



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Minier

Option : Electromécanique Minière

Etude comparative de la sureté de fonctionnement des camions dans les conditions minières

Par

BENAMARA Lamya et OULEM Sami

Devant le jury :

HOUAM Ala	Président	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
TALEB Mounia	Encadreur	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
DERBAL Chemsseddine	Co-encadreur	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
LOUAFI Messaoud	Examineur	PR	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2025/2026



Année universitaire : 2025/2026

Tébessa le :

Lettre de soutenabilité


Noms et prénoms des étudiants :

1. Oullem Sami
2. Benamara Hanja
3. _____

Niveau : Master Option : Electromécanique Minière

Thème : Etude comparative de la susete de fonctionnement
dans les conditions Minières

Nom et prénom de l'encadreur : Dr. Taleb Mounia

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
<u>Tous les chapitres</u>	

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة).....
الصفة : طالبة أستاذ باحث، باحضر دامت :

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم :
المسجل بمعهد
و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :
.....
.....

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 02-06-2026

2026 جوان



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (م)..... رقم..... اسم..... بمس..... الصفة : طالب، استاذ باحث، باحث دكتوراه : طالب.....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 40403264ك و الصادرة بتاريخ 12.01.2022 - 20.2.2022

المسجل بمعهد قسم والاصح و

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

..... Etude comparative de la survie de fonctionnement
..... des Camions dans les conditions minières

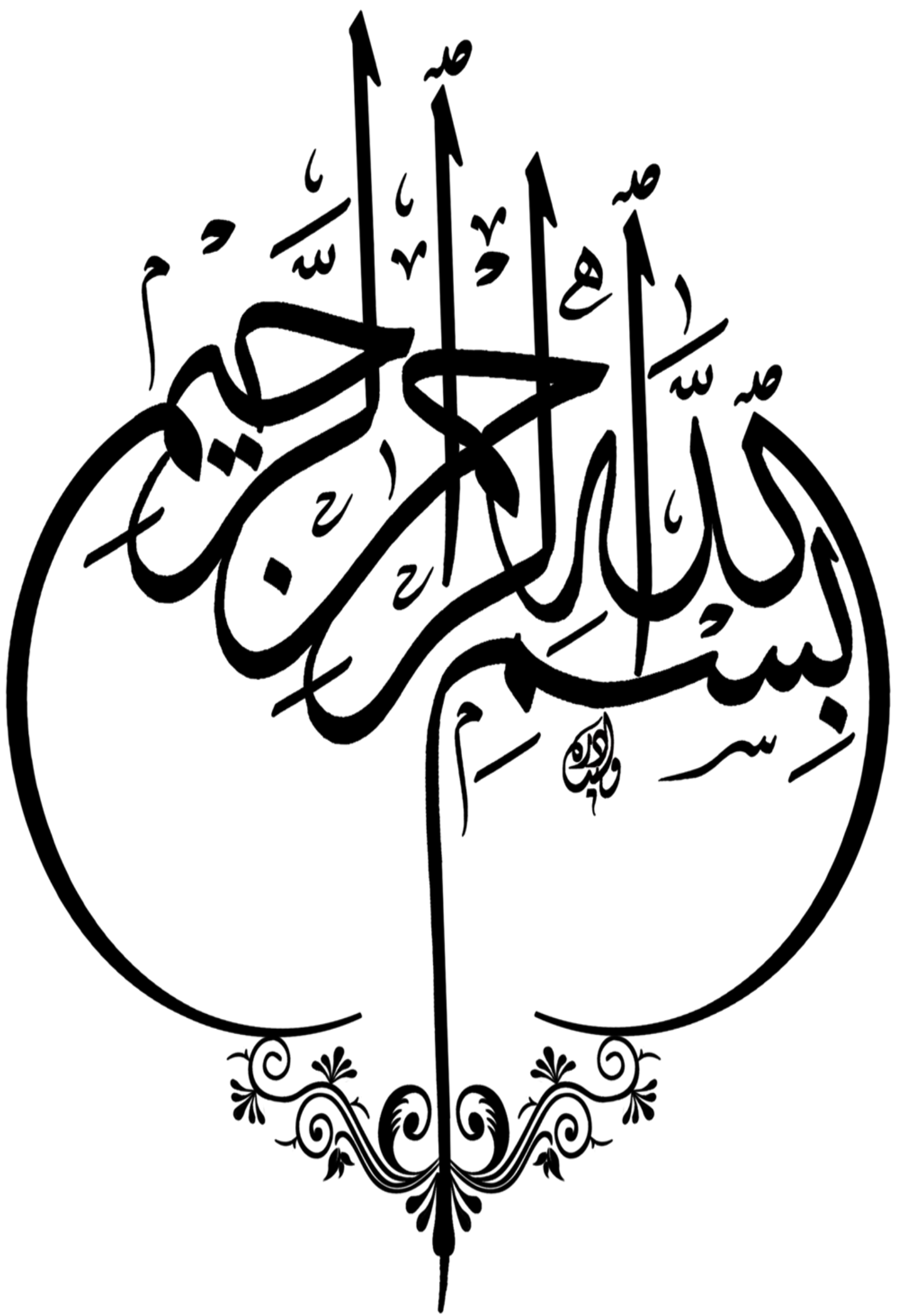
أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 02 - 06 - 2026

02 جوان 2026

امضاء المعنى (م)
.....
.....

من رئيس المجلس العلمي البلدي وبتفويض من
متصرف إقليم تبسة
سعدى نور الدين



Remerciements

Louange à Dieu, Seigneur des mondes, Seigneur du Grand Trône, qui nous a donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous remercions les Deux chers docteurs et superviseurs thèse, Dr Taleb Mounia et Dr Derbal Chemsseddine qui nous ont accordé leur précieux temps.

*Nous exprimons nos sincères remerciements et notre appréciation à la direction de la société minière de **Bir El-Ater** pour l'opportunité précieuse qu'elle nous a offerte en nous offrant la possibilité d'entreprendre une formation pratique.*

Cette expérience a été très importante pour nous, car elle a

Contribué à développer nos compétences et notre compréhension approfondie du travail sur le terrain.

Nous sommes reconnaissants des efforts déployés par la direction pour faciliter cette opportunité et

nous sommes impatients de travailler à nouveau avec vous à l'avenir. Merci beaucoup pour

L'hospitalité et le soutien que vous nous avez apporté pendant notre formation.

Nous adressons également nos remerciements à toute la famille universitaire, y compris les travailleurs, le personnel et les professeurs, sans oublier de mentionner Monsieur le Directeur de l'Institut des Mines, Zoubir Aoulmi, qui nous a également soutenu dans ce parcours académique.

Dedicace

Mon cher père, combien j'ai souhaité que tu sois à mes côtés en ce moment, partageant ma joie et étant fier de moi comme tu l'as toujours été. Cette réussite est le fruit de tes efforts, et c'est un cadeau que j'envoie à ton âme, en espérant qu'il te parvienne chargé de tout mon amour et de toute ma nostalgie. Que Dieu t'accorde Sa miséricorde et t'accueille au paradis.

À ma chère mère, merci pour tout l'amour, la patience et les sacrifices que tu m'as offerts. C'est grâce à toi que j'ai pu atteindre cette réussite. Que Dieu te protège et t'accorde une longue vie, car tu es ce que j'ai de plus précieuse après mon père, que Dieu ait son âme.

Mes chers frères et sœurs : Nacer Eddine, Amel, Nabila, Sara, Kamilia.

Cette réussite est aussi la vôtre, et ma joie n'est complète qu'avec votre présence dans mon cœur. Merci pour votre soutien constant et vos encouragements qui ne m'ont jamais fait défaut. Vous avez été la force qui m'a poussée à persévérer et à aller jusqu'au bout pour atteindre ce moment.

*Aux amis de mon père : Adouane Abdel Salam, Zitoun
Kheireddine et Hani..*

Je vous adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude pour votre soutien et votre présence aux côtés de mon père, qu'Allah lui fasse miséricorde, ainsi que pour votre soutien envers moi. Je n'oublierai jamais votre bienveillance et votre aide. Que Dieu vous récompense et fasse de cela une source de bénédictions dans votre vie.

À mes chères amies, merci pour votre soutien et vos encouragements qui ont été pour moi un véritable appui sur le chemin de la réussite. Vous avez été de belles compagnes qui ont allégé mes difficultés, et je n'oublierai jamais votre présence à mes côtés à chaque moment.

Lamyra



Dédicace

À celle qui m'a donné de la tendresse, petite et grande, à celle que je suis heureuse de rencontrer et triste de quitter, à celle qui m'a guéri quand j'étais malade, à celle dont l'imagination ne me quitte jamais, à celle qui me donne l'amour, la tendresse et la miséricorde et compense ceux que j'ai perdus, à celle sous les pieds de qui réside mon paradis et dans les yeux de qui réside mon réconfort, à celle qui continue grâce à ses prières Et je prie pour qu'elle reste pour moi là. La personne la plus précieuse que j'ai aimé et dont les lèvres prononçaient le nom, à celui qui m'a donné la chose la plus précieuse de l'existence, la vie, à l'œil avec lequel je regarde et vois, à l'esprit avec lequel je pense et réponds, à l'celle dont la satisfaction est le secret de la vie, la source de la tendresse, « ma mère », que Dieu la guérisse.

À celui qui m'a donné du courage et une forte personnalité, à celui qui m'a donné l'opportunité d'apprendre, au symbole dont je me vante en tout temps et en tout lieu, à celui qui m'a donné sans me lasser et sans en tenir compte, à la bougie toujours allumée du don, à celui qui m'a inculqué l'amour de l'aventure, à la volonté par laquelle je vis Il a « mon père », que Dieu le protège.

À celles à qui je respecte et apprécie, aux fleurs dont le parfum embaume mon ciel, à celles à qui je dis je t'aime, à celles que je chéris et dont je suis fier, « mes sœurs », chacune par son nom., et je n'oublie pas de citer leurs maris, chacun par son nom : Mourad, Bilal, Tayeb et Tawfiq Que Dieu les aide et les protège de tout mal.

À la façade vers laquelle je reviens chaque jour, à celle en qui j'ai trouvé du soutien, à la personne que je trouve prête dans toutes les situations à mes côtés, à celle en qui j'ai trouvé un frère, un ami qui m'a toujours été cher, « mon frère », « Massinissa », que Dieu le protège.

Aux poussins de mon cœur « Bisan, Ghofrane, Ayat, Ihyana, Abrar, Sedjod, Manar, Yasser, Ayoub, Islam » et je n'oublierai pas en mentionnant le cher poussin « Mounib El-Rahman »

À ceux que je considère comme des modèles à l'université, à ceux avec qui je me sens chez moi, Dr Derbal Chemseddine, Dr Taleb Mounia et toute la famille universitaire ».

À ma collègue qui s'efforce d'être la meilleure, à celle qui nous donne de la détermination, à celle qui nous fortifie et nous insuffle un esprit d'équipe, à celle qui peu importe les temps qui changent, elle ne change pas, à celle qui ne perd jamais le sourire de son visage, « Benamara Lamya ». Que Dieu lui accorde le succès, protège sa famille.

Sami

Sommaire

Remerciements	VI
Dédicace.....	VII
Sommaire	IX
Liste des figures	XV
Liste des tableaux	XVIII
Liste des abréviations.....	XIX
Résumé.....	XIXI
I	

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I

Cadre géologique et contexte minier de Djebel Onk

I.1. Situation Géographique et Cadre Naturel	5
I.2. Géologie du gîte.....	6
I.2.1. Géologie Régionale	7
I.2.1.1. Lithostratigraphie de la région de Djebel Onk.....	7
I.2.1.1.1. Le Cycle Marin (Crétacé Supérieur à Éocène Moyen)	7
I.2.1.1.2. La Couverture Continentale (Miocène à Quaternaire).....	7
I.2.1.2. Stratigraphie détaillée.....	7
I.2.1.2.1. Yprésien	7
I.2.1.2.1.1. Yprésien inférieur	7
I.2.1.2.1.2. Yprésien supérieur.....	7
I.3. Géomorphologie de Djebel El Onk (Algérie)	10
I.3.1. Processus morphogénétiques dominants.....	10
I.4. Secteurs Miniers et Ressources en Phosphate.....	10
I.5. Importance Économique du Gisement de Djebel Onk.....	11
I.5.1. Des réserves mondiales colossales	11
I.5.2. Le Projet Intégré Phosphates (PPI).....	11
I.6. Organisation générale de l'entreprise minière.....	11
I.6.1. Structure de la mine	11
I.6.2. Organigramme.....	12
I.7. Description du parc matériel	12

I.8. Déterminations des paramètres d'exploitation	16
I.8.1. Angle du talus.....	16
I.8.2. Largeur de l'enlevure.....	16
I.8.3. Les paramètres du tas de roches	17
I.8.3.1. Hauteur du tas	17
I.8.3.2. La largeur du tas	17
I.8.4. Détermination de la largeur de la plate-forme de travail maximale	18
I.8.4.1. Largeur de la plate-forme de travail	18
I.8.5. Le bloc	19
I.8.5.1. Longueur d'un bloc donné sur un gradin	19
I.8.6. Calcul de l'avancement annuel du front de travail [11].....	19
I.9. Ouverture	19
I.9.1. Ouverture du champ de la carrière	19
I.9.2. Culbutage (Travaux préparatoires).....	20
I.9.3. Calcul du rendement du bulldozer	20
I.10. Forage et tir	22
I.10.1. Calcul de l'indice de forabilité :.....	22
I.10.2. Choix de diamètre du trou	22
I.10.3. Longueur de sous-forage.....	23
I.10.4. Longueur du trou	24
I.10.5. Consommation spécifique d'explosif	24
I.10.6. Ligne de résistance au pied.....	24
I.10.7. Calcul de W (pour vérifier les conditions de sécurité du tir).....	25
I.10.8. Calcul de m' (nouvelle valeur du coefficient de rapprochement)	25
I.10.9. Quantité de charge Q_{ch}.....	25
I.10.10. Calcul de la longueur du charge l_{ch}.....	25
I.10.11. Longueur de bourrage.....	26
I.10.12. Débit moyen de la masse minière	26
I.10.13. Le volume du bloc à tirer	26
I.10.14. La longueur totale des trous forés nécessaires pour un bloc à tirer.....	26
I.10.15. Le nombre des trous	26
I.10.16. Le nombre nécessaire des sondeuses pour desservir un seul engin d'extraction.....	27
I.10.16.1. D'après la capacité du godet de la chargeuse	27

