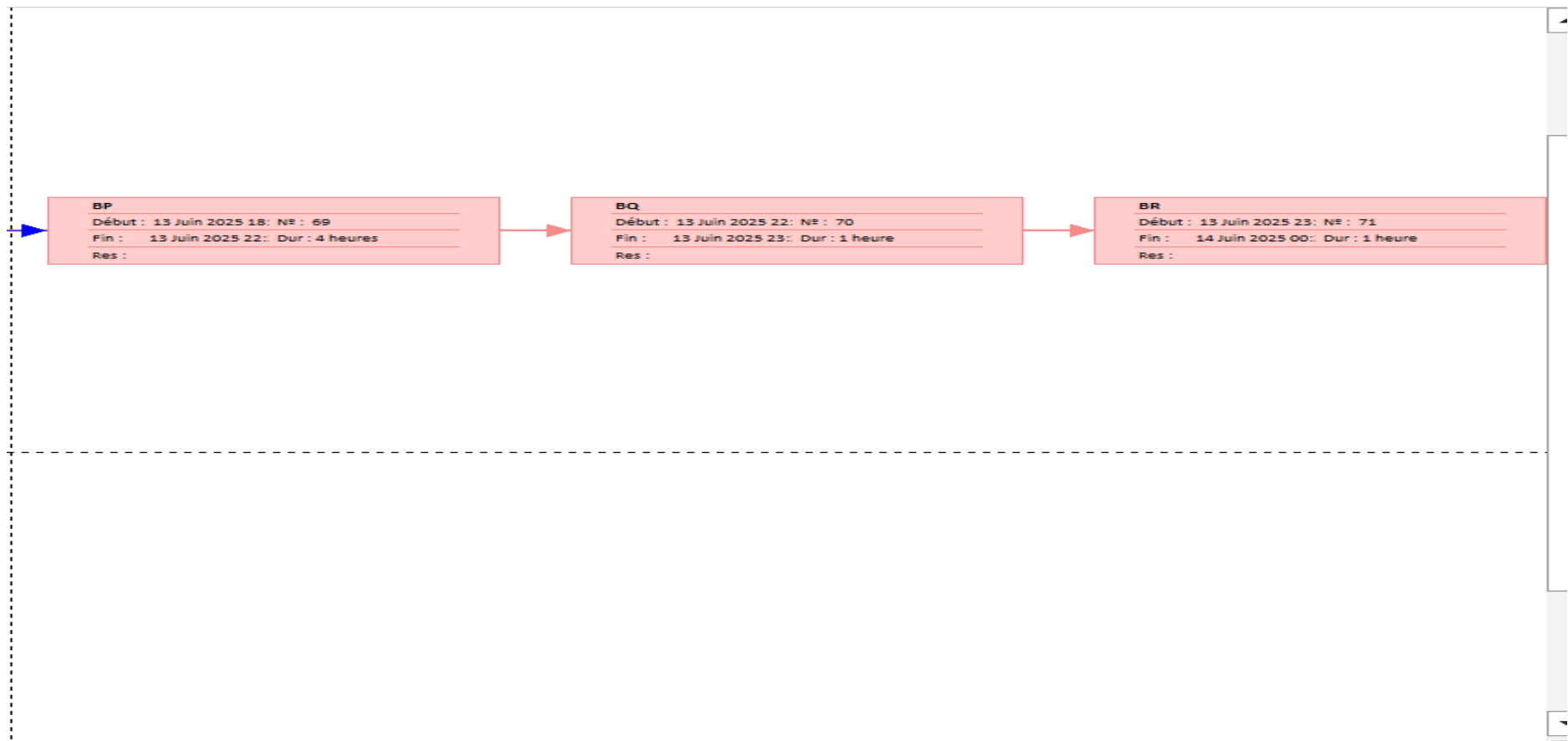


FIGURE 3.5 LE RESEAU PERT TEMPS NORMAL

Chemin critique : La séquence de tâches à marge totale nulle est :

E→S→T→U→V→W→X→Y→Z→AA→AF→AG→AH→AJ→AK→AL→AM→AN→AO→AQ→AR→AS→AT→AU→AV→AW→AX→AZ→AY→BC→BH→BG→BI→BL→BM→BP→BQ→BR→FIN

Avec une durée totale du projet : **207,5 Heures**

Toute modification de leur durée impacte la date de fin du projet.

La classe des tâches :

Niveau 1 {A, B, D, E}	Niveau 17 {AM}
Niveau 2 {C, F, G, J, K, M, S}	Niveau 18 {AN}
Niveau 3 {H, L, N, O, T}	Niveau 19 {AO}
Niveau 4 {I, P, Q, U}	Niveau 20 {AP, AO}
Niveau 5 {R, V}	Niveau 21 {AR}
Niveau 6 {W}	Niveau 22 {AS}
Niveau 7 {X, AB}	Niveau 23 {AT}
Niveau 8 {Y, AC}	Niveau 24 {AU}
Niveau 9 {Z, AD}	Niveau 25 {AV}
Niveau 10 {AA, AE}	Niveau 26 {AW}
Niveau 11 {AF}	Niveau 27 {AX}
Niveau 12 {AG}	Niveau 28 {AZ}
Niveau 13 {AH}	Niveau 29 {AY}
Niveau 14 {AI, AJ}	Niveau 30 {BA, BB, BC}
Niveau 15 {AK}	Niveau 31 {BD, BF, BH}
Niveau 16 {AL}	Niveau 32 {BE, BG}

Niveau 33 {BI}

Niveau 36 {BP}

Niveau 34 {BJ, BK, BL}

Niveau 37 {BQ}

Niveau 35 {BM, BN, BO}

Niveau 38 {BR}

1.2. Le PERT Temps aléatoire (Approche probabiliste)

Le PERT avec temps aléatoires (ou PERT probabiliste) est une variante du diagramme PERT (Program Evaluation and Review Technique) qui intègre des incertitudes dans les estimations des durées des tâches. Contrairement à une approche déterministe où les durées sont fixes, on utilise cette méthode pour modéliser les temps d'exécution des tâches, reflétant ainsi les aléas et incertitudes liés à un projet.

Plusieurs lois peuvent être testées mais on considère que les durées sont distribuées selon la loi Bêta (ce choix n'est pas obligatoirement le meilleur).

Pour anticiper les aléas, chaque tâche est associée à trois estimations de durée :

- Optimiste (a) : Meilleur scénario,
- Probable (m) : Scénario réaliste,
- Pessimiste (b) : Pire scénario.

Formules clés :

- Espérance mathématique : $E(x) = \frac{a+4m+b}{6}$

- Variance: $S^2(x) = \left(\frac{b-a}{6}\right)^2$

Application

Tableau 3.3 : Estimation des durées des tâches

TACHES	DUREE/H			E(x)	S ² (x)
CRITIQUES	ACCELEREE	MOYENNE	RETARDEE		
E	0,8	1	1,2	1	0,0044444444

CHAPITRE 3.2 : PLANIFICATION DE L'ARRET PROGRAMME

S	6	7	9	7,166666667	0,25
T	2	2	2	2	0
U	4	6	6	5,666666667	0,111111111
V	8	8	8	8	0
W	2	2,5	3	2,5	0,027777778
X	11	12	14	12,16666667	0,25
Y	2	3	3	2,833333333	0,027777778
Z	2	4	4,5	3,75	0,173611111
AA	5	8	8	7,5	0,25
AF	6	8	8	7,666666667	0,111111111
AG	6	8	10	8	0,444444444
AH	7	8	8,5	7,916666667	0,0625
AJ	3	4	5	4	0,111111111
AK	2,5	4	4	3,75	0,0625
AL	3	4	5	4	0,111111111