I.10.16.2. D’après la capacité de la benne de camion.....	27
I.10.16.3. D’après l’ouverture de la trémie du concasseur.....	27
I.11. Chargement.....	27
I.11.1. Introduction.....	27
I.11.2. Calcul du chargement.....	28
I.11.2.1. Rendement de la pelle (R_p).....	28
I.11.2.2. Rendement mensuel.....	29
I.11.2.3. Rendement annuel de la pelle.....	29
I.11.2.4. Calcul du nombre des pelles.....	29
I.11.2.5. Calcul du nombre total des pelles.....	29
I.12. Transport.....	30
I.12.1. Introduction.....	30
I.12.2. Mode de transport utilisé à Djebel Onk (Kef Essnoun).....	31
I.12.2.1. Engins de transport utilisés à Djebel Onk (Kef Essnoun).....	31
I.12.3. Mode de transport utilisé à El Malabiod.....	31
I.12.3.1. Engins de transport utilisés à El Malabiod.....	31
I.12.4. Justification technique du choix.....	32
I.12.4.1. Adéquation avec la méthode d’exploitation.....	32
I.12.4.2. Compatibilité avec les engins de chargement.....	32
I.12.4.3. Adaptation aux conditions géotechniques et topographiques.....	32
I.12.4.4. Performance économique.....	32
I.12.5. Calcul du transport par camions.....	33
I.12.5.1. Temps de cycle.....	33
I.12.5.2. Temps de marche.....	33
I.12.5.2.1. Temps de marche en charge.....	33
I.12.5.2.2. Temps de marche à vide.....	34
I.12.5.3. Temps de chargement.....	34
I.12.5.4. Nombre de godets.....	34
I.12.5.5. Nombre de cycles possibles.....	34
I.12.5.6. Nombre de cycles nécessaires pour déplacer la charge.....	35
I.12.5.7. Nombre de camions nécessaires.....	35
I.12.5.8. Nombre total de camions.....	35
I.12.5.9. Production réelle.....	35
I.12.6. Rôle du transport par camions dans la productivité.....	37

I.12.6.1. La Flexibilité Opérationnelle.....	37
I.12.6.1.1. Flexibilité opérationnelle et adaptation géologique.....	37
I.12.6.2. Le Maillon Déterminant du Rythme (Cadence)	38
I.12.6.3. Impact sur la chaîne de production	38
I.12.6.4. Impact sur les Coûts Opérationnels (OPEX).....	38
I.12.6.5. Interface entre la Mine et le Traitement.....	39
I.12.6.6. Transition vers l'Automatisation.....	39
I.13. Groupe de gisement	39
I.14. Conclusion	41

Chapitre II

Lois et caractéristiques de la fiabilité

II.1. Introduction	43
II.2. Notions générales de défaillance	43
II.3. Les concepts de base de la sûreté de fonctionnement (SDF)	44
II.3.1. La fiabilité.....	45
II.3.1.1. Définition de la fiabilité	45
II.3.1.2. Les différentes sortes de fiabilité	46
II.3.1.3. Représentation Graphique De $R(t)$, $F(t)$	46
II.3.1.4. Caractéristiques de la fiabilité	47
II.3.1.5. Les indicateurs de fiabilité	48
II.3.2. La disponibilité.....	49
II.3.2.1. Définition	49
II.3.2.2. Différents niveaux de la disponibilité.....	49
II.3.3. La Maintenabilité.....	50
II.3.4. La sécurité.....	51
II.4. Les principales lois utilisées en fiabilité.....	52
II.4.1. Les lois discrètes	53
II.4.1.1. Loi uniforme	53
II.4.1.2. Loi binomiale.....	53
II.4.1.3. La loi binomiale négative.....	54
II.4.1.4. Loi de Bernoulli.....	54
II.4.1.5. Loi de Poisson	54
II.4.2. Les lois continues.....	55
II.4.2.1. La loi Gamma	55

II.4.2.2. Loi inverse gamma	55
II.4.2.3. La loi normale	56
II.4.2.4. Loi exponentielle	56
II.4.2.5. Loi de Weibull	58
II.4.2.5.1. Papier De Weibull	63
II.4.2.5.2. Echelles du papier de weibull.....	64
II.5. Approche De La Fiabilité Par Les Probabilités.....	66
II.5.1. Probabilité :	66
II.5.2. Fonction requise	67
II.5.3. Conditions d'utilisation.....	67
II.5.4. Période de temps.....	67
II.6. Objectifs et intérêts de la fiabilité	68
II.7. Conclusion.....	69

Chapitre III

Étude de la fiabilité appliquée aux carrières : cas de Djebel Onk et d'El Ma Labiod

III.1. Introduction.....	71
III.2. Présentation des sites d'étude	71
III.2.1. Mine de phosphate de Djebel Onk	71
III.2.2. Cimenterie d'El Ma Labiod.....	72
III.3. Collecte et traitement des données	73
III.3.1. Source des données	73
III.3.2. Préparation des données	73
III.4. Étude théorique et statistique	73
III.4.1. Cas de la mine de Djebel Onk	73
III.4.1.1. Camion Caterpillar 773F	73
III.4.1.1.1. Étude des heures d'arrêt par nature de panne	75
III.4.1.1.2. Étude du nombre des pannes par nature	76
III.4.1.2. Camion TEREX TR60	77
III.4.1.2.1. Étude des heures d'arrêt par nature de panne	78
III.4.1.2.2. Étude du nombre des pannes par nature	80
III.4.1.3. Étude comparative des deux engins de la mine de Djebel Onk.....	81
III.4.1.3.2. Étude du nombre des pannes par nature	83
III.4.2. Cas de la carrière de El Ma Labiod	85
III.4.2.1. Camion Caterpillar 770G	85

III.4.2.1.1. Étude des heures d'arrêt par nature de panne	86
III.4.2.1.2. Etude du nombre des pannes par nature	88
III.5. Étude comparative des deux camions du type CAT des deux carrières de Djebel Onk et El Ma Labiod	89
III.5.1. Étude des heures d'arrêt par nature de panne	89
III.5.2. Étude du nombre des pannes par nature	92
III.6. Méthode d'Ishikawa	93
III.6.1. Définition	93
III.6.2. Application de la méthode d'Ishikawa (5M) aux « autres pannes » des camions miniers.....	94
III.6.3. Interprétation.....	95
III.6.3.1. Machine (Matériel).....	95
III.6.3.2. Méthode.....	96
III.6.3.3. Main-d'œuvre	97
III.6.3.4. Milieu (Environnement).....	98
III.6.3.5. Matière.....	98
III.7. Application de la loi de Weibull	99
III.7.1. Introduction	99
III.7.2. Méthodologie de calcul.....	99
III.7.2.1. Calcul du TBF.....	99
III.7.2.2. Étude de la fiabilité entre les deux camions (CAT773F et CAT770G).....	112
III.7.2.3. Étude de la maintenabilité entre les deux camions (CAT773F et CAT770G)	114
III.7.2.4. Étude de la disponibilité entre les deux camions (CAT773F et CAT770G)	116
III.8. Conclusion	117
Conclusion générale	122
Bibliographie.....	124
Les Annexes	127

Liste des figures

Figure.I.1 : Carte de situation géographique de Djebel Onk.	02
Figure.I.2 : Carte géologique de Djebel El Onk.	03
Figure.I.3 : Coupes stratigraphiques et structurales des flancs Nord et Sud de Djebel Onk (E.R.E.M, 1986).	05
Figure.I.4 : Carte structurale de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa – Méthlaoui – Onk (Aissaoui, 1984).	05
Figure.I.5 : Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk – Algérie orientale– (D'après RANCHIN, 1963).	06
Figure.I.6 : Organigramme du complexe minier Djebel Onk.	09
Figure.I.7 : situation de la carrière de Kef Essenoun partie Nord-Ouest au 31/12/2025	11
Figure.I.8 : coupes exploitation situation 31/12/2025. Partie Nord-Ouest de Kef Essenoun (bloc A, bloc B)	12
Figure.I.9 : plan topographique de Kef Essenoun	17
Figure.I.10 : Bulldozer sur pneus Cat 824	19
Figure .I.11 : la stéréographie de Kef Essenoun	20
Figure.I.12 : pelle Cat 390F utilisée pour le chargement	26
Figure.I.13 : camion Cat773F	32
Figure.I.14 : camion TEREX TR60	32
Figure.I.15 : camion Cat 770G	33
Figure.I.16 : Essais géomécaniques réalisées au niveau de laboratoire du l'institut des mines	36
Figure II.1 : Les éléments clés de la sûreté de fonctionnement	41
Figure II.2 : Courbes paramétrique	43
Figure II.3 : Les interactions entre les grandeurs de la sûreté De fonctionnement (SDF)	48
Figure II.4 : distribution des fonctions de la loi exponentielle	54
Figure II.5 : Représentation du paramètre de forme de la distribution β .	55

Liste des figures

Figure II.6 : Représentation du paramètre de position γ	56
Figure II.7 : Représentation du paramètre d'échelle η	56
Figure II.8 : courbe en baignoire de Variation du taux de défaillance	58
Figure II.9 : Densités de Weibull pour différentes valeurs de β	58
Figure II.10 : Papier de Weibull	61
Figure II.11 : Recherche de paramètre gamma γ	62
Figure II.12 : Recherche de bêta β	62
Figure II.13 : courbe fonction de distribution /de répartition	64
Figure III.1: Camion Caterpillar 773F	70
Figure III.2 : Evolution du temps d'arrêt de Caterpillar 773F	71
Figure III.3 : Evolution du nombre des pannes de Caterpillar 773F	72
Figure III.4 : Camion TEREX TR60	73
Figure III.5: Evolution du temps d'arrêt de TEREX TR60	74
Figure III.6: Evolution du nombre des pannes de TEREX TR60	76
Figure III.7: Heures d'arrêt par nature de deux engins ensemble	77
Figure III.8: Camion Caterpillar 770G	79
Figure III.9: Evolution du temps d'arrêt de Caterpillar 770G	80
Figure III.10: Evolution du nombre des pannes de Caterpillar 770G	82
Figure III.11 : Heures d'arrêt par nature des deux engins ensemble	83
Figure III.12: Nombre de pannes par nature pour les deux engins de production	86
Figure III.13: Diagramme d'Ishikawa (autres pannes)	89
Figure III.14: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 773F – 2023	95
Figure III.15: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 773F – 2024	97
Figure III.16: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 773F – 2025	99

Liste des figures

Figure III.17: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 770G – 2023	101
Figure III.18: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 770G – 2024	103
Figure III.19: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 770G – 2025	105
Figure III.20: Diagramme de la fiabilité des deux engins pendant 3 années	106
Figure III.21: Diagramme de la maintenabilité des deux engins pendant 3 années	108
Figure III.22: Diagramme de la disponibilité des deux engins pendant 3 années	109

Liste des tableaux

Tableau I.1 : L'état actuel du parc matériel (Djebel el Onk)	10
Tableau II.1 : Interprétation du paramètre de forme β de la loi de Weibull	55
Tableau II.2 : Paramètres de la loi de Weibull	59
Tableau III.1: Comparaison des conditions d'exploitation	68
Tableau III.2: Historique des pannes de Caterpillar 773F	70
Tableau III.3: Historique des pannes de camion TEREX TR60	74
Tableau III.4: Étude des heures d'arrêt par nature des deux engins	77
Tableau III.5: Historique des pannes de Caterpillar 770G	80
Tableau III.6: Étude d'heures d'arrêt par nature de Deux engins	83
Tableau III.7: Étude du Nombre de pannes par nature pour les deux engins de production	85
Tableau III.8: Tableau de TBF du camion Caterpillar 773F en 2023	94
Tableau III.9: Tableau de TBF du camion Caterpillar 773F en 2024	96
Tableau III.10: Tableau de TBF du camion Caterpillar 773F en 2025	98
Tableau III.11: Évolution des paramètres de fiabilité de CAT773F	99
Tableau III.12: Tableau de TBF du camion Caterpillar 770G en 2023	100
Tableau III.13: Tableau de TBF du camion Caterpillar 770G en 2024	102
Tableau III.14: Tableau de TBF du camion Caterpillar 770G en 2025	104
Tableau III.15: Évolution des paramètres de fiabilité de CAT770G	105
Tableau III.16: La fiabilité des deux engins pendant 3 années	106
Tableau III.17: la maintenabilité des deux engins pendant 3 années	107
Tableau III.18: la disponibilité des deux engins pendant 3 années	108

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation
NF : Norme Française
SDF : Sûreté de Fonctionnement
FDMS : Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité et Sécurité
FMD : Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité
RAM : Reliability, Availability and Maintainability
RAMS: Reliability, Availability, Maintainability and Safety
F(t) : Fonction de Répartition
f(x) : Fonction de Densité
R(t) : Fonction de Fiabilité
 λ : Taux de Défaillance
 μ : Taux de Réparation
X : Variable Aléatoire Non Négative
 β : Paramètre de Forme (Weibull)
 η : Paramètre d'Échelle (Weibull)
 γ : Paramètre de Position (Weibull)
MTTF: Mean Time To Failure
MTBF: Mean Time Between Failures
TBF: Time Between Failures
TCBF: Time Between Consecutive Failures
MTTR: Mean Time To Repair
MDT: Mean Down Time
PDF : Probabilité de Défaillance
Loi Exp : Loi Exponentielle
Log N : Loi Log-Normale
G : Loi Gamma
A : Valeur du Tableau de Weibull
 C^nk : Nombre de Combinaisons de k Défaillances parmi n Essais
V(x) : Variance
E(x) : Espérance Mathématique
 σ : Écart Type

Liste des Abréviations

GMAO : Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur

LCC : Life Cycle Cost

CMMS: Computerized Maintenance Management System

Résumé

Ce travail porte sur l'optimisation de la performance des flottes de transport minier à travers l'analyse de la Sûreté de Fonctionnement (SDF). L'étude part du postulat que la fiabilité des camions n'est pas une donnée statique du constructeur, mais une variable dynamique influencée par les conditions opérationnelles extrêmes (pistes, charges, climat).

La méthodologie adoptée repose sur l'exploitation des données historiques de pannes issues du système GMAO, suivie d'un traitement statistique basé sur des modèles probabilistes, notamment la loi de Weibull, afin de caractériser les taux de défaillance et les mécanismes de vieillissement. Une analyse comparative est réalisée pour évaluer les écarts de performance entre un modèle de camion opérant dans des contextes géologiques distincts.

Les résultats obtenus permettent de proposer des recommandations techniques visant à améliorer les méthodes et stratégies de maintenance utilisées, à maximiser le taux de disponibilité et à réduire le coût global de possession des équipements.

Mots clés :

Sûreté de fonctionnement, Fiabilité, Camion, Loi de Weibull, Défaillance, GMAO, Flottes, Disponibilité technique, Coût du Cycle de Vie (LCC)

Abstract

This work focuses on optimizing the performance of mining transport fleets through the analysis of Dependability (RAMS - Reliability, Availability, Maintainability, and Safety). The study is based on the premise that truck reliability is not a static figure provided by the manufacturer, but a dynamic variable influenced by extreme operational conditions (haul roads, payloads, climate).

The adopted methodology relies on leveraging historical failure data from the CMMS (Computerized Maintenance Management System), followed by statistical processing based on probabilistic models—notably the Weibull distribution—to characterize failure rates and aging mechanisms. A comparative analysis is conducted to evaluate performance gaps for a specific truck model operating in distinct geological contexts.

The results obtained allow for the proposal of technical recommendations aimed at improving maintenance methods and strategies, maximizing the availability rate, and reducing the Total Cost of Ownership (TCO) of the equipment.

Keywords:

Reliability Engineering (Dependability), Reliability, Mining Trucks, Weibull Distribution, Failure Analysis, Computerized Maintenance Management System (CMMS), Transport Fleet, Technical Availability, Life Cycle Cost (LCC).

ملخص

يركز هذا العمل على تحسين أداء أساطيل النقل المنجمي من خلال تحليل سماحية التشغيل (SDF). تنطلق الدراسة من فرضية أن موثوقية الشاحنات ليست معطًى ثابتاً من الشركة المصنعة، بل هي متغير ديناميكي يتأثر بالظروف التشغيلية القاسية (المسالك، الأحمال، والمناخ).

تعتمد المنهجية المتبعة على استغلال البيانات التاريخية للأعطال المستخرجة من نظام التسيير المدعم بالحاسوب للصيانة (GMAO)، يتبعها معالجة إحصائية مبنية على نماذج احتمالية، لا سيما قانون "وايبول (Weibull)"، وذلك لتوصيف معدلات الفشل وآليات التقادم. كما أُجري تحليل مقارن لتقييم فوارق الأداء لنوع واحد من الشاحنات يعمل في سياقات جيولوجية مختلفة.

تسمح النتائج المحصل عليها بتقديم توصيات تقنية تهدف إلى تحسين أساليب واستراتيجيات الصيانة المستخدمة، ورفع معدل جاهزية، وتقليل التكلفة الإجمالية لملكية المعدات.

كلمات مفتاحية:

هندسة الموثوقية (الاعتمادية) ; الموثوقية ; شاحنات التعدين ; توزيع وايبول ; تحليل الأعطال ; نظام إدارة الصيانة المحوسب (CMMS) ; أسطول النقل ; التوافر الفني ; تكلفة دورة الحياة (LCC)



Introduction générale

Introduction générale


Dans l'industrie minière moderne, la productivité est intrinsèquement liée à la disponibilité de la flotte de transport. Les camions miniers, opérant souvent dans des conditions extrêmes (charges lourdes, pistes abrasives, températures variables et fonctionnement 24/7), représentent l'un des postes de dépenses les plus élevés en termes de maintenance et d'exploitation. Face à l'augmentation des coûts énergétiques et à la nécessité de réduire les temps d'arrêt non planifiés, l'analyse de la sûreté de fonctionnement (SDF) est devenue un levier stratégique pour garantir la rentabilité et la sécurité des opérations extractives, ce qui démontre l'actualité certaine de ce présent thème d'initiation à la recherche.

L'idée scientifique centrale de ce travail repose sur l'hypothèse que la fiabilité des camions miniers n'est pas seulement une caractéristique intrinsèque du constructeur, mais une variable dépendante de l'interaction complexe entre la machine et son environnement opérationnel. En utilisant les concepts de la SDF (Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité, Sécurité), nous cherchons à quantifier l'impact des conditions de site sur le cycle de vie des composants critiques pour identifier des modèles de dégradation stochastiques différenciés selon les modèles des camions en optant pour le modèle de Weibull qui est un modèle probabiliste de durée de vie et finalement, tenant compte, de la structure de la mécanisation complexe.

Afin de valider cette approche méthodologique, le travail sera structuré autour de trois axes complémentaires et cohérents. Dans un premier temps, une phase de collecte et de prétraitement des données sera réalisée, consistant à exploiter les historiques de pannes issus du système GMAO ainsi que les données télémétriques provenant de différentes flottes de camions, en veillant au nettoyage, au filtrage et à la structuration des informations afin d'assurer leur exploitabilité statistique. Ensuite, une modélisation statistique sera mise en œuvre à travers l'application de modèles de fiabilité, notamment la loi de Weibull, dans le but de caractériser les taux de défaillance, d'estimer les paramètres de forme et d'échelle, et d'identifier les régimes de vieillissement des équipements. Enfin, une analyse comparative sera conduite pour évaluer et comparer les performances de différents modèles ou marques de camions opérant dans des conditions géologiques et climatiques différents en l'occurrence celles de gisement de phosphate Kef Essenoun et celles des gisements de calcaire de cimenterie d'El Ma Labiod, afin de déterminer les écarts de fiabilité et d'orienter les décisions d'optimisation de maintenance et de gestion de flotte.

Le but principal du travail est de fournir un cadre décisionnel permettant à l'électromécanicien minier de : optimiser le choix des équipements lors des phases de renouvellement, ajuster les politiques de maintenance préventive en fonction de la sévérité réelle des conditions de travail et en fin maximiser le taux de disponibilité technique tout en minimisant les coûts globaux de possession (LCC - Life Cycle Cost).

L'originalité de cette étude réside dans le fait que ce travail propose une comparaison "terrain" qui prend en compte l'impact réel des profils de pistes, des charges utiles effectives et des pratiques de conduite. Elle introduit une approche dynamique de la fiabilité, transformant des données brutes de maintenance en indicateurs de performance.



Chapitre I
Cadre géologique et
contexte minier de Djebel
Onk

I.1. Situation Géographique et Cadre Naturel

La région du Djebel Onk (Figure 1.1) est située au Sud-Est de l'Algérie, à 100 kms au sud de la wilaya de Tébessa et à seulement 20 kms de la frontière Algéro-Tunisienne, sur l'axe routier reliant Tébessa à El Oued. Cette zone occupe une position stratégique majeure, car elle constitue la limite géographique naturelle entre les hauts plateaux constantinois et le domaine saharien.

Sur le plan topographique, le massif du Djebel Onk forme un ensemble calcaire de 20 kms de longueur, représentant l'extrémité orientale des monts de Nemencha (prolongement des Aurès). Il culmine à 1198 m d'altitude au Djebel Tarfaya, tandis que les zones les plus basses au pied du massif se situent aux environs de 635 m. Cette configuration géographique dicte un climat subaride continental, caractérisé par deux saisons contrastées : un hiver froid et rigoureux, et un été caniculaire avec des températures dépassant 45°C. Les précipitations y sont rares, avec une moyenne annuelle de 300 mm [1].

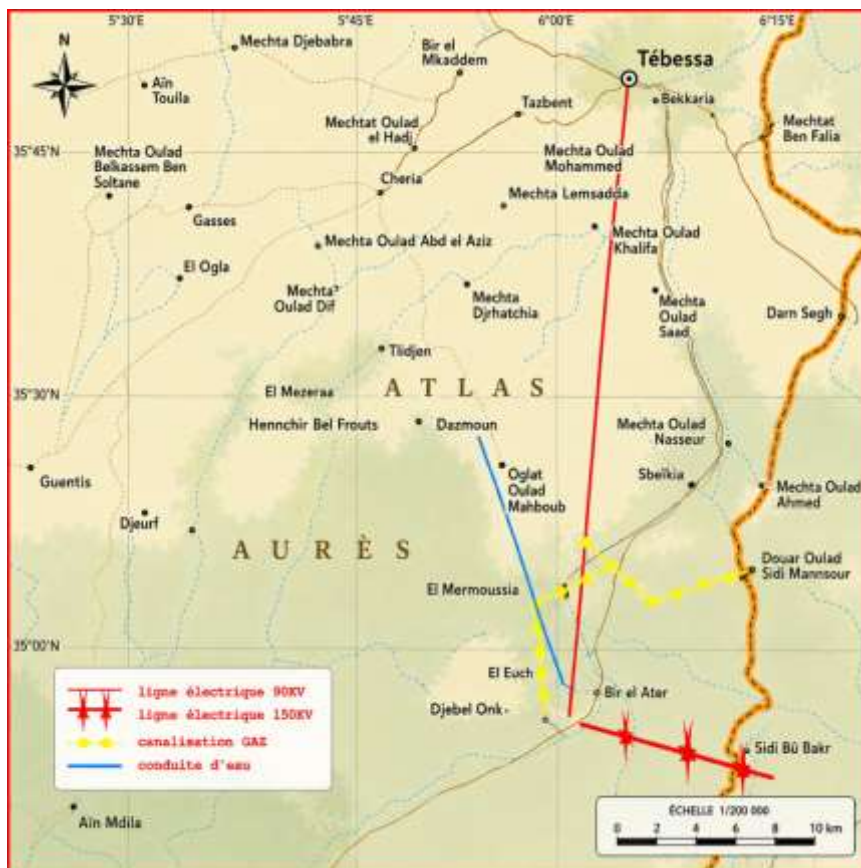


Figure.I.1 : Carte de situation géographique de Djebel Onk. Echelle : 1/200000[2]

I.2. Géologie du gîte

Le gisement est situé dans le prolongement de la retombée méridionale de la flexure antiforme du Djebel Onk (Figure 1.2), dont la structuration majeure est due à la tectonique post-Miocène.

Litho logiquement, le gisement de Kef Essenoun est constitué de bas en haut, par la série calcaro-dolomitique à silex de l'Yprésien surmonté par les calcaires marneux du Lutétien, puis par les sables du Miocène, et les alluvions du Quaternaire.

La majeure partie du gisement est constituée par une couche unique de phosphate sombre, gris –noir, sans intercalation carbonatée stérile, vers le Nord-Est de gisement apparait une couche de phosphate claire brun –beige oxydé sus-jacente à la couche de phosphate noir, la proportion des deux types de minerai est de 75% pour la première et 25% pour la deuxième [3].

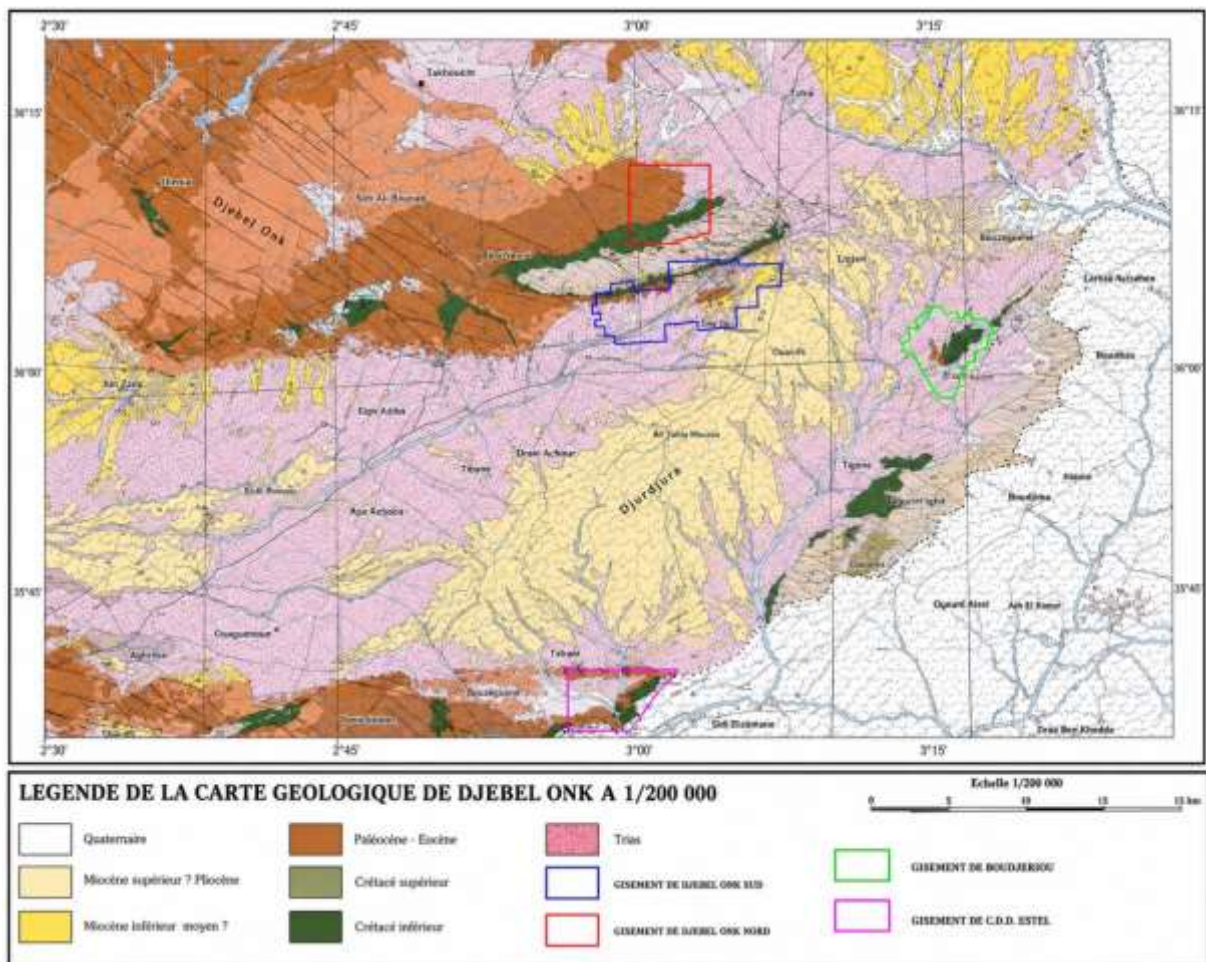


Figure.I.2 : Carte géologique de Djebel El Onk. Echelle : 1/200000[3]

I.2.1. Géologie Régionale

Structurellement, le Djebel Onk appartient, avec l'Atlas tunisien, à l'extrémité orientale de l'Atlas saharien. Son sous-sol révèle une histoire sédimentaire et tectonique complexe [3] :

I.2.1.1. Lithostratigraphie de la région de Djebel Onk

La succession sédimentaire de la région, dont le cadre stratigraphique a été initialement défini par Visse (1952), se caractérise par deux grands ensembles lithologiques distincts :

I.2.1.1.1. Le Cycle Marin (Crétacé Supérieur à Éocène Moyen)

La base de la série affleurante débute au Maastrichtien (Crétacé supérieur) et se poursuit de manière continue jusqu'au Lutétien (Éocène moyen). Cette séquence témoigne d'un environnement de dépôt exclusivement marin.