CHAPITRE 3.2 : PLANIFICATION DE L'ARRET PROGRAMME

AM	0,5	0,5	0,5	0,5	0
AN	6	6	6	6	0
AO	11	12	12	11,83333333	0,027777778
AQ	2,5	4	4	3,75	0,0625
AR	3	4	5	4	0,111111111
AS	1	1	1	1	0
AT	3,5	4	5	4,083333333	0,0625
AU	5,5	6	6,5	6	0,027777778
AV	0,5	0,5	0,5	0,5	0
AW	6	6	6	6	0
AX	11	12	12	11,83333333	0,027777778
AY	2	3	3	2,833333333	0,027777778
AZ	5	6	7	6	0,111111111
BC	6	6	6	6	0
BG	1,5	3	3	2,75	0,0625

CHAPITRE 3.2 : PLANIFICATION DE L'ARRET PROGRAMME

BH	6	6	6	6	0
BI	3	4	4,5	3,916666667	0,0625
BL	14	16	17,5	15,91666667	0,340277778
BM	11	12	12	11,83333333	0,027777778
BP	4	4	4	4	0
BQ	0,5	1	1	0,916666667	0,006944444
BR	0,6	1	1	0,933333333	0,004444444
TOTAL	174,4	207,5	222,7	204,5166667	2,960277777

$$\sum E(x) = m = 204,5166667 \text{ h}$$

$$\sum S(x)^2 = \sigma^2 = 2,960277777 \text{ donc } \sigma = 1,7205 \text{ h}$$

La probabilité d'achèvement du projet à une durée de **T=207,5** Heures est calculée via la loi normale, avec :

- Durée totale attendue $m = \sum E(x)$ des tâches du chemin critique,

- Écart-type total $\sigma = \sqrt{\sum S(x)^2}$.

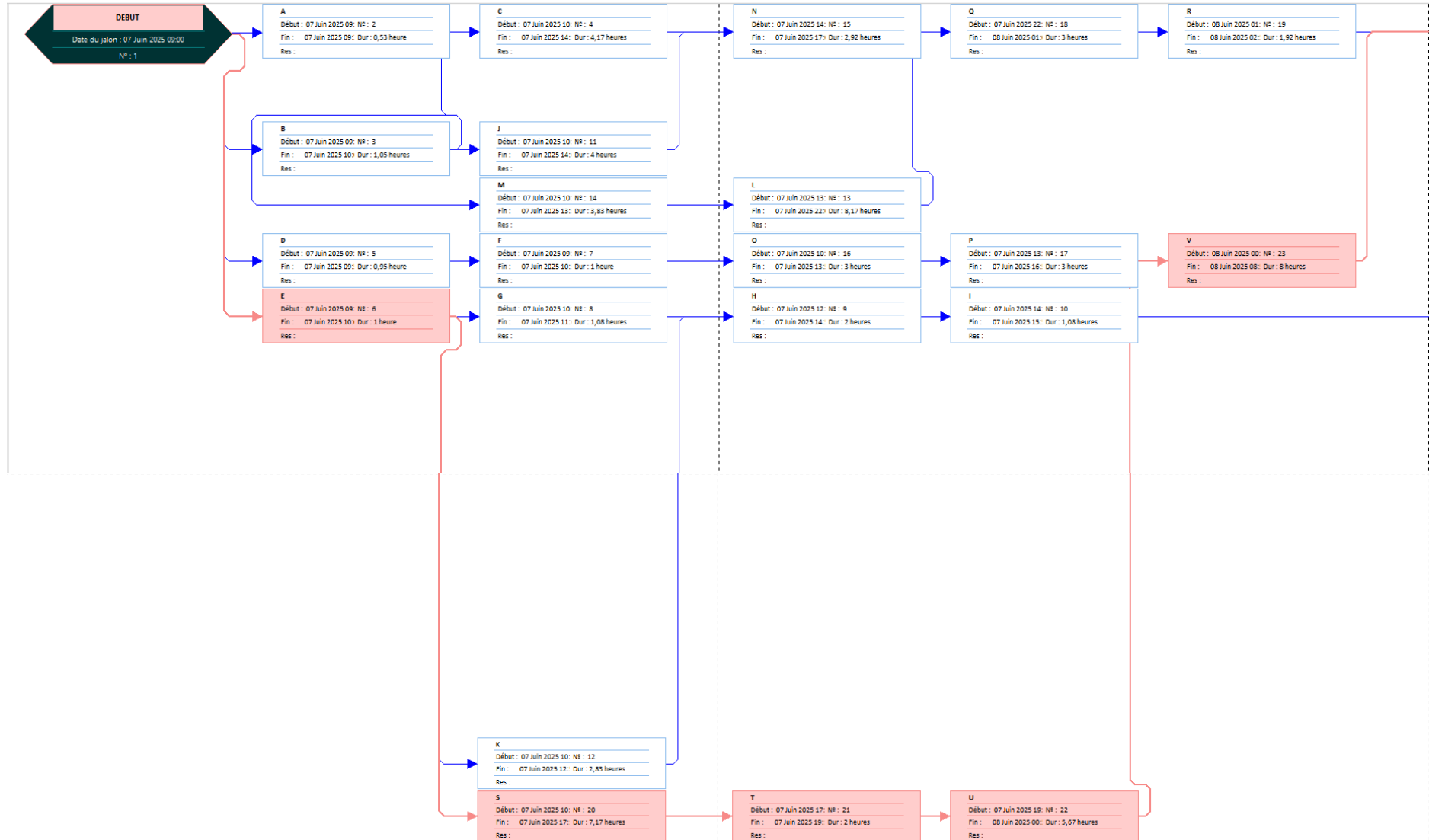
$$U = \frac{T-m}{\sigma} = \frac{207,5-204,5166667}{1,7205} = \mathbf{1,7339}$$

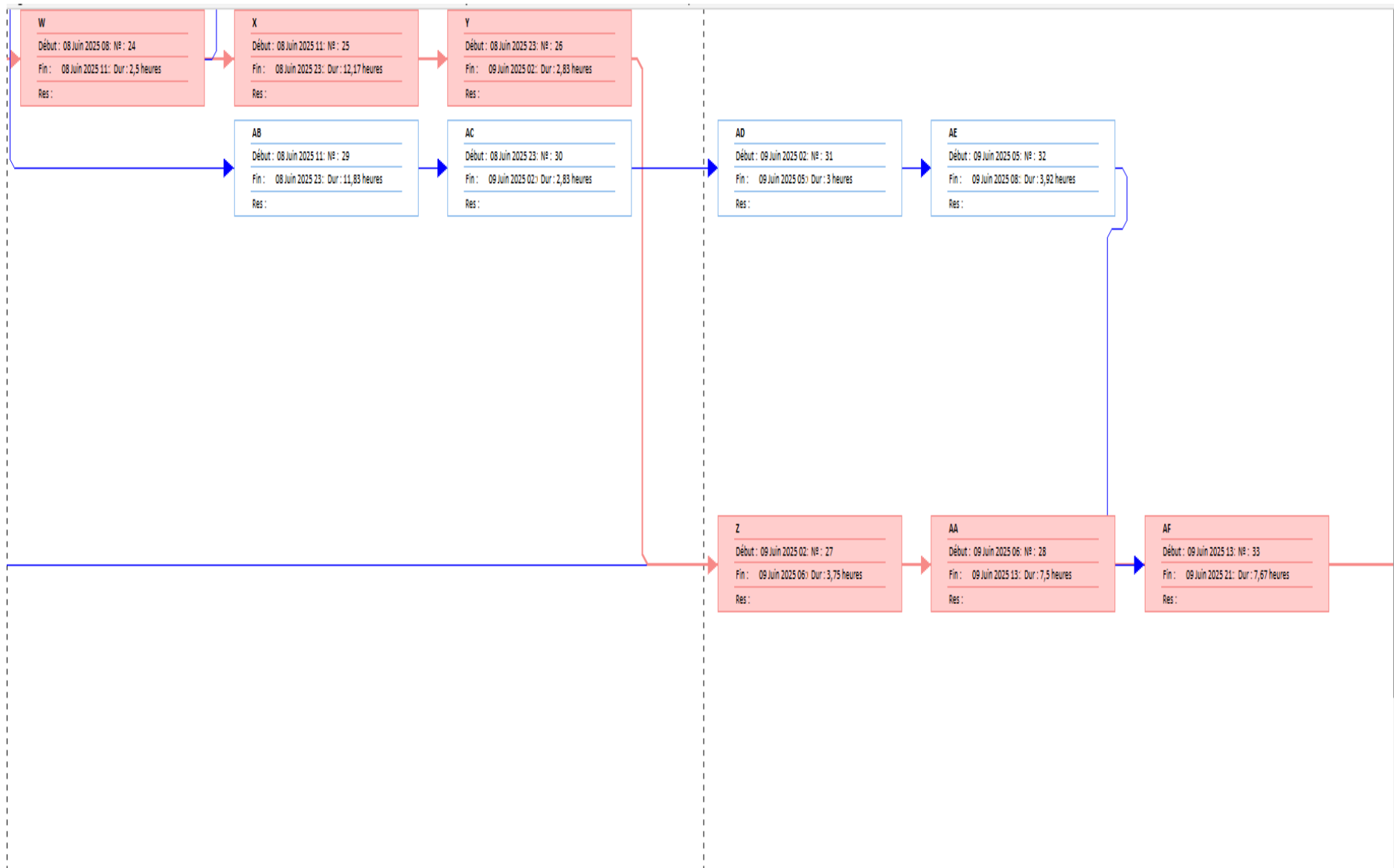
Selon la table de loi normale centrée réduite, la probabilité d'achèvement du projet à une durée de T=207,5 est de **95,82 %**.

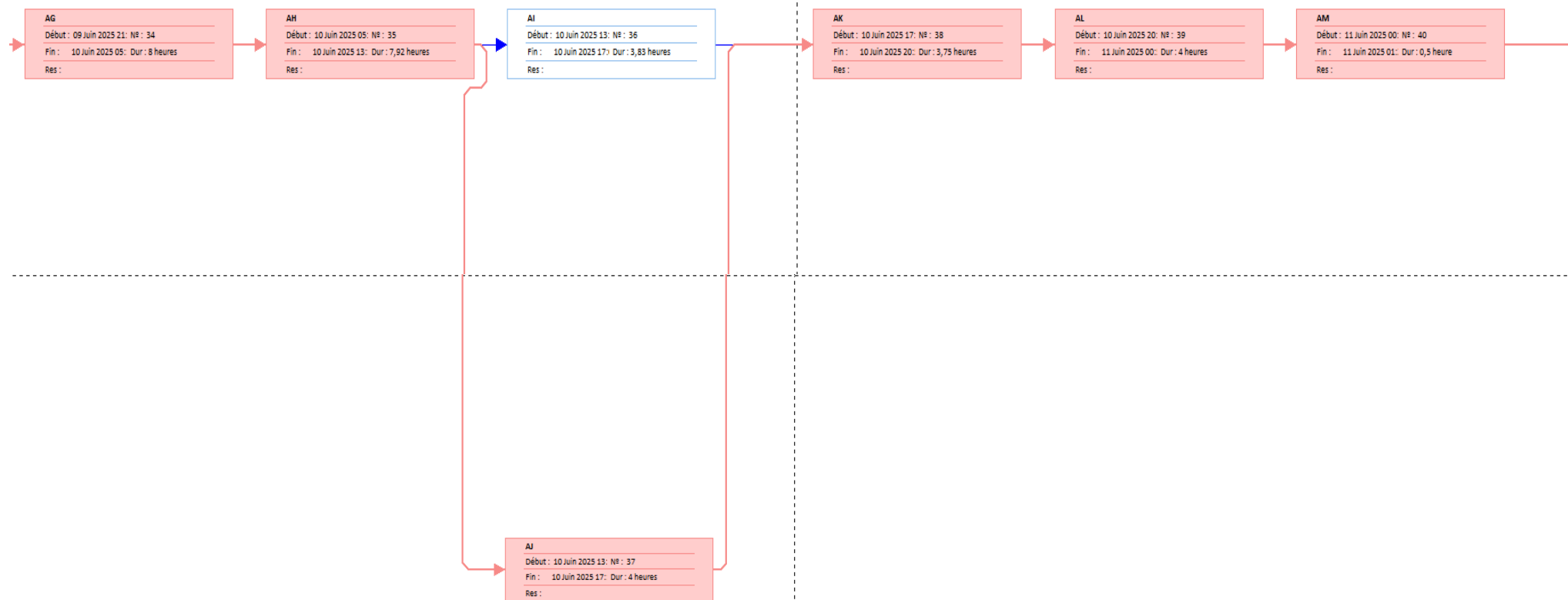
La probabilité d'achèvement du projet à une durée de **T=200** Heures est calculée via la loi normale :

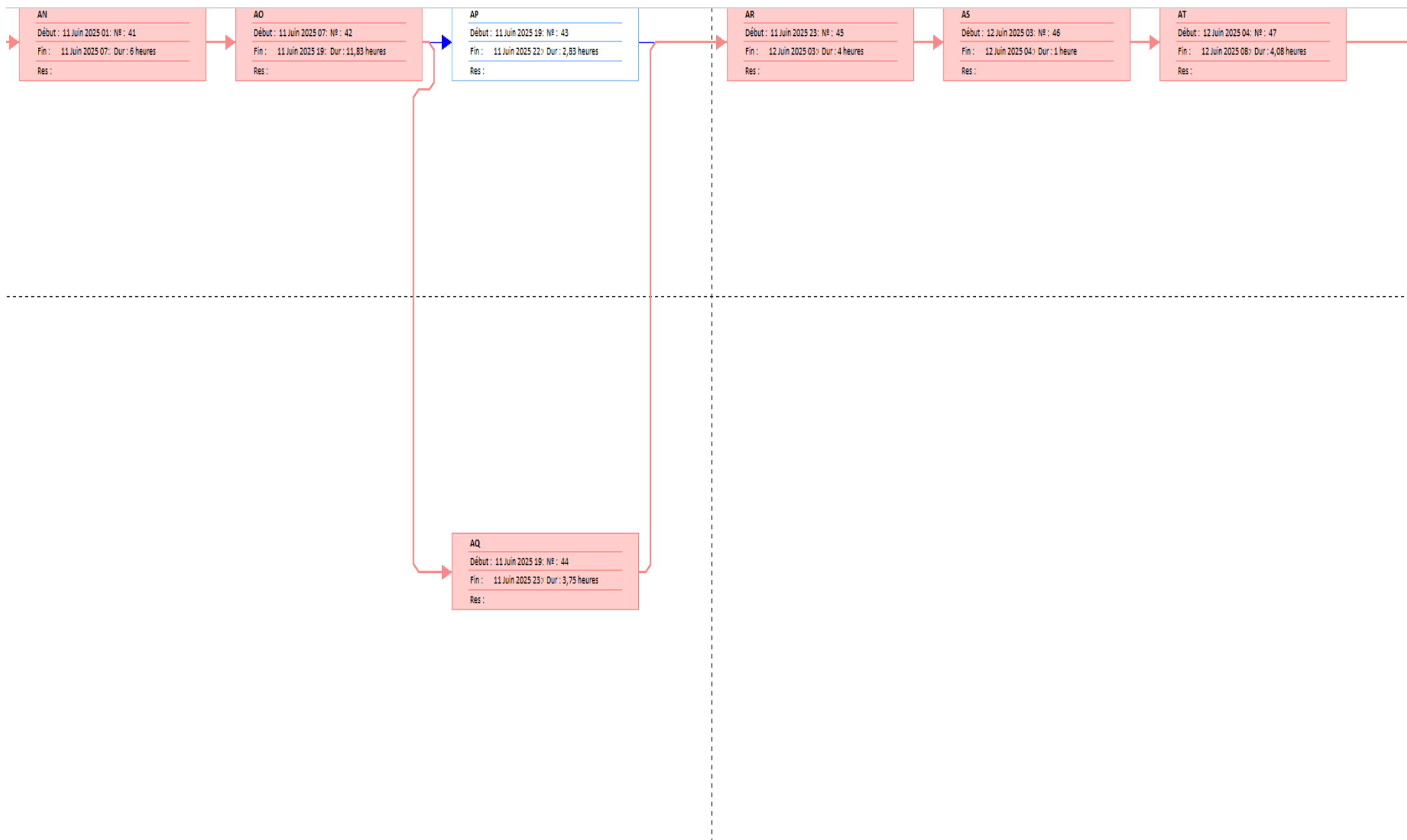
$$U = \frac{T-m}{\sigma} = \frac{200-204,5166667}{1,7205} = -2,62$$