I.2.1.1.2. La Couverture Continentale (Miocène à Quaternaire)

En rupture avec le cycle précédent, une épaisse séquence sablo-argileuse d'origine continentale vient recouvrir l'ensemble en discordance. Cette sédimentation débute au Miocène et s'achève par les formations du Quaternaire, représentées essentiellement par des alluvions et des éboulis de pente [3].

I.2.1.2. Stratigraphie détaillée

La stratigraphie de la région de Djebel Onk a été établie par Visse (1952). La série sédimentaire affleurante est exprimée par une succession stratigraphique allant du Crétacé Supérieur (Maestrichtien) à l'Éocène moyen (Lutétien), surmontée par une série sablo – argileuse continentale datée du Miocène et du Quaternaire (Figures 1.3, 1.4 et 1.5) [1].

Géochronologiquement, le phosphate de Djebel Onk est d'âge Yprésien

I.2.1.2.1. Yprésien

Il repose directement sur les dépôts du Thanétien et affleure dans la carrière de Djemi-Djema et au Nord du Djebel Onk, il a une épaisseur de 32 m, on note :

I.2.1.2.1.1. Yprésien inférieur

Il est représenté à la base, par des conglomérats marquant la limite avec le Thanétien et sous – jacent une couche à alternance de calcaire, marne, dolomie et de la couche phosphatée. On note la présence de couches minces de silex dans les calcaires. L'épaisseur moyenne de l'Yprésien inférieur est de 30 m au maximum [3].

I.2.1.2.1.2. Yprésien supérieur

Il est constitué par l'alternance de calcaires, calcaire dolomitique et marnes, sa puissance est de 2 à 3 m.

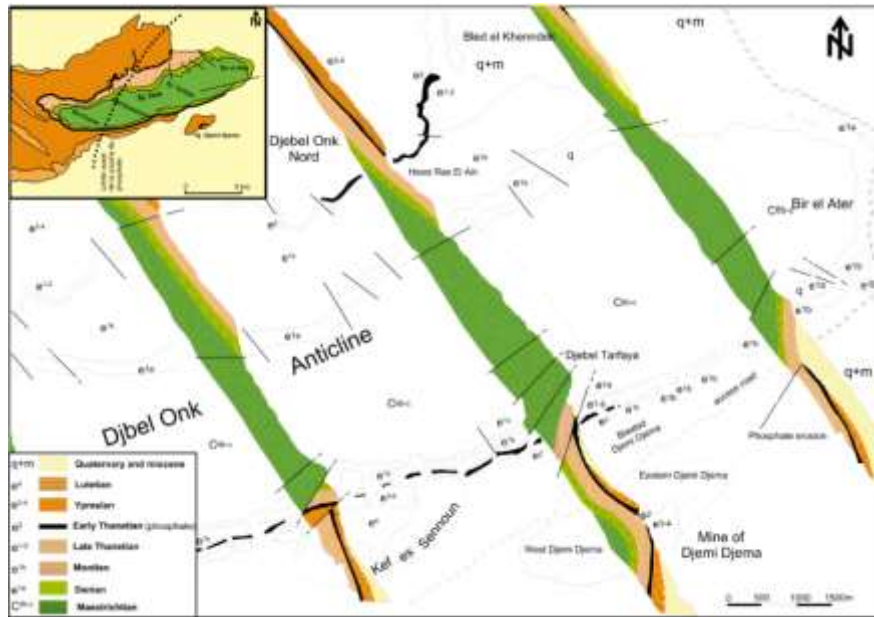


Figure.I.3 : Coupes stratigraphiques et structurales des flancs Nord et Sud de Djebel Onk (E.R.E.M, 1986).

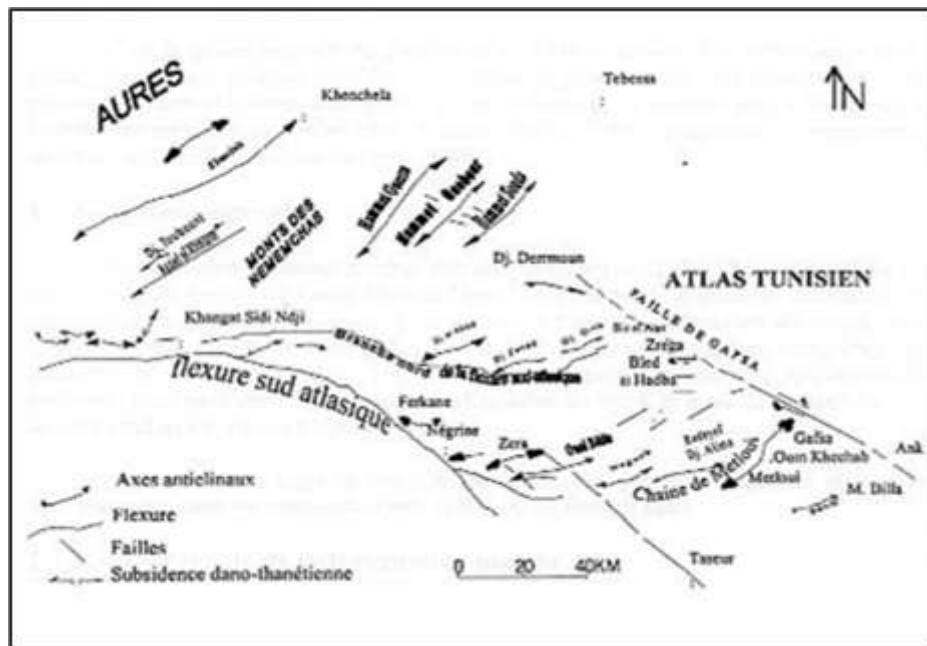


Figure.I.4 : Carte structurale de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa – Mélaoui – Onk (Aissaoui, 1984).

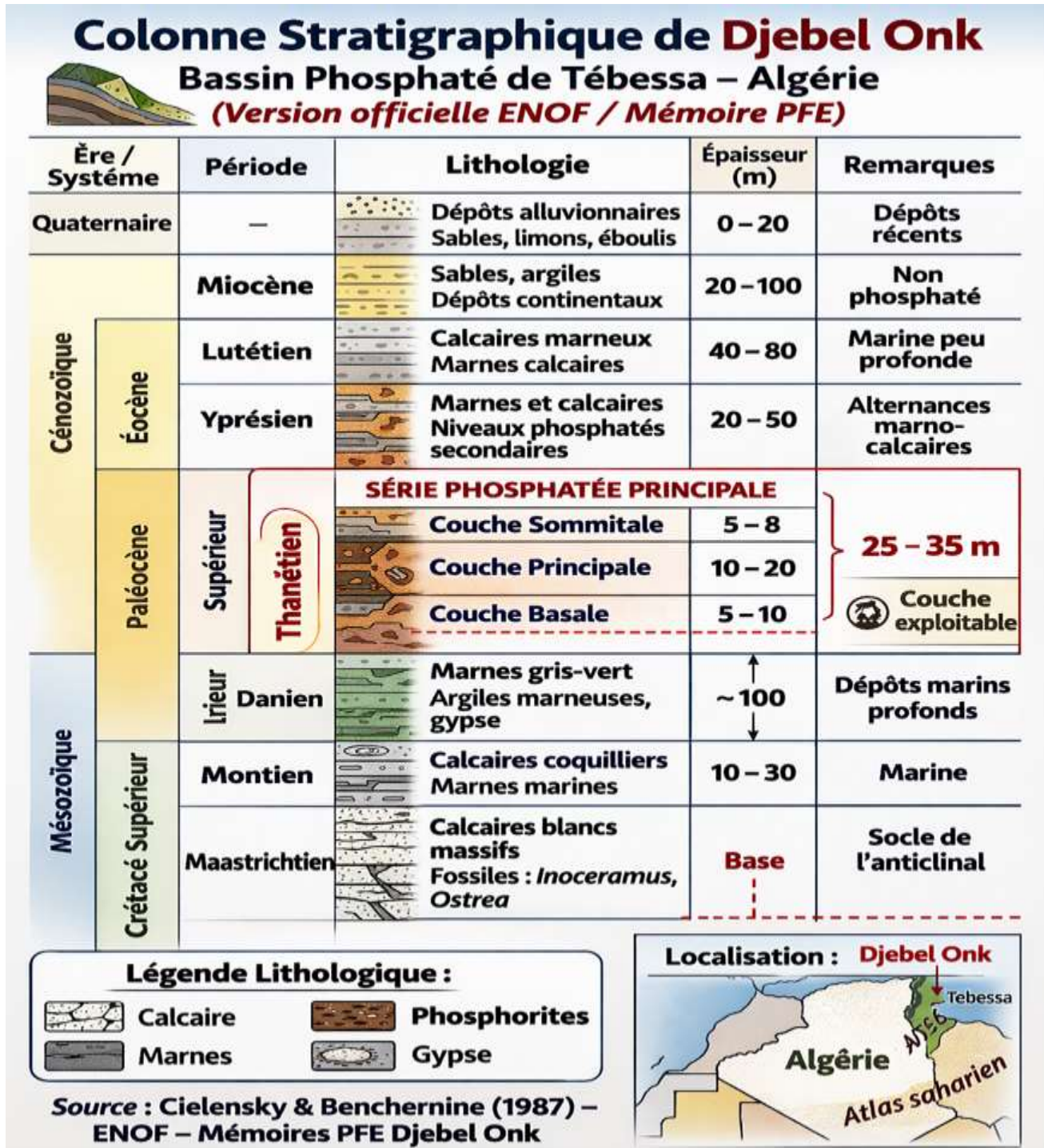


Figure.I.5 : Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk – Algérie orientale–
(D’après RANCHIN, 1963).

I.3. Géomorphologie de Djebel El Onk (Algérie)

Le contexte géologique contrôlant la morphologie Djebel El Onk est principalement constitué de [3] :

- Calcaires et dolomies crétacés
- Marnes et niveaux phosphatés éocènes
- Formations sédimentaires plissées (tectonique atlasique)

La structure est dominée par :

- Plis (anticlinaux et synclinaux)
- Failles inverses liées à l'orogénèse atlasique

La géomorphologie est donc fortement structurale (relief contrôlé par la tectonique).

I.3.1. Processus morphogénétiques dominants

Voir tableau (Annexe N°1)

Le climat semi-aride (250–350 mm/an) favorise :

- Érosion rapide lors des crues
- Faible couverture végétale
- Développement de glacis et cônes de déjection

I.4. Secteurs Miniers et Ressources en Phosphate

La région est subdivisée en cinq secteurs miniers principaux : les gisements de Djemi-Djema, Kef Essenoun, Djebel Onk Nord, Oued Betita et Bled El Hadba. Actuellement, les gisements de Djem-Djema et Kef Essenoun sont exploités en carrières par la SOMIPHOS ; ils se situent immédiatement au sud du massif, à seulement 4 km de la ville de Bir El Ater [4].

Les ressources géologiques potentielles en phosphate ont fait l'objet d'évaluations rigoureuses :

- **Estimation Initiale (2016) :** Selon le bureau d'expertise allemand DMT, les ressources (mesurées et indiquées) étaient évaluées en septembre 2016 à 1140,3 Mt, avec une teneur de 24,5% en P₂O₅ et 3,3% en MgO. Cette estimation est conforme aux normes internationales (code JORC).
- **Bilan de l'Exploitation (2016-2025) :** Entre septembre 2016 et septembre 2025, environ 21,01 millions de tonnes de phosphate (tout-venant) ont été exploitées [6].
- **Réserves Actuelles :** Les ressources géologiques restantes au sein du bassin sont aujourd'hui évaluées à 1119,29 millions de tonnes, confirmant l'importance mondiale de ce pôle minier [5].

I.5. Importance Économique du Gisement de Djebel Onk

Le gisement de Djebel Onk, situé dans la wilaya de Tébessa, est considéré comme le nouveau poumon économique de l'Algérie. Ce site représente la pierre angulaire de la stratégie de l'État pour sortir de la dépendance aux hydrocarbures.

I.5.1. Des réserves mondiales colossales

Djebel Onk est classé parmi les plus grandes réserves de phosphate au monde. Voir tableau (Annexe N°2)

- **Volume :** Les réserves sont estimées à plus de 2.3 milliards de tonnes.
- **Position stratégique :** Sa proximité avec les lignes ferroviaires et les ports de l'Est (notamment Annaba) rend les coûts de transport et d'exportation extrêmement compétitifs [1].

I.5.2. Le Projet Intégré Phosphates (PPI)

L'intérêt ne réside pas uniquement dans l'extraction minière, mais dans la transformation locale via des partenariats majeurs (notamment avec des entreprises chinoises) [5] :

- **Valeur ajoutée :** Transformation du phosphate brut en engrais phosphatés et en acide phosphorique.
- **Revenus :** L'exportation d'engrais génère des devises bien plus importantes que la vente du phosphate à l'état brut.
- **Investissement :** L'État a mobilisé un budget colossal (environ 7 milliards de dollars) pour le développement du gisement de « Bled El Hadba » dans la région de Djebel Onk.

I.6. Organisation générale de l'entreprise minière

I.6.1. Structure de la mine

Cette entreprise gère et organise les différents départements, eux-mêmes structurés par différents services pour la bonne gestion et l'exploitation rationnelle de la mine (Figure 1.6) [1].