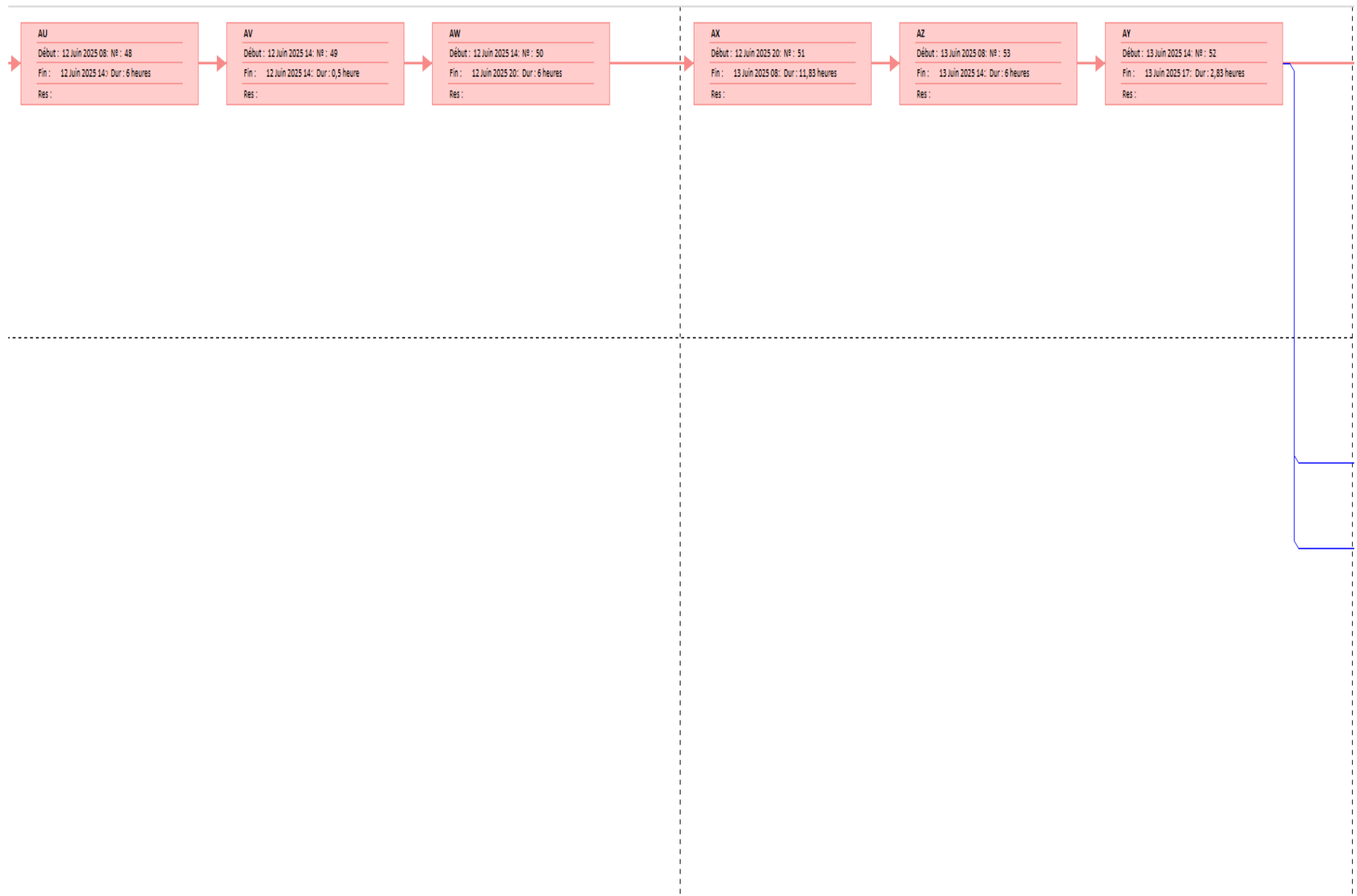
Selon la table de loi normale centrée réduite, la probabilité d'achèvement du projet à une durée de $T=200$ est de **$100-99,56 = 0,44 \%$** .

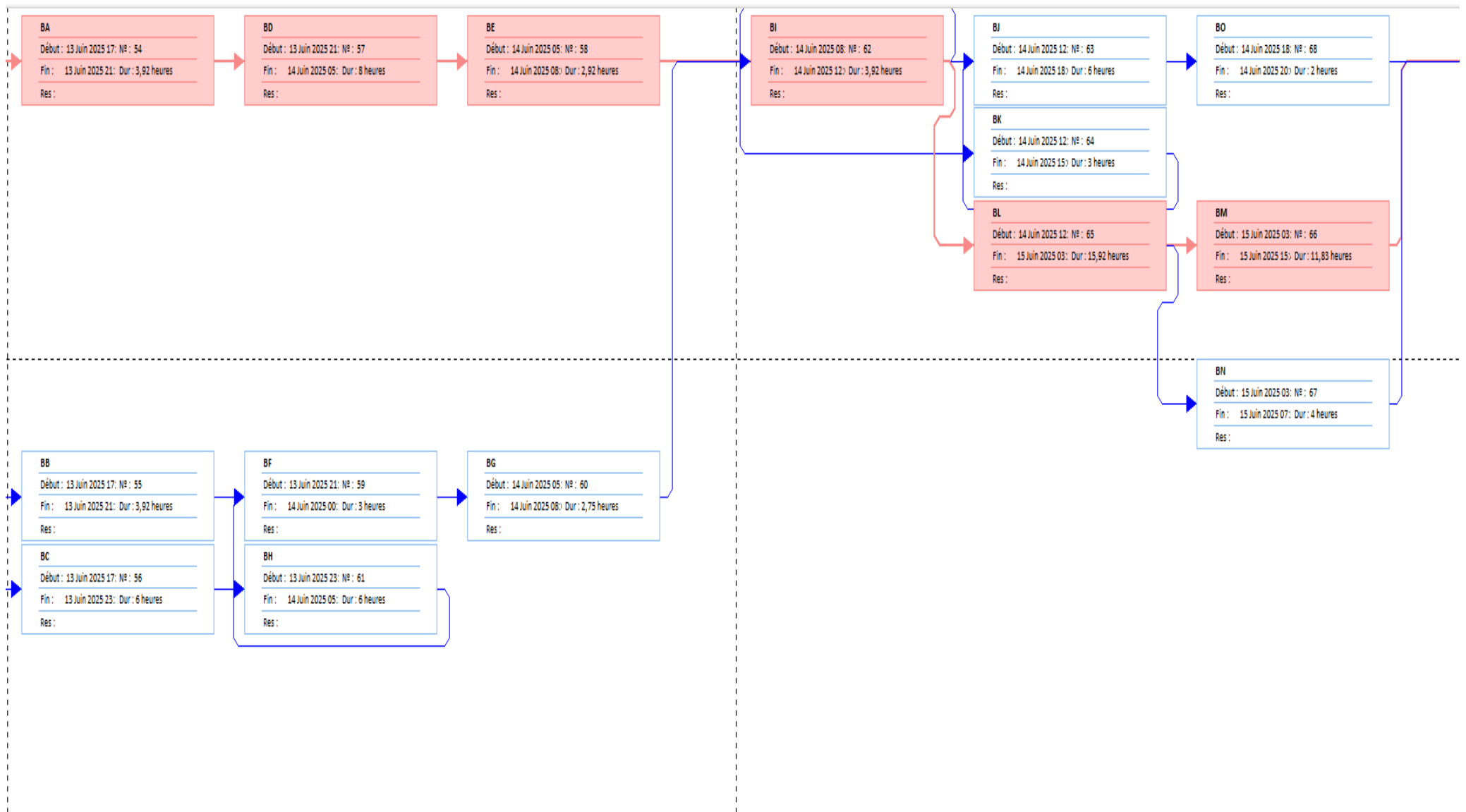












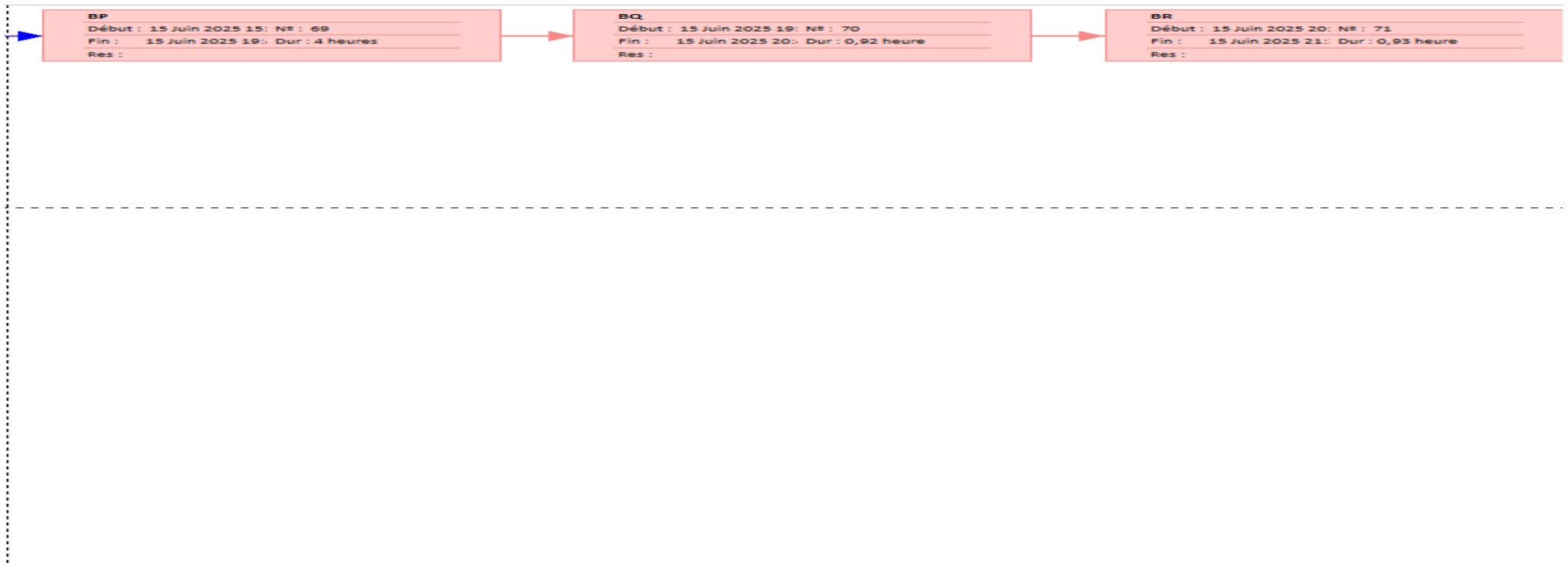


Figure 3.6 LE RESEAU PERT TEMP ALEATOIR

1.3. Diagramme de Gantt

Il visualise l'ordonnancement des tâches sur un calendrier, avec :

- Barres horizontales positionnées selon les dates $\text{Début}_{\text{tot}}$ et Fin_{tot} ,
- Flèches de dépendance entre tâches.