I.6.2. Organigramme

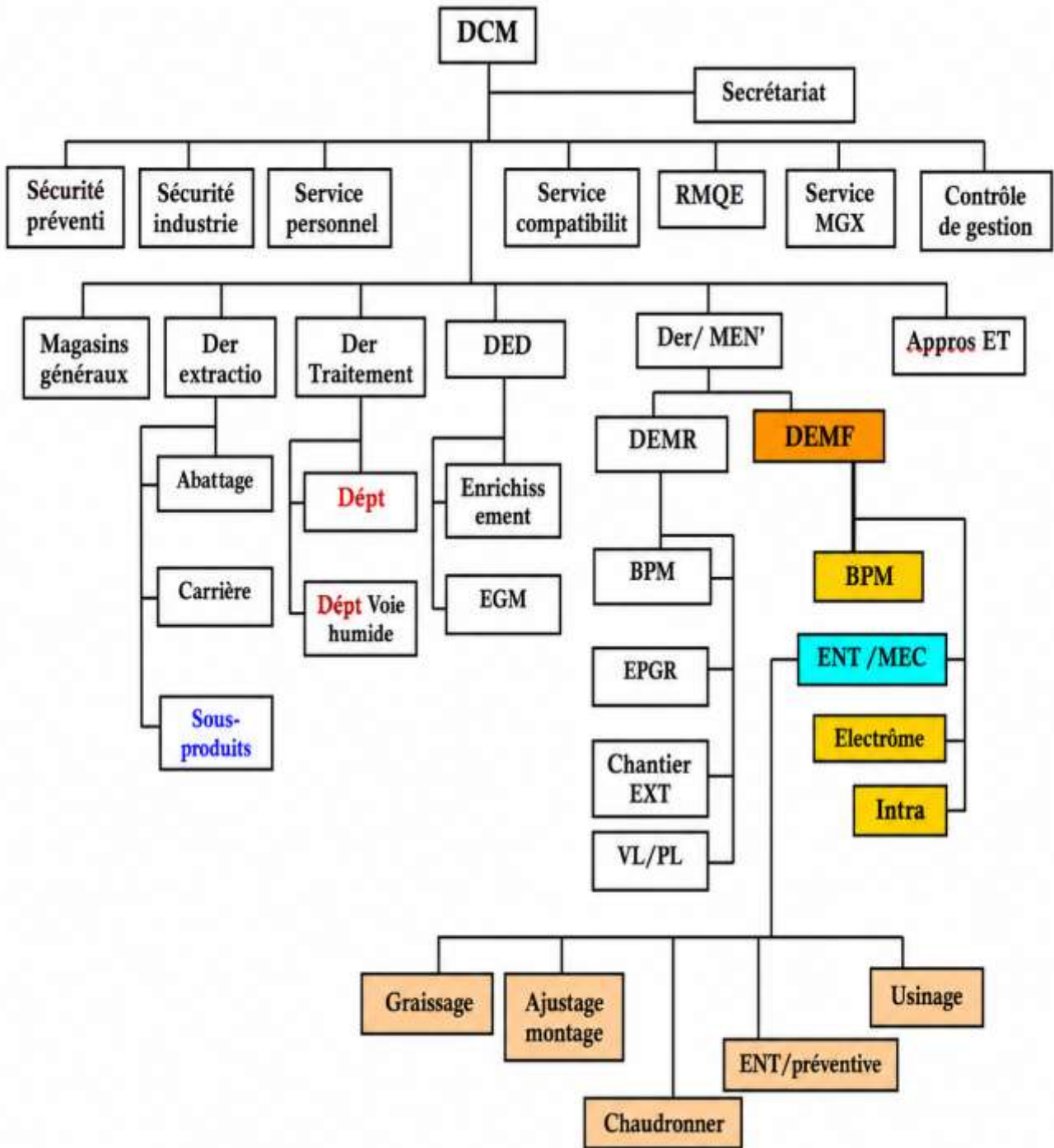


Figure.I.6 : Organigramme du complexe minier Djebel Onk. [1]

I.7. Description du parc matériel

Tableau.I.1 : L'état actuel du parc matériel (Djebel el Onk) [6]

CHAPITRE I

Cadre géologique et contexte minier de Djebel Onk

Engins	Types	Nomenclature Des Engins	Taux de disponibilité	Rendement horaire	Rendement métrique	Nombre de poste
Sondeuse	ATLAS COPCO	760- 745-739	80%	45m/h	50,7t/m	2x8
	EPIROC	761 – 753	80%	45m/h	50,7t/m	2x8
Pelle	CAT	624	80%	CAT		3x8
Chargeuse	CAT	651	Programmée pour l'homogénéisation du phosphate au niveau de la carrière et les stocks bruts.			
Camions	CAT	576-578-581-583-586	80%	110t/h		3x8
	TEREX	598-599	Programmées en redondance.			
Bulls	LIEBHERR	638-647	80%	Programme pour la crête côte est et nord-ouest plus les marnes cote est		
	CAT	634-639-659				3x8
	CAT	655	Programmes en réserve pour les travaux de terrassement			
Brise Roche (BABITLLES)	CAT	645	80%	Programmée pour la préparation des accès dans les affleurements du côte nord-est et pour le débitage secondaire.		
Niveleuses	LIEBHERR	746	80%			3x8
Citerne D'arrosage	MERCEDES	392	80%			3x8

Les deux courbes suivants (Fig.1.7 ;1.8) donnent un aperçu technique sur le mode d'exploitation dans le quartier l'on a effectué notre stage (Partie Nord-Ouest de Kef Essenoun) [23].

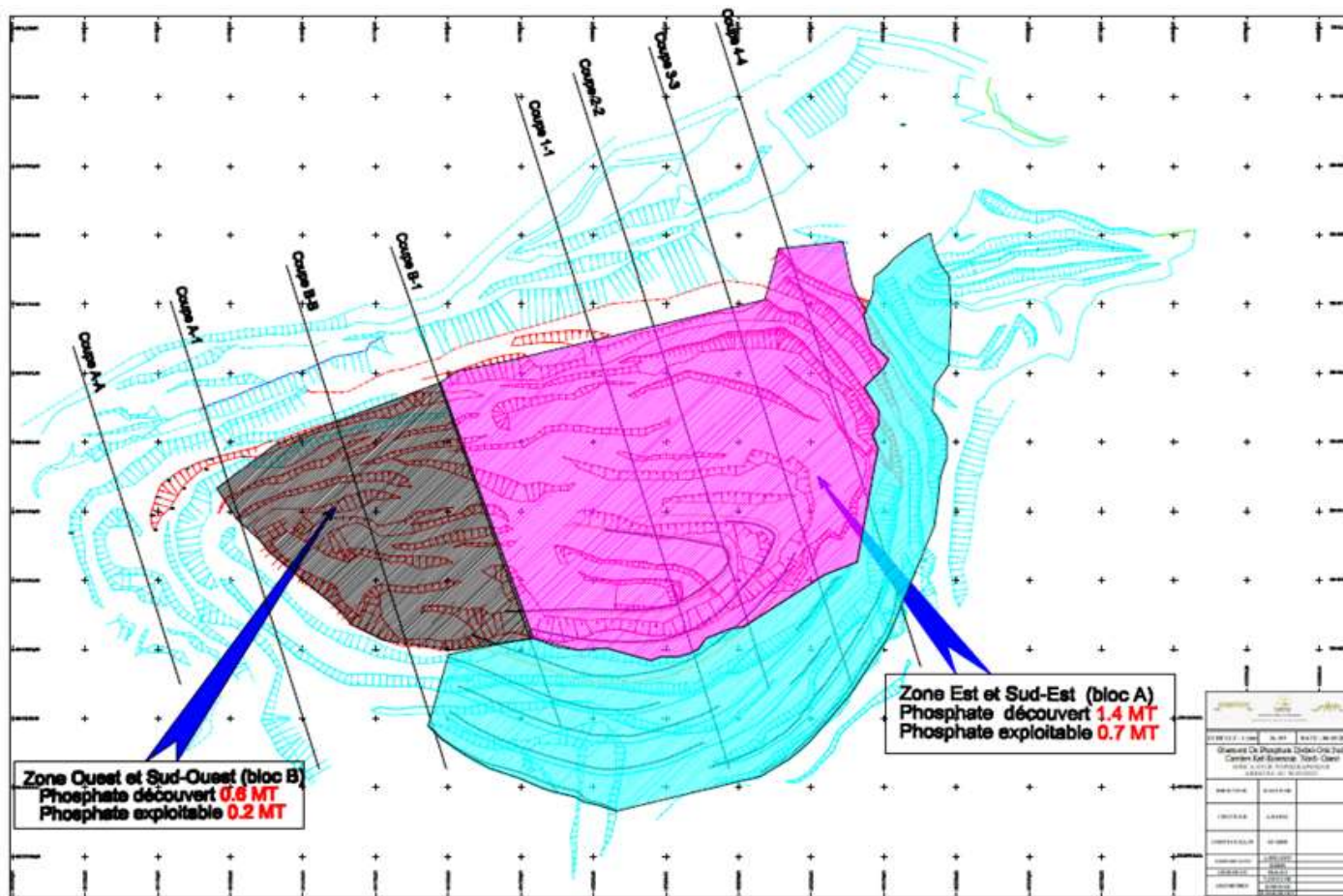


Figure.I.7 : situation de la carrière de Kef Essenoun partie Nord-Ouest au 31/12/2025[6]

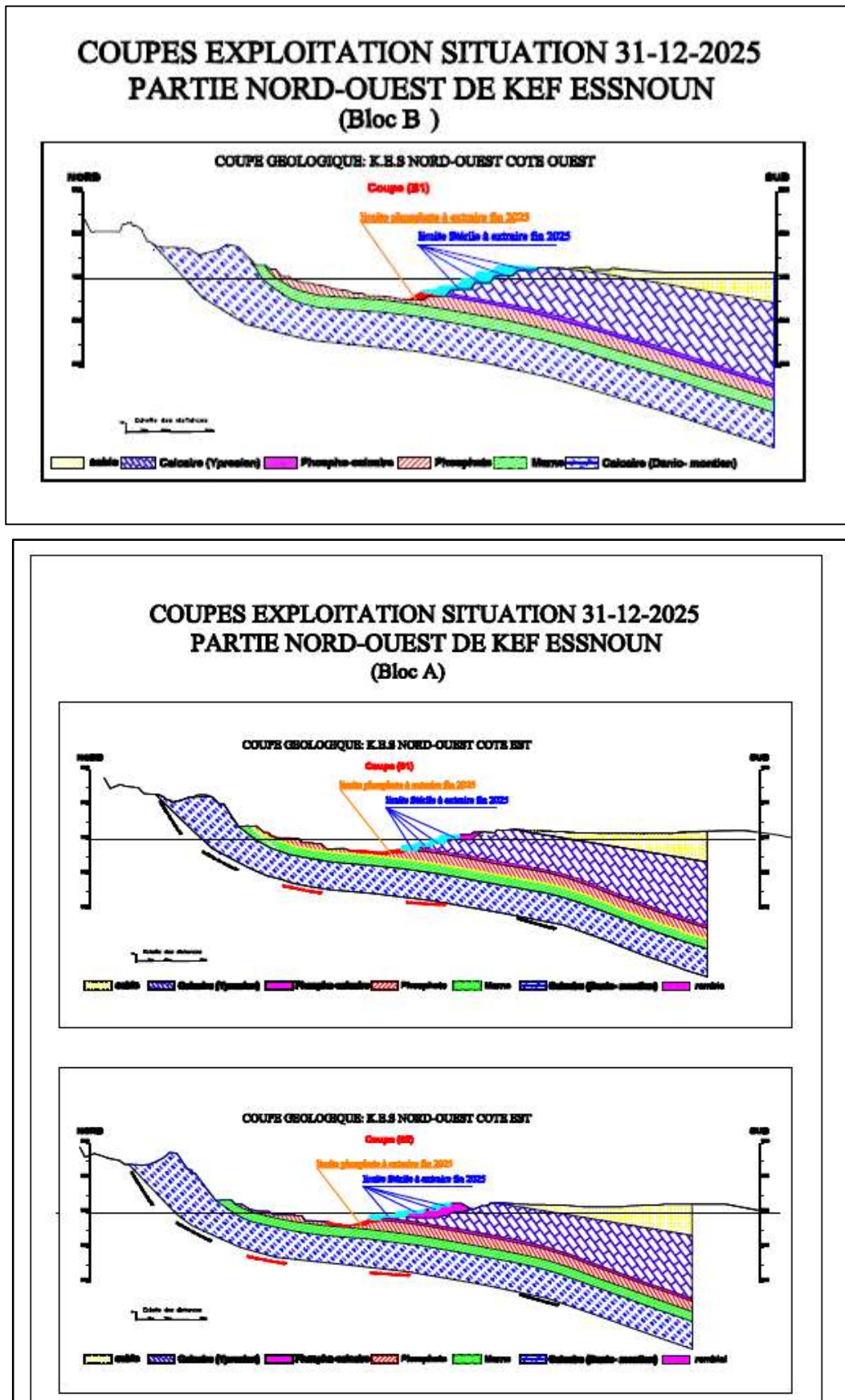


Figure.I.8 : coupes exploitation situation 31/12/2025. Partie Nord-Ouest de Kef Essenoun (bloc A, bloc B) [6]

I.8. Déterminations des paramètres d'exploitation

Dans nos conditions, la hauteur est déterminée en fonction de la productivité de la carrière, des équipements miniers utilisés et de l'expérience, j'opte :

Pour les pelles sur chenilles la hauteur est de 8 – 15 m (voir BJENSKY : processus des travaux miniers à ciel ouvert. En russe. Page 180 – MOSCOU – NEDRA 1978).

D'après l'exigence technique on prend $H = 15$ m.

I.8.1. Angle du talus

L'angle du talus du gradin pour le cas du Djebel el Onk est pris entre

$\alpha = 75^\circ - 85^\circ \Rightarrow$ On prend $\alpha = 75^\circ$

I.8.2. Largeur de l'enlèvement

Lors du choix de la largeur d'enlèvement on prend en considération les facteurs suivants :

- Méthode de préparation des roches à l'abattage.
- Propriétés des roches.
- Type et dimension des engins de chargement.
- Nombre de rangées.