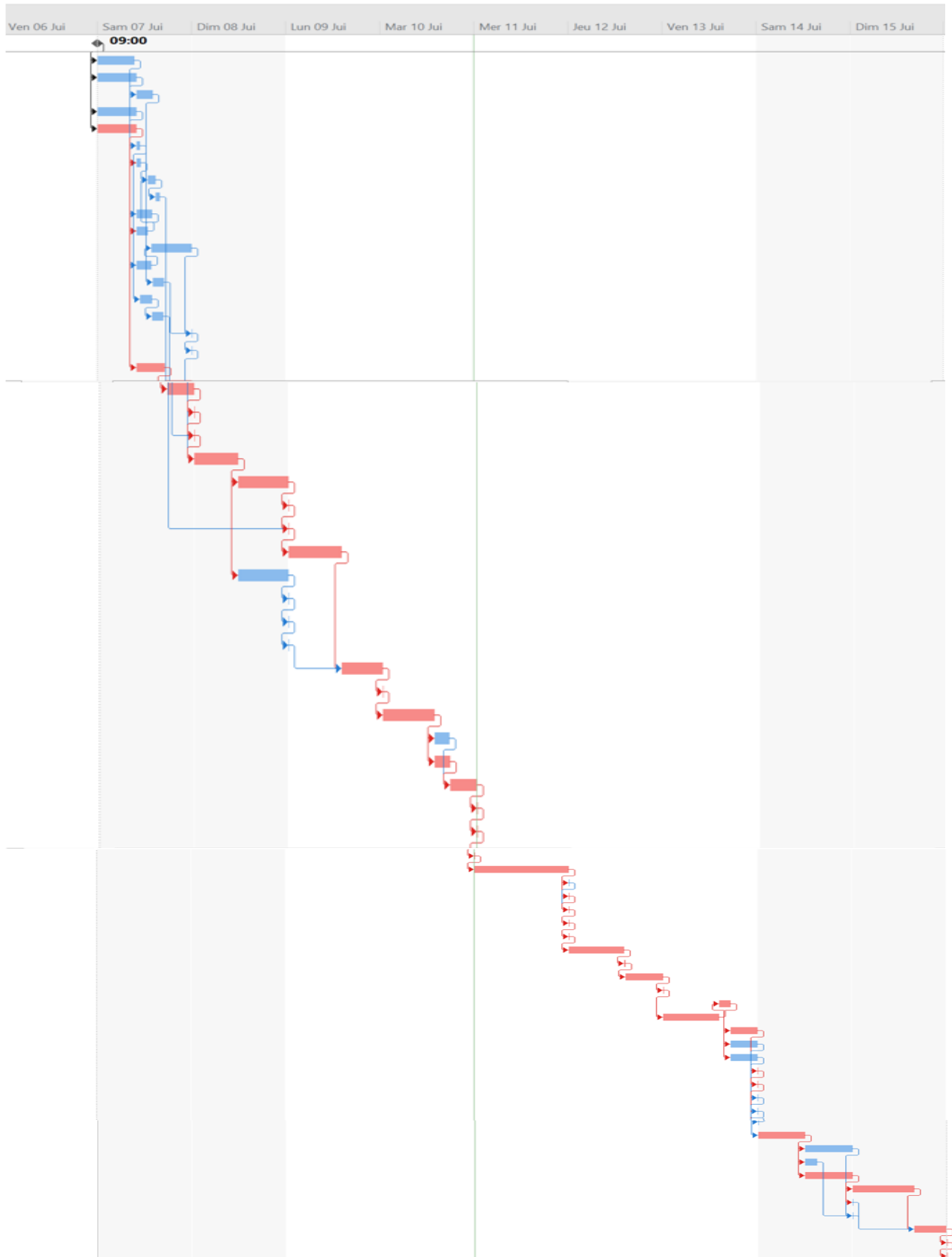


Figure 3.7 DIAGRAMM DE GANTT

1.4 Optimisation des coûts (PERT Coût)

Mise en œuvre dans le cas de diminution du coût du projet :

Pour ce faire, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes :

- Résolution du Pert Temps en prenant en compte les durées accélérées des tâches
- Diminution du coût du programme en allongeant les durées des opérations non critiques et ce :
 - En annulant les ML dans la mesure du possible
 - En annulant les MT

$$GAIN\ UNITAIRE = \frac{\text{Cout accéléré} - \text{Cout normal}}{\text{Durée normal} - \text{Durée accéléré}}$$

Tableau 3.4 : cout accéléré et cout normal

TACHES	T/ANTECEDENTS	PROGRAMME ACCELERE		PROGRAMME NORMAL		GAIN UNITAIRE
		DUREE	COUT	DUREE	COUT	
A	/	0,4	4000	0,5	2125	18750
B	/	0,8	6500	1	4250	11250
C	A,B	4	17000	4	17000	0
D	/	0,5	7000	1	4250	5500
E	/	0,8	7500	1	4250	16250
F	D	1	4250	1	4250	0
G	E	0,5	6000	1	4250	3500
H	G	1,5	10000	2	8500	3000
I	H	1	4250	1	4250	0
J	B	3,5	19000	4	17000	4000
K	E	1,5	15000	3	12750	1500
L	M	8	34000	8	34000	0
M	B	2,5	21000	4	17000	2666,666667
N	J,C	2	14500	3	12750	1750
O	F	3	12750	3	12750	0

P	O	3	12750	3	12750	0
Q	L,M,N	2,5	15500	3	12750	5500
R	M	1	9500	2	8500	1000
S	E	6	40000	8	34000	3000
T	S	2	34000	2	8500	0
U	T	4	28000	6	25500	1250
V	U,P	8	38000	8	34000	0
W	V	2	12000	2,5	10625	2750
X	W	11	55000	12	51000	4000
Y	X	2	14500	3	12750	1750
Z	Y,I	2	19000	4	17000	1000
AA	Z	5	39000	8	34000	1666,6666 67
AB	W,I	11	55000	12	51000	4000
AC	AB	2	14000	3	12750	1250
AD	AC	2	16000	3	12750	3250
AE	AD	2,5	20500	4	17000	2333,3333 33
AF	AA,AE	6	37000	8	34000	1500
AG	AF	6	37500	8	34000	1750
AH	AG	7	38500	8	34000	4500
AI	AH	2	19500	4	17000	1250
AJ	AH	3	18500	4	17000	1500
AK	AI,AJ	2,5	20000	4	17000	2000
AL	AK	3	21000	4	17000	4000
AM	AL	0,5	2125	0,5	2125	0
AN	AM	6	25500	6	25500	0
AO	AN	11	54000	12	51000	3000
AP	AO	2	15500	3	12750	2750
AQ	AO	2,5	22000	4	17000	3333,3333 33
AR	AQ,AP	3	20000	4	17000	3000
AS	AR	1	4250	1	4250	0

AT	AS	3,5	18500	4	17000	3000
AU	AT	5,5	28500	6	25500	6000
AV	AU	0,5	2125	0,5	2125	0
AW	AV	6	25500	6	25500	0
AX	AW	11	53000	12	51000	2000
AY	AZ	2	15500	3	12750	2750
AZ	AX	5	28000	6	25500	2500
BA	AY,Q	3	19000	4	17000	2000
BB	AY,R	3	19500	4	17000	2500
BC	AY	6	29000	6	25500	0
BD	BA	8	37000	8	34000	0
BE	BD	2,5	16000	3	12750	6500
BF	BB	3	14500	3	12750	0
BG	BF	1,5	15000	3	12750	1500
BH	BC	6	28500	6	25500	0
BI	BH,BG,BE	3	19500	4	17000	2500
BJ	BI	5	28000	6	25500	2500
BK	BI	3	14000	3	12750	0
BL	BI	14	75000	16	68000	3500
BM	BL	11	56000	12	51000	5000
BN	BL	4	20000	4	17000	0
BO	BK, BJ	1,5	10500	2	8500	4000
BP	BO, BM, BN	4	17000	4	17000	0
BQ	BP	0,5	7000	1	4250	5500
BR	BQ	0,6	6500	1	4250	5625
		265,6	1544000	319	1355750	

Le tableau montre que les coûts varient par tâche, reflétant la complexité et les ressources nécessaires.

Annulation des marges libres

Tableau 3.5 : annulation des marge libres

Tâches	G.U	D _{MAX}	Durée accélérée	Allongement Possible	ML	Décision	Gain
A	18750	0,5	0,4	0,1	0,4 heure	0,1	1875
B	11250	1	0,8	0,2	0 heure	0	0
C	0	4	4	0	0 heure	0	0
D	5500	1	0,5	0,5	0 heure	0	0
F	0	1	1	0	0 heure	0	0
G	3500	1	0,5	0,5	1 heure	0,5	1750
H	3000	2	1,5	0,5	0 heure	0	0
I	0	1	1	0	31 heures	0	0
J	4000	4	3,5	0,5	0,5 heure	0,5	2000
K	1500	3	1,5	1,5	0 heure	0	0
L	0	8	8	0	0 heure	0	0
M	2666,66	4	2,5	1,5	0 heure	0	0
N	1750	3	2	1	4,5 heures	1	1750

CHAPITRE 3.2 : PLANIFICATION DE L'ARRET PROGRAMME

O	0	3	3	0	0 heure	0	0
P	0	3	3	0	5,3 heures	0	0
Q	5500	3	2,5	0,5	0 heure	0,5	2750
R	1000	2	1	1	6 heures	1	1000
AB	4000	12	11	1	0 heure	0	0
AC	1250	3	2	1	0 heure	0	0
AD	3250	3	2	1	0 heure	0	0
AE	2333,33	4	2,5	1,5	2,5 heures	1,5	3499,995
AP	2750	3	2	1	0,5 heures	0,5	1375
BB	2500	4	3	1	0 heure	0	0
BF	0	3	3	0	6 heures	0	0
BJ	2500	6	5	1	0 heure	0	0
BK	0	3	3	0	2 heures	0	0
BN	0	4	4	0	7 heures	0	0
BO	4000	2	1,5	0,5	18,5 heures	0,5	2000
						6,1	17999,995

Les marges libres annulées sont celles de la tâches **J** et **AP**.