Dans nos conditions on utilise une rangée pour l'exploitation des roches qui est assurée par les travaux de forage et de tir [12].

Pour ces conditions :

$$A = H_{gr} \cdot n_1 (1 + n_2) \quad (1) \quad (I.1)$$

$$n_1 = \frac{W}{H_{gr}} \quad n_2 = \frac{b}{W}$$

Où :

n_1 : est le rapport entre la valeur de la ligne de moindre résistance et la hauteur du gradin.

n_2 : est le rapport entre la distance entre les rangées de trous et la ligne de moindre résistance.

(1) De même :

$$A = W + b |(1 - n)| \quad (I.2)$$

Où :

b : distance entre les rangées

W : ligne de moindre résistance

n : nombre de rangées

$$A = H_{gr} \times n_1 (1 + n_2)$$

$$n_1 = \frac{W}{H_{gr}} = \frac{6.9}{15} = 0.46$$

$$A = 15 \times 0.46(1) \Rightarrow A = \mathbf{6.9 \text{ m}}$$

I.8.3. Les paramètres du tas de roches

Le tas des roches abattues est en relation avec :

Hauteur du gradin, coefficient de foisonnement de la roche, Charge d'explosif.

I.8.3.1. Hauteur du tas :

Est déterminée par [8] :

$$H_{tas} = (0,7 - 1,0) \cdot H_{gr} \quad (I.3)$$

Cette valeur doit répondre aux exigences des moyens de chargement.

$$H_{tas} = (0.7 - 1.0) \times H_g$$

$$H_{tas} = 0.9 \times 15 = \mathbf{13.5 \text{ m}}$$

I.8.3.2. La largeur du tas :

Est déterminée par [12] :

Pour une rangée d'abattage on a :

$$B_{ts} = K_r \cdot K_b \cdot H \sqrt{q} \quad (I.4)$$

Où :

K_r : coefficient dépendant de la résistance des roches en tir.

$K_r = 2,5 - 3,0$ pour une résistance moyenne soit $K_r = 2.5$

K_b : coefficient prenant en considération l'angle d'inclinaison des trous

$$K_b = 1 + 0,5 \sin^2 (90 - B) \quad (I.5)$$

Où :

B : angle d'inclinaison du trou

Si on utilise deux ou plusieurs rangées, la largeur du tas peut être déterminée comme :

$$B_{tp} = K_r \cdot B_{ts} + (n - 1) \cdot b \quad (I.6)$$

Où :

n : nombre de rangées (n = 2)

b : distance entre les rangées

K_r : coefficient tenant compte de l'intervalle de retard du détonateur

$$B_{ts} = K_r \times K_\beta \times H \times \sqrt{q}$$

$$K_{\beta} = 1 + 0.5 \sin^2 (90 - \beta)$$

$$K_{\beta} = 1 + 0.5 \sin^2 (90 - 78) \Rightarrow K_{\beta} = 1.26$$

$$K_r = 2.5$$

$$B_{ts} = 2.5 \times 1.26 \times 15 \times \sqrt{0.41} \Rightarrow B_{ts} = 30.24 \text{ m}$$

I.8.4. Détermination de la largeur de la plate-forme de travail maximale

(On tient compte de la largeur du tas)

I.8.4.1. Largeur de la plate-forme de travail

Elle doit être suffisante pour assurer le travail des moyens d'abattage, de chargement et de transport [9].

Dans le cas des roches dures, la largeur minimale de la plate-forme de travail sera déterminée par la formule suivante :

$$L_p = (A + x) + C + T + Z \quad , \text{ (m)} \quad \text{(I.7)}$$

Où :

A : largeur d'enlèvement (m)

(A + x) : largeur du tas de roches abattues (m)

C : berme de sécurité (C = 3 m)

T : largeur de la berme de transport.

Z : largeur du prisme d'éboulement.

$$L_p = (A+x) + C + T + Z, \text{ m}$$

C = 3 m, A = 6.9 m, A + x = 30 m,

$$T = 2A + 2B + D \text{ (double voie)}$$

Où :

A : Largeur du camion (A = 5.4m)

B : largeur de sécurité varié de (0.7 – 1.0) m, on prend B = 1m.

D : distance de croisement entre deux camions variés de (0.7 – 1.7) m, on prend D = 1.7m

$$T = 2(5.4) + 2(1) + 1.7 = 14.5, \text{ m}$$

Z : largeur de prisme d'éboulement, m

$$Z = H_g (\text{ctg}\beta - \text{ctg}\alpha) ;$$

Où :

β : Angle de stabilité naturelle, ($\beta = 60^\circ$)

α : angle du talus du gradin, ($\alpha = 75^\circ$)

H_g : hauteur du gradin ; m, ($H_g = 15 \text{ m}$)

$$Z = 15(\text{ctg}60 - \text{ctg}75) = 4,6\text{m}$$

$$L_p = 30 + 3 + 14.5 + 4.65 = 52.15\text{m}$$

I.8.5. Le bloc

Le bloc est une partie d'enlèvement du gradin destinée à l'exploitation grâce à un engin de chargement.

I.8.5.1. Longueur d'un bloc donné sur un gradin

Elle correspond à la longueur du front de travail du gradin qui représente la somme des fronts de travail de chaque gradin [10].

$$L_f = \sum_{i=1}^n l_g \quad (\text{I.8})$$

Où :

n : nombre de gradins

L_g : longueur d'un gradin

$L_g = 200 \text{ m}$

$$L_f = L_g = 200\text{m}$$

I.8.6. Calcul de l'avancement annuel du front de travail [11]

$$V_a = Q_{\text{car}} / (H_{\text{gr}} \cdot L_f) \quad (\text{I.9})$$

Où :

Q_{car} : productivité annuelle de la carrière

$$V_a = \frac{Q_{\text{car}}}{l_f \cdot H_{\text{gr}}} \Rightarrow V_a = \frac{3500000/2.3}{200 \times 15} \Rightarrow V_a = 507.24\text{m/ans}$$

I.9. Ouverture

I.9.1. Ouverture du champ de la carrière

L'ouverture du gisement qui se fait pour différents quartiers est une étape fondamentale par laquelle est assurée l'exploitation du gisement [11].

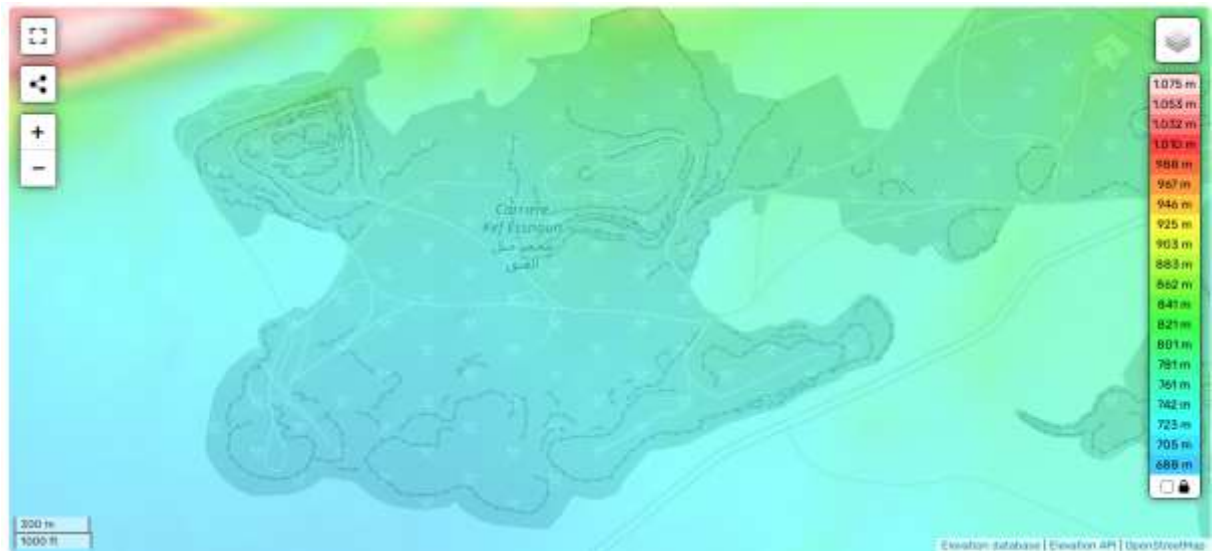


Figure.I.9 : plan topographique de Kef Essenoun

I.9.2. Culbutage (Travaux préparatoires)

On opte pour le choix d'un bulldozer lors du nettoyage des zones de travail, Le dégagement des roches au niveau du pied du gradin est nécessaire pour procéder au culbutage de la matière d'un niveau à un autre (Figure 1.10) [6].

Voir tableau (Annexe N°3)

I.9.3. Calcul du rendement du bulldozer

Le rendement du bulldozer est déterminé par la formule suivante [11] :

$$R_b = \frac{3600 \times T_p \times K_u \times V_b}{T_{cy} \times K_f} \quad (I.10)$$

Où :

V_b : volume de la prise d'arrachement (voir Annexe N)

Pour une puissance de 150 – 300 ch $\rightarrow V_b = 8 \text{ m}^3$

T_p : durée d'un poste ; ($T_p = 8 \text{ h}$)

K_u : coefficient d'utilisation du bulldozer ; ($K_u = 0,75$)

K_f : coefficient de foisonnement des roches ; ($K_f = 1,5$)

T_{cy} : Durée du cycle du bulldozer

$$T_{cy} = t_{at} + t_{depl} + t_{ret} + t_{aux}$$

Où :

t_{at} : temps d'attaque de la roche ;

$$t_{at} = \frac{3,6 \times La}{V_1}$$

Où :

La : distance d'attaque ; $La = (6 \div 10) \text{ m}$

V_1 : vitesse de déplacement durant l'attaque ; $V_1 = (2 \div 2,5)$ km/h

$$t_{at} = \frac{3,6 \times 10}{2} = 18 \text{sec}$$

t_{depl} : temps de déplacement et de transport de la roche

$$t_{depl} = \frac{3,6 \times L_t}{V_2}$$

Où :

L_t : distance de transport ; $L_t = (20 \div 30)$ m

V_2 : vitesse de déplacement ; $V_2 = (2 \div 3)$ km/h

$$t_{depl} = \frac{3,6 \times 30}{2} = 54 \text{sec}$$

t_{ret} : temps de retour en position de départ (initiale)

$$t_{ret} = \frac{3,6 \times (L_a + L_t)}{V_3}$$

Où :

V_3 : vitesse de retour ; $V_3 = (8 \div 10)$ km/h soit $V_3 = 10$ km/h

$$t_{ret} = \frac{3,6 \times (10 + 30)}{10} = 18 \text{sec}$$

t_{aux} : temps auxiliaire ; $t_{aux} = 15$ sec

C'est-à-dire : $T_{cy} = 18 + 54 + 18 + 1 = 105 \text{sec}$

Remarque : Les vitesses V_1 , V_2 et V_3 sont prises pour des roches explosées de petites dimensions.

$$\text{C'est-à-dire : } R_b = \frac{3600 \times 8 \times 0,75 \times 7,7}{105 \times 1,5} = 1056 \text{ m}^3/\text{poste}$$



Figure.I.10 : Bulldozer sur pneus Cat 824

I.10. Forage et tir

I.10.1. Calcul de l'indice de forabilité

Il est déterminé par la formule empirique suivante [8] :

$$D_f = 0.007(\sigma_{\text{comp}} + \sigma_{\text{dep}}) + 0.7\gamma \quad (\text{I.11})$$

Ayant paramètres : σ_{comp} , σ_{dep} et γ (déterminés au niveau du laboratoire des mines).

$$D_f = 0.007(79.84 + 183.63) + 0.7 \times 2.3 = 9 \Rightarrow D_f = 9$$

Selon la forabilité, le phosphate est de deuxièmes classes de quatrième catégorie (forabilité facile à moyenne).

La roche serait aisément forée par le mode de forage rotopercutant. Nous recommandons l'usage de la sondeuse Atlas Copco Flexiroc D60

Nous avons effectué une série de chronométrage de temps de cycle de forage, le temps moyen est de 45m/h, ce qui correspond à la vitesse théorique plafond de la sondeuse.

I.10.2. Choix de diamètre du trou

D'après [9] on voit que l'état contemporain de l'étude du tir, pour le moment, ne permet pas de donner une solution théorique complète et argumenter le choix du

diamètre de la charge, c'est pourquoi il convient de se servir des données expérimentales pour des problèmes concrets.

Vu :

- la production planifiée de 3.5MT, le débit total de fissures du massif
- la tirabilité de la roche (III), la dimension des blocs naturels
- les outils de forage disponibles, les exigences pratiques du forage

On adopte le diamètre des trous disponible en carrière de :

d = 165 mm

Les coefficients utilisés :

- $q_{ex}=0,32$, $q_{reel}=0,45$

Vu :

La stéréographie de Kef Essnoun est sur la base du système de fissuration prédominant sur les 3 existants avec un pendage subhorizontal ou 15° , on adopte une inclinaison des trous de minage de 75° par rapport à l'horizontal (Figure 1.11).