- On applique un allongement de 6,1 heures pour un gain de 17999,99 DZD

Annulation des marges totales

Tableau 3.6 : annulation des marge totales

Tâches	G.U	D _{MAX}	Durée actuelle	Allongement Possible	MT	Décision	Gain
A	18750	0,5	0,5	0	8,3 heures	0	0
B	11250	1	0,8	0,2	4,5 heures	0,2	2250
C	0	4	4	0	8 heures	0	0
D	5500	1	0,5	0,5	5,3 heures	0,5	2750
F	0	1	1	0	5,3 heures	0	0
G	3500	1	1	0	31,5 heures	0	0
H	3000	2	1,5	0,5	31 heures	0,5	1500
I	0	1	1	0	31 heures	0	0
J	4000	4	4	0	8 heures	0	0
K	1500	3	1,5	1,5	31 heures	1,5	2250
L	0	8	8	0	4,5 heures	0	0
M	2666,66	4	2,5	1,5	4,5 heures	1,5	3999,99
N	1750	3	3	0	8 heures	0	0
O	0	3	3	0	5,3 heures	0	0
P	0	3	3	0	5,3 heures	0	0
Q	5500	3	3	0	4,5 heures	0	0
R	1000	2	2	0	4,5 heures	0	0
AB	4000	12	11	1	1 heure	1	4000
AC	1250	3	2	1	1 heure	1	1250
AD	3250	3	2	1	1 heure	1	3250
AE	2333,33	4	4	0	1 heure	0	0
AP	2750	3	2,5	0,5	1 heure	0,5	1375
BB	2500	4	3	1	6 heures	1	2500
BF	0	3	3	0	6 heures	0	0

BJ	2500	6	5	1	18 heures	1	2500
BK	0	3	3	0	20 heures	0	0
BN	0	4	4	0	7 heures	0	0
BO	4000	2	2	0	18 heures	0	0
						9,7	27624,99

1.5 Gestion des ressources (PERT Charge)

MISE EN ŒUVRE

1ère phase: Placer les tâches critiques en fonction de leur date de début au plus tôt croissante

2ème phase : Placer les autres tâches en fonction de :

- ✓ Leur date de début au plus tôt minimum
- ✓ À égalité de Date de début au plus tôt, on choisit la plus contraignante au niveau des ressources
- ✓ La tâche choisie est placée au plus tôt en respectant le niveau des ressources
- ✓ Si une ou plusieurs contraintes ne permettent pas de placer une tâche avant sa Date de fin au plus tard, il faut rechercher un nouvel agencement en évitant autant que possible un allongement du délai total dans ce cas on passe à la phase 3

3ème Phase : Recherche d'un nouvel agencement

La solution qui consiste à allonger la durée du projet n'est pas forcément la meilleure.

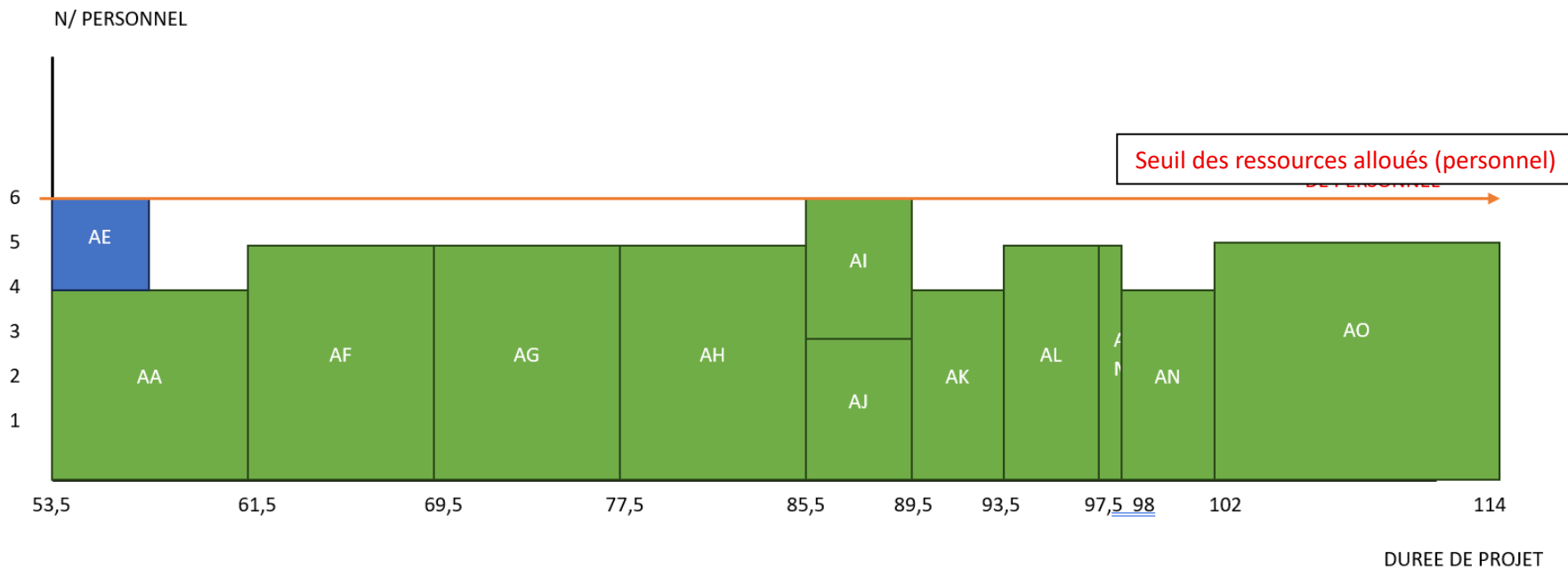
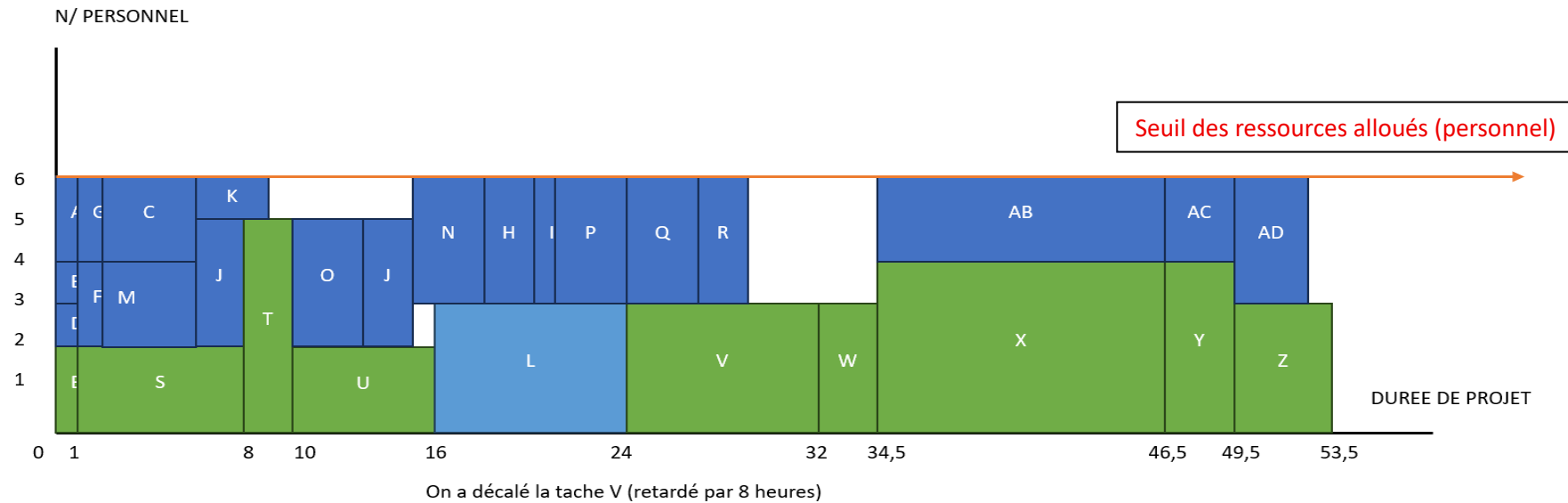
D'abord vérifier que le déplacement d'une tâche non critique déjà placée ne permet pas le positionnement de notre tâche A