Figure.I.11 : la stéréographie de Kef Essnoun

I.10.3. Longueur de sous-forage

$$L_{sf} = K_s \cdot D \quad , \text{ m} \quad (\text{I.12})$$

Où :

K_s : coefficient tenant compte des propriétés des roches et de l'inclinaison du trou (tableau 3.6) ;

D : diamètre du trou (m)

$$L_{sf} = 10 \times 0,165 \Rightarrow L_{sf} = 1,65 \text{ m}$$

I.10.4. Longueur du trou

Données :

$$\beta = 75^\circ ; \quad H = 15 \text{ m}; \quad k_s = (10-15)$$

$$L = \frac{H}{\sin \beta} + l_s, \text{ m} \quad (\text{I.13})$$

Où :

H : hauteur du gradins, m ;

L_s : longueur du sous-forage, m ;

β : angle d'inclinaison du trou, degré ;

$$L = \frac{15}{\sin 75^\circ} + 1,65 = 17,27 \text{ m}$$

I.10.5. Consommation spécifique d'explosif

Données :

$$K_{ex} = 1,1; \quad q' = 162 \text{ g/t}$$

Où :

q' : consommation spécifique pour l'explosif étalon (on URSS, on prend ammonite n°6 GT), kg/m³ ;

K_{ex} : coefficient tenant compte de l'aptitude au travail de l'explosif utilisé (A_u) par rapport à celle de l'explosif étalon (A_{et}), c'est-à-dire [12]

$$K_{ex} = \frac{A_{et}}{A_u} [7] \quad (\text{I.14})$$

$$q = q' \cdot K_{ex} \Rightarrow q = 162 \times 1,1 = 178,2 \text{ g/t} \Rightarrow q = 0,41 \text{ kg/m}^3$$

I.10.6. Ligne de résistance au pied

$$W = \frac{\sqrt{0,5P^2 + 4mqPHL} - 0,75P}{2mqH}, \text{ m} [8] \quad (\text{I.15})$$

Où :

$$P = 785D^2 \cdot \Delta$$

Avec :

P : capacité d'un mètre de trou, kg/m

D : diamètre du trou, m

Δ : densité de l'explosif, kg/dm³ (Δ = 0,8 ÷ 1,6 kg/dm³)

- Densité mélanite : 0.90g/cm³
- Densité marmanite : 1.05g/cm³

m : coefficient de rapprochement des trous (voir tableau 3.6)

q : consommation spécifique d'explosif, kg/m³

H : hauteur du gradin, m

L : longueur du trou, m

Donnes :

Taux d'amorçage = 12% ; m=1.15

$$\Delta = (0.90 \cdot 0.88) + (1.05 \cdot 0.12) \Rightarrow \Delta = 0.918 \text{ g/cm}^3$$

$$P = 785 \cdot (0.165)^2 \cdot 0.918 \Rightarrow P = 19.61 \text{ Kg/m}$$

$$W = \frac{\sqrt{0.5 \cdot (19.61)^2 + 4 \cdot 1.15 \cdot 0.41 \cdot 15 \cdot 17.27 \cdot 19.61 - 0.75 \cdot 19.61}}{2 \cdot 1.15 \cdot 0.41 \cdot 15} \Rightarrow W = 5.95 \text{ m}$$

I.10.7. Calcul de W (pour vérifier les conditions de sécurité du tir)

$$W \geq H \cot \alpha + C, \text{ m [8]} \quad (\text{I.16})$$

Où :

α = angle du talus du gradin

C = constante de sécurité (généralement ≥ 3 m)

$$W \geq 15 \cdot \cot 75^\circ + 3 \Rightarrow W < 6.9 \text{ m}$$

I.10.8. Calcul de m' (nouvelle valeur du coefficient de rapprochement)

$$m' = \frac{P(L-l_b)}{qH(H \cot \alpha + C)^2} \quad [8] \quad (\text{I.17})$$

Où :

l_b : longueur de bourrage, m.

$$l_b = (20-30) D$$

Choix : $L_b = 23D$

$$L_b = 23 \times 0,165 \Rightarrow L_b = 3,79 \text{ m}$$

$$m' = \frac{19.61 \cdot (17.27 - 3.79)}{0.41 \cdot 15 \cdot (15 \cot 75^\circ + 3)^2}$$

$$m' = 0.9$$

C'est-à-dire : $a = m' \cdot W$

$$a = 0.9 \cdot 6.9 \Rightarrow a = 6.21 \text{ m}$$

I.10.9. Quantité de charge Q_{ch}

$$Q_{ch} = qWHa \quad [10] \quad (\text{I.18})$$

$$Q_{ch} = 0,41 \times 6,9 \times 15 \times 6,21 \Rightarrow Q_{ch} = 263,52 \text{ kg}$$

Où :

b : distance entre les rangées de trous, m

I.10.10. Calcul de la longueur du charge l_{ch}

$$l_{ch} = \frac{Q_{ch}}{P} \quad [10] \quad (\text{I.19})$$

Où :

l_{ch} = longueur de charge de la première rangée, m

P = capacité d'un mètre de trou, kg/m

$$l_{ch} = \frac{263.52}{19.61} \Rightarrow l_{ch} = 13.43 \text{ m}$$

C'est-à-dire :

I.10.11. Longueur de bourrage

$$L_b = l - l_{ch}, \text{ m}$$

$$L_b = 17.27 - 13.43 \Rightarrow L_b = 3.84 \text{ m}$$

I.10.12. Débit moyen de la masse minière

$$j_m = \frac{Q_{ch(1)} + Q_{ch(n)}(n-1)}{nL}, \text{ m}^3/\text{m} \quad [9] \quad (\text{I.20})$$

Où :

n = nombre de rangées de trous

$$j_m = \frac{263.52}{7.08} \Rightarrow j_m = 37.22 \text{ m}^3/\text{m}$$

I.10.13. Le volume du bloc à tirer

$$V = N_j \cdot R_e, \text{ m}^3 [9] \quad (\text{I.21})$$

Où :

R_e : rendement de l'engin d'extraction, m³/poste ;

N_j : nombre de postes de travail de l'engin d'extraction par jour, postes ;

K_j : intervalle entre les tirs successifs, jour

$$V = 2.3 \cdot 2736 \Rightarrow V = 16416 \text{ m}^3$$

I.10.14. La longueur totale des trous forés nécessaires pour un bloc à tirer

$$\sum L = \frac{V}{j_m}, \text{ m} [8] \quad (\text{I.22})$$

$$\sum L = \frac{16416}{37.22} \Rightarrow \sum L = 441.05 \text{ m}$$

I.10.15. Le nombre des trous

$$N_{\text{trou}} = \frac{V}{l} [8] \quad (\text{I.23})$$

$$N_{\text{trou}} = \frac{441.05}{17.27} \Rightarrow N_{\text{trou}} = 26, \text{ trou}$$

I.10.16. Le nombre nécessaire des sondeuses pour desservir un seul engin d'extraction

$$N_s = \frac{\Sigma L}{R_s N_{js}}, \text{ pièces [8]} \quad (\text{I.24})$$

Où :

R_s = rendement de la sondeuse, m/poste ;

N_{js} = nombre de postes de travail de la sondeuse par jour, postes.

$$N_s = \frac{441.05}{45 \cdot 3 \cdot 2}$$

$$N_s = 1.63 \approx 2 \text{ sondeuse}$$

Les dimensions maximales admissibles des blocs de roches explosées se déterminent en fonction des paramètres des engins miniers, à savoir :

I.10.16.1. D'après la capacité du godet de la chargeuse

$$D \leq 0,8 \times \sqrt[3]{E_g} ; (\text{m}) [9] \quad (\text{I.25})$$

E_g : La capacité du godet de la chargeuse

$$E_g = 6 \text{ m}^3$$

$$D \leq 1,45 \text{ m}$$

I.10.16.2. D'après la capacité de la benne de camion

$$D \leq 0,5 \times \sqrt[3]{V_c} ; (\text{m}) [9] \quad (\text{I.26})$$

V_c : Le volume de la benne de camion (m^3)

$$V_c = 35.6 \text{ m}^3$$

$$D \leq 0,5 \times \sqrt[3]{35.6} \Rightarrow D = 1.64 \text{ m}$$

I.10.16.3. D'après l'ouverture de la trémie du concasseur

$$D \leq 0,8 \times B_{ou} ; (\text{m}) [9] \quad (\text{I.27})$$

B_{ou} : La trémie d'ouverture du concasseur (m)

$$B_{ou} = 1,2 \text{ m}$$

$$D \leq 0,8 \times 1,2 \Rightarrow D \leq 0.96 \text{ m}$$

I.11. Chargement

I.11.1. Introduction

L'architecture opérationnelle d'une mine à ciel ouvert s'articule intrinsèquement autour du choix des unités de chargement. Ceci conditionne non

seulement la sélection des équipements de transport subordonnés, mais aussi l'optimisation de leurs protocoles d'utilisation.

Considéré comme le pivot de la chaîne cinématique d'extraction, l'engin de chargement demeure le principal déterminant de la capacité productive et du rendement global de l'exploitation.

À titre d'illustration opérationnelle, la mine de Djebel Onk a opté pour une flotte composée d'excavateurs à godet unique de haute performance. Le chargement y est assuré par des pelles hydrauliques en configuration rétro (type **Caterpillar 390F** ; $Q_g = 6\text{m}^3$, voir tableau (Annexe N°4)) et des pelles en configuration butte (type **Liebherr 974** ; $Q_g = 6\text{m}^3$), permettant ainsi de concilier puissance d'arrachement et précision du chargement (Figure 1.13) [6].

I.11.2. Calcul du chargement

I.11.2.1. Rendement de la pelle (R_p)

Elle se donne par la formule suivante :

$$R_p = \frac{60 \times E \times T_p \times K_r \times \gamma \times K_f}{T_c \times K_u} ; \text{ t/poste [8]} \quad (\text{I.28})$$

Où :

K_u : Coefficient d'utilisation ; ($K_u = 0,45$)

K_r : Coefficient de remplissage ; ($K_r = 0,95$)

K_f : Coefficient de foisonnement ; ($K_f = 1,5$)

V_u :

- $K_u = 0,45$ (on constate qu'il travaille effectivement 5 h sur les 8 h d'un poste de travail)
- $K_r = 0,95$ (vu que le phosphate est de tirabilité moyenne, déterminée expérimentalement)
- $K_f = 1,5$ (celle du phosphate, prise sur les rapports et plan d'étude de Somiphos)

E : Capacité du godet ; $E = 6 \text{ m}^3$

γ : $2,3 \text{ t/m}^3$

T_c : Temps de cycle moyen ; ($T_c = 3,2 \text{ min}$)

T_p : Temps de travail par poste ; ($T_p = 8 \text{ h}$)

$$R_p = \frac{60 \times 6 \times 8 \times 0,95 \times 0,45}{0,32 \times 1,5} = 2565 \text{ t/poste}$$

I.11.2.2. Rendement mensuel

Elle se donne par la formule :

$$R_{pm} = R_p \times n_p \times N_j ; \text{ t/mois [8]} \quad (\text{I.29})$$

Où :

n_p : Nombre de postes par jour ; ($n_p = 3$ poste)

N_j : Nombre de jours par mois ; ($N_j = 30$ jours)

$$R_{pm} = 2565 \times 3 \times 30 = 230850 \text{ t/mois}$$

I.11.2.3. Rendement annuel de la pelle

Elle se donne par la formule :

$$R_{p.an} = R_p \times n_p \times N_{j.an} [8] \quad (\text{I.30})$$

$N_{j.an}$: nombre de jours ouvrable ; ($N_{j.an} = 365$ jours)

$$R_{p.an} = 2565 \times 3 \times 365 = 2808675 \text{ t/an}$$

I.11.2.4. Calcul du nombre des pelles

$$N_p = \frac{P_c}{R_{p.an}} [8] \quad (\text{I.31})$$

Où :

P_c : production planifier ; ($P_c = 3500000$ t)

$$N_p = \frac{3500000}{2808675} \approx 2 \text{ pelles}$$

I.11.2.5. Calcul du nombre total des pelles

$$N_t = N_p \times K_r [8] \quad (\text{I.32})$$

Où :

K_r : coefficient de réserve ; ($K_r = 1.2$)

$$N_t = 2 \times 1.2 \approx 3 \text{ pelles}$$



Figure.I.12 : pelle Cat 390F utilisée pour le chargement

I.12. Transport

I.12.1. Introduction

Le transport des minéraux utiles et des stériles constitue l'un des processus fondamentaux dans les exploitations à ciel ouvert. Il représente une part importante du coût total d'exploitation, pouvant atteindre entre 30 et 70 %.

Dans ce contexte, l'organisation du transport influence largement la configuration du gisement, le choix de la méthode d'exploitation, la sélection des équipements miniers ainsi que les modalités de mise à terril. Il impacte par conséquent la productivité et le coût de revient.

L'objectif principal du transport en carrière est d'assurer le déplacement des matériaux depuis les chantiers d'extraction vers les zones de déversement : les terrils pour les stériles, et les stocks ou trémies de réception des unités de traitement pour le minerai [12].

Les volumes transportés ainsi que leur direction restent généralement relativement constants.

Selon l'orientation des flux, on distingue :

- ❖ **Les flux concentrés** : l'ensemble de la masse minière est acheminé par une seule voie de transport ;
- ❖ **Les flux dispersés** : les charges transitent d'abord par un point intermédiaire avant d'être redistribuées par différentes voies ;

❖ Les flux mixtes.

Dans les carrières, le transport des stériles s'effectue le plus souvent selon un schéma à flux dispersés. Le dimensionnement du système de transport dépend de :

La distance de transport, la productivité de la carrière, les caractéristiques des roches à déplacer, le type d'engin de chargement les conditions géologiques du gisement, le profil des pistes (pente), l'état des pistes.

En fonction de ces paramètres, la solution technique la plus appropriée est retenue pour chaque situation, en tenant compte également des conditions topographiques du site.

Les principaux modes de transport utilisés dans les mines à ciel ouvert sont [12] :

Par camion, Par voie ferrée, Par convoyeur, Par skip, Par couloir gravitaire, Systèmes combinés.

I.12.2. Mode de transport utilisé à Djebel Onk (Kef Essnoun)

Au niveau de la mine de Djebel Onk, le transport des matériaux s'effectue exclusivement par camions, vu le pendage du gîte (gisement plateure), de grande étendue.

I.12.2.1. Engins de transport utilisés à Djebel Onk (Kef Essenoun)

Dans la mine de Kef Essenoun, les roches abattues sont transportées à l'aide de deux types de camions : Caterpillar 773F ($Q_c = 35.6\text{m}^3$) (Figure 1.13, voir tableau (Annexe N°5)) et TEREX TR60 ($Q_c = 35\text{m}^3$) (Figure 1.14, voir tableau (Annexe N°6)). Le minerai est dirigé vers le concasseur, tandis que les stériles sont évacués vers les terrils [6].

Le choix de ces engins repose sur la capacité de production de la carrière, la nature des matériaux transportés, le type d'engins de chargement ainsi que la distance moyenne de transport.

I.12.3. Mode de transport utilisé à El Ma Labiod

Au niveau de la mine de El Ma Labiod, le transport des matériaux s'effectue exclusivement par camions, vu le pendage du gîte (gisement plateure), de grande étendue.

I.12.3.1. Engins de transport utilisés à El Ma Labiod

Dans la mine de El Ma Labiod, les roches abattues sont transportées à l'aide d'un seul type de camion : Caterpillar 770G ($Q_c = 25.2\text{m}^3$) (Figure 1.15. voir tableau (Annexe N°7)). Le minerai est dirigé vers le concasseur, tandis que les stériles sont évacués vers les terrils.