La simulation commence en effaçant progressivement toutes les tâches non critiques du planning et en essayant de placer la tâche A sans dépasser le niveau de ressources disponibles

Sinon le délai du projet doit être augmenté (en décalant une tâche critique. Il sera décalé d'une durée:

Inférieure à celle de A si le dépassement de ressources ne touche pas toute la durée de la tâche
A Égale à celle de A si le dépassement de ressources touche toute la durée de la tâche A

CHAPITRE 3.2 : PLANIFICATION DE L'ARRET PROGRAMME



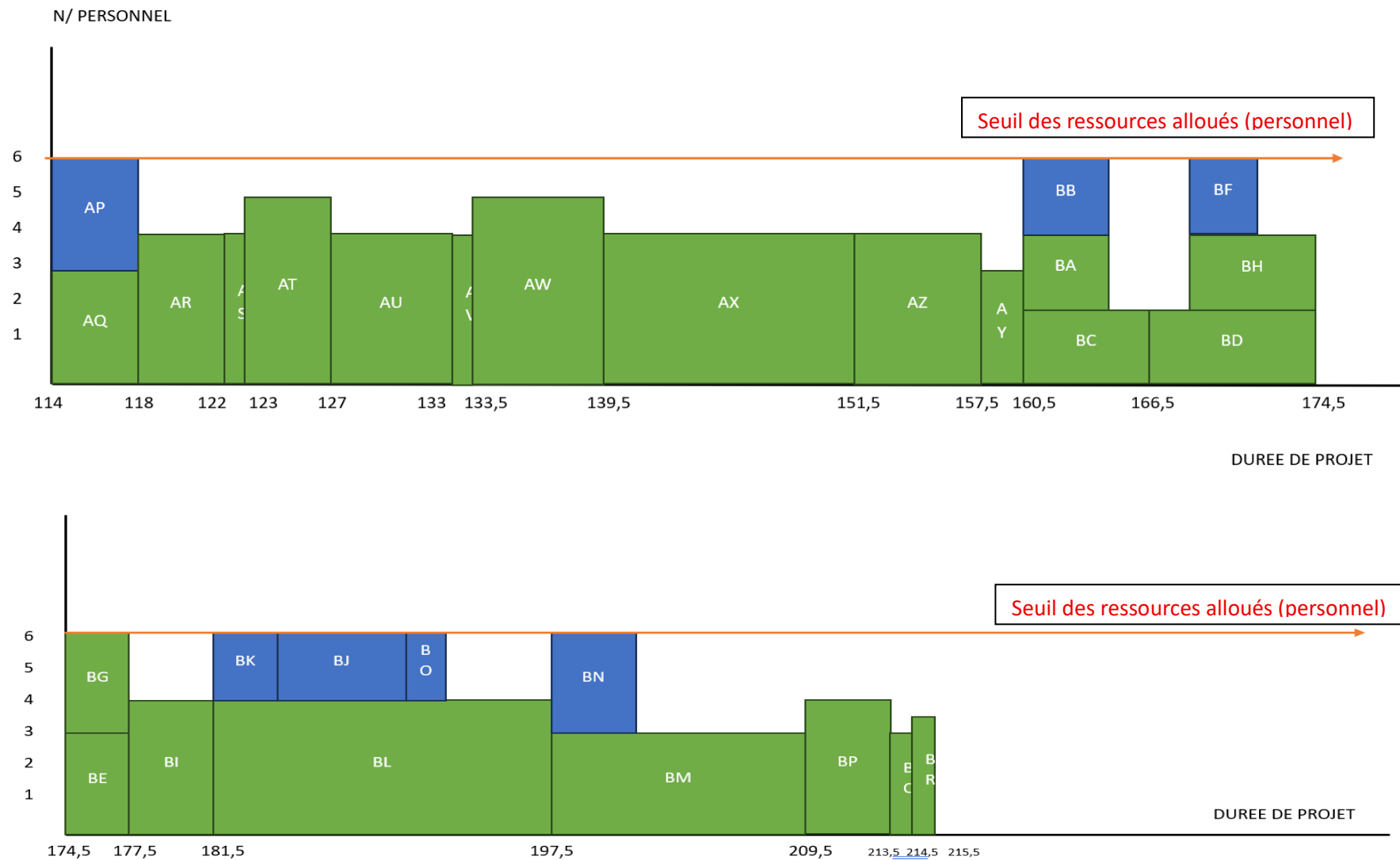


FIGURE 3.8 : Le nivellement des ressources

Conclusion générale

Conclusion

À travers ce mémoire consacré à la gestion d'un arrêt programmé – appliqué au remplacement du banc alimentateur de la cage quarto à SIDER El Hadjar – nous avons mis en évidence l'importance d'une planification rigoureuse, d'une coordination interdisciplinaire, et de l'utilisation d'outils méthodologiques avancés tels que le PERT, le Gantt, ou encore la GMAO. L'analyse détaillée des 70 tâches critiques et leur ordonnancement logique illustrent concrètement les enjeux, les contraintes, mais aussi les opportunités d'optimisation qu'offre une gestion structurée des arrêts programmés.

Cependant, au-delà des aspects techniques et organisationnels, ce travail a également souligné des éléments humains et managériaux fondamentaux pour le succès ou l'échec d'un tel projet.

Les **facteurs clés de réussite** identifiée incluent notamment :

- l'implication active des membres de l'équipe projet,
- la disponibilité des ressources,
- la précision des estimations de coûts,
- la compétence technique du personnel,
- la qualité de la planification et du suivi,
- ainsi qu'une communication fluide et un objectif commun bien défini.

À l'inverse, les **causes fréquentes d'échec** observées dans les projets industriels sont tout aussi révélatrices :

- le manque de clarification des besoins,
- le choix inapproprié du chef de projet,
- une implication tardive des parties prenantes,
- l'imprécision des tâches,
- l'absence de méthode de management adaptée,
- et parfois un désengagement progressif des équipes ou du top management.

Ces éléments confirment que la réussite d'un arrêt programmé ne repose pas uniquement sur des compétences techniques, mais également sur des **capacités de gestion de projet, de leadership et de collaboration interfonctionnelle**.

En conclusion, ce mémoire démontre que la gestion performante d'un arrêt programmé, dans un environnement industriel complexe comme celui de SIDER El Hadjar, repose sur une **vision globale** intégrant la technique, l'humain, la stratégie et l'organisation. Savoir anticiper les risques, mobiliser les acteurs au bon moment, planifier avec précision et tirer les leçons des expériences passées constitue la clé pour transformer ces interruptions temporaires en leviers durables de performance et de modernisation industrielle.

References

- [1] Moubray, J. (1997). Reliability-Centered Maintenance. Industrial Press
- [2] Mobley, R. K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance. Elsevier. 2 Kelly, A. (2006). Strategic Maintenance Planning. Elsevier.
- [3] Stamatis, D. H. (2003). Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. ASQ Quality Press.
- [4] Hillson, D. (2016). Managing Risk in Projects. Routledge.
- [5] Kerzner, H. (2017). Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. John Wiley & Sons.
- [6] Smith, R. (2004). Lean Maintenance: Reduce Costs, Improve Quality, and Increase Market Share. Elsevier.
- [7] Grieves, M. (2017). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. Whitepaper.
- [8] ISO 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. International Organization for Standardization.