I.12.4. Justification technique du choix

I.12.4.1. Adéquation avec la méthode d'exploitation

L'exploitation étant conduite à ciel ouvert avec un schéma « pelle–camion », l'utilisation de camions miniers constitue la solution la plus flexible et la plus adaptée.

Ce système permet :

- L'acheminement direct du minerai vers le concasseur ;
- L'évacuation des stériles vers les terrils ;
- Une adaptation continue aux déplacements des fronts d'exploitation.

Contrairement aux convoyeurs ou au transport ferroviaire, les camions offrent une grande souplesse face à l'évolution spatiale de la carrière.

I.13.4.2. Compatibilité avec les engins de chargement

Le dimensionnement des camions a été réalisé en cohérence avec les pelles hydrauliques en service (Caterpillar 390F et Liebherr 974) [6].

L'objectif est d'optimiser le couplage pelle–camion (truck–shovel matching) afin de :

- Réduire le nombre de passes de chargement ;
- Minimiser les temps d'attente ;
- Améliorer le rendement horaire global ;
- Maximiser le taux d'utilisation de la flotte.

Cette adéquation contribue directement à l'augmentation de la productivité et à la réduction du coût unitaire de transport.

I.12.4.3. Adaptation aux conditions géotechniques et topographiques

Les pistes minières présentent généralement :

- Des pentes variables ;
- Des rayons de courbure réduits ;
- Un état de surface non revêtu.

Les camions miniers rigides sélectionnés disposent :

- D'une forte capacité de franchissement (gradeability) ;
- D'un système de suspension robuste [12] ;
- D'une motorisation à couple élevé adaptée aux charges lourdes.

Ces caractéristiques garantissent une exploitation sécurisée et performante dans des conditions sévères.

I.12.4.4. Performance économique

Du point de vue technico-économique, les camions miniers présentent :

- Un investissement initial relativement maîtrisé ;

- Une grande flexibilité opérationnelle ;
- Une possibilité d'ajustement rapide de la flotte en fonction des besoins de production.

Ils permettent ainsi d'optimiser le coût du cycle de vie (Life Cycle Cost – LCC) tout en assurant un niveau satisfaisant de disponibilité technique.

Les modèles Caterpillar et TEREX sont reconnus pour :

- Leur robustesse en environnement minier ;
- La disponibilité des pièces de rechange ;
- Leur intégration aisée dans un système de maintenance assistée par ordinateur (GMAO).

Cela contribue à améliorer la disponibilité technique, paramètre essentiel dans une étude de sûreté de fonctionnement des flottes minières.

I.12.5. Calcul du transport par camions

I.12.5.1. Temps de cycle

Le temps de cycle d'un camion est donné par la relation suivante :

$$T_c = T_m + T_{att} + T_{ch} + T_{dech}; [\text{min}][11] \quad (\text{I.33})$$

Où :

T_m : temps de marche du camion

T_{att} : temps d'attente

T_{ch} : temps de chargement

T_{dech} : temps de déchargement

Le temps de cycle : 28.8 min

I.12.5.2. Temps de marche

Le temps de marche est calculé par :

$$T_m = K (T_{m.ch} + T_{m.v})$$

Où :

K : coefficient de démarrage et de freinage ; $K = 1.1$

$T_{m.ch}$: temps de marche en charge

$T_{m.v}$: temps de marche à vide

I.12.5.2.1. Temps de marche en charge

$$T_{m.ch} = \frac{60 \times L}{1000 \times V_{ch}} \quad (\text{I.34})$$

Où :

L : distance de transport (m)

V_{ch} : vitesse du camion chargé (km/h) ; $V_{ch} = 34 \text{ km/h}$

$$T_{m.ch} = \frac{60 \times 5400}{1000 \times 34} = 9.52 \text{ min}$$

I.12.5.2.2. Temps de marche à vide

$$T_{m.v} = \frac{60 \times L}{1000 \times V_v} \quad (\text{I.35})$$

Où :

V_v : vitesse du camion à vide (km/h) ; $V_v = 54 \text{ km/h}$

$$T_{m.v} = \frac{60 \times 5400}{1000 \times 54} = 6 \text{ min}$$

I.12.5.3. Temps de chargement

Le temps de chargement est donné par :

$$T_{ch} = n_g \times T_c(\text{Chargeuse}) \quad (\text{I.36})$$

Où :

n_g : nombre de godets nécessaires pour remplir le camion

T_c : temps de cycle de la chargeuse

$$T_{ch} = 6 \times 32 = 3.2 \text{ min}$$

I.12.5.4. Nombre de godets

Le nombre de godets nécessaires pour remplir la benne est :

$$n_g = \frac{Q_c}{Q_{ch}} \quad (\text{I.37})$$

Où :

Q_c : capacité de la benne du camion (m^3) ; $Q_c = 35.6 \text{ m}^3$ (voir Annexe N°5)

Q_{ch} : capacité du godet de la chargeuse (m^3) ; $Q_{ch} = 6 \text{ m}^3$ (voir Annexe N°4)

$$n_g = \frac{35.6}{6} \approx 6 \text{ godet}$$

I.12.5.5. Nombre de cycles possibles

Le nombre de cycles réalisables pendant un poste est :

$$r = \frac{60 \times T_p \times K_u}{T_c} ; \text{ cycle [11]} \quad (\text{I.38})$$

Où :

T_p : durée du poste (h)

K_u : coefficient d'utilisation du temps ; $K_u = 0.45$

T_c : temps de cycle du camion (min)

$$r = \frac{60 \times 8 \times 0.45}{32} = 6.75 \text{ cycle}$$

I.12.5.6. Nombre de cycles nécessaires pour déplacer la charge

$$R = \frac{A_p \times K_{ir}}{G_{reel}} ; \text{ cycle [11]} \quad (\text{I.39})$$

Où :

A_p : productivité planifiée de la carrière (t/poste)

K_{ir} : coefficient d'irrégularité (1,2)

G_{reel} : charge réelle dans la benne (t)

$$R = \frac{3196.3 \times 1.2}{82.8} = 46.3 \text{ cycle}$$

I.12.5.7. Nombre de camions nécessaires

$$N_c = \frac{R}{r} [11] \quad (\text{I.40})$$

Où :

N_c : nombre de camions nécessaires

R : nombre total de cycles nécessaires

r : nombre de cycles possibles par camion

$$N_c = \frac{46.3}{6.75} \approx 7 \text{ camions}$$

I.12.5.8. Nombre total de camions

$$N_T = N_c \times K_r [11] \quad (\text{I.41})$$

Où :

K_r : coefficient de réserve (1,2)

$$N_T = 7 \times 1.2 \approx 9 \text{ camions}$$

I.12.5.9. Production réelle

La production réelle peut être calculée par :

$$A_r = N_c \times N_r \times Q_c [11] \quad (\text{I.42})$$

Où :

A_r : production réelle (t/poste)

N_r : nombre de rotations (cycles)

Q_c : capacité du camion (t)

$$Ar = 7 \times 4 \times 82.8 = 2318.4 \text{ t/poste}$$



Figure.I.13 : camion Cat773F



Figure.I.14 : camion Terex TR60



Figure.I.15 : camion Cat 770G

I.12.6. Rôle du transport par camions dans la productivité

Le transport par camions (le roulage) est souvent considéré comme le "poumon" de la mine de Djebel Onk. C'est le maillon le plus flexible, mais aussi le plus coûteux et le plus critique pour la productivité globale [11].

Les rôles clés que joue le transport par camions dans la performance de la mine:

I.12.6.1. La Flexibilité Opérationnelle

Contrairement aux convoyeurs à bande qui sont fixes, les dumpers rigides permettent d'adapter l'extraction en temps réel :

- **Accès multizones** : Les camions peuvent se déplacer rapidement d'un gradin à un autre ou d'un front de taille à un autre selon la qualité du phosphate rencontré.
- **Gestion des priorités** : Si une zone de la mine révèle un phosphate à plus haute teneur en P₂O₅, la flotte de camions peut y être redirigée instantanément pour maximiser la valeur produite.

I.12.6.1.1. Flexibilité opérationnelle et adaptation géologique

Contrairement aux systèmes de convoyage fixes, les dumpers rigides offrent une adaptabilité indispensable aux réalités du gisement :

- **Sélectivité et gestion des priorités** : La teneur en P₂O₅ variant selon les fronts de taille, les camions permettent de basculer instantanément vers les zones les plus riches pour répondre aux exigences de l'usine.

- **Gestion des imprévus et de la topographie** : La flotte peut être réaffectée immédiatement en cas de panne d'une pelle ou d'éboulement. De plus, les camions s'adaptent sans délai à l'approfondissement constant de la mine et à la reconfiguration des rampes d'accès.

I.12.6.2. Le Maillon Déterminant du Rythme (Cadence)

La productivité d'une pelle hydraulique dépend directement de la disponibilité des camions.

- **Optimisation du cycle** : Le cycle "chargement - transport - déchargement - retour" doit être parfaitement synchronisé. Si les camions tardent, la pelle s'arrête ; si les camions s'accumulent (file d'attente), le carburant est gaspillé.
- **Capacité de charge** : À Kef Essenoun, l'utilisation de camions de grosse capacité (60 à 100 tonnes) permet de déplacer des volumes massifs de roches avec un nombre réduit de chauffeurs et de cycles.

I.12.6.3. Impact sur la chaîne de production

La productivité de la mine repose sur la synchronisation parfaite entre les unités de chargement (pelles) et le transport.

- **L'adéquation Pelle-Camion (Match Factor)** : C'est le ratio entre le nombre de camions et la capacité de la pelle. Un mauvais ratio entraîne :
 - Sous-camionnage : La pelle attend les camions (perte de productivité de l'unité de chargement).
 - Sur-camionnage : Les camions font la queue à la pelle (perte de carburant et de temps de cycle).
- **Le Temps de Cycle** : Il se décompose en : Temps de chargement + Temps de transport plein + Temps de déchargement + Temps de retour vide + Temps d'attente. Toute réduction du temps de cycle (par l'amélioration de l'état des pistes, par exemple) augmente mécaniquement le nombre de tonnes déplacées par heure.
- **Alimentation de l'usine** : Les camions assurent le flux tendu vers le concasseur primaire. Une rupture dans la rotation des camions entraîne l'arrêt des installations de traitement en aval, impactant toute la chaîne de valeur jusqu'au port d'Annaba.

I.12.6.4. Impact sur les Coûts Opérationnels (OPEX)

Le transport représente souvent 40% à 60% des coûts d'exploitation d'une mine à ciel ouvert. Son rôle dans la productivité est donc aussi financier [5] :

- **Consommation de carburant** : Une gestion efficace des pistes (inclinaison des pentes, état du sol) réduit la consommation et augmente la vitesse de roulage.

- **Maintenance** : La productivité s'effondre si la flotte est vieillissante. À Djebel Onk, le renouvellement régulier des engins est vital pour éviter les arrêts non planifiés.

I.12.6.5. Interface entre la Mine et le Traitement

Le camion fait le pont entre l'extraction brute et le processus industriel :

- **Sélectivité** : Les chauffeurs orientent le chargement soit vers les halles de stérile (déchets), soit vers les stocks de minerai, soit directement vers le concasseur. Une erreur d'aiguillage impacte directement la pureté du produit final.
- **Alimentation du concasseur** : Un flux régulier de camions assure que le concasseur primaire ne tourne jamais à vide, optimisant ainsi l'utilisation de l'énergie électrique de l'usine.

I.12.6.6. Transition vers l'Automatisation

Dans les projets de modernisation de 2026, le rôle du transport évolue vers plus de précision vers une mine intelligente renforce la précision du transport :

- **Systèmes de Dispatch** : Utilisation du GPS pour envoyer le camion le plus proche vers la pelle qui vient de terminer son chargement.
- **Télémetrie** : Surveillance en temps réel de la pression des pneus et de la charge utile pour éviter la sous-utilisation ou la surcharge des véhicules.

En résumé : Si le forage prépare le terrain et la pelle extrait la richesse, c'est le camion qui définit la vitesse à laquelle cette richesse est transformée en profit. Une flotte de camions bien gérée est le signe d'une mine à haute performance.

La productivité n'est pas seulement le volume extrait, c'est le ratio Tonnes Déplacées / Coût Engagé. Le transport par camions est le levier principal sur lequel l'ingénieur minier peut agir pour optimiser ce ratio en jouant sur l'organisation des rotations et la qualité des infrastructures de roulage.

I.13. Groupe de gisement

Conformément aux classifications des réserves de roches carbonatées de la République populaire de Bulgarie, le gisement Djebel El Onk en raison de ses dimensions, de la continuité de sa puissance et de la composition chimique des phosphates, appartient à la catégorie des grands gisements de premier type [9].

Elles ont pour objectif de caractériser les roches afin de déterminer leur propriétés géomécaniques nous permettant de fixer les valeurs qui nous aideront à obtenir avec précision les valeurs des coefficients empiriques, tels que Krg et autres conditionnent le calcul des paramètres de fonctionnement des équipements miniers.

C'est pourquoi une série des mesures expérimentales ont été réalisés in-situ au niveau du laboratoire de l'entreprise minière (densité, dureté,) et d'autres effectuées au niveau du laboratoire de l'institut des mines (tirabilité, ...) (Figure 1.16).



Figure.I.16 : Essais géomécaniques réalisées au niveau de laboratoire du l'institut des mines

I.14. Conclusion


À travers ce chapitre, une présentation générale de la mine de phosphate de Djebel Onk a été réalisée, mettant en évidence sa situation géographique, son contexte géologique ainsi que son importance économique dans le secteur minier national.

L'étude a également permis de décrire l'organisation de la carrière, les méthodes d'exploitation adoptées ainsi que le parc matériel utilisé, en particulier les camions de transport qui constituent un élément essentiel du cycle d'exploitation minière. En effet, le transport par camions assure la liaison entre les différentes opérations d'extraction, de chargement et de traitement du minerai, influençant directement la continuité et la productivité de la production.

Compte tenu des conditions sévères d'exploitation caractérisant les mines à ciel ouvert charges élevées, environnement poussiéreux et sollicitations mécaniques importantes les camions miniers sont particulièrement exposés aux défaillances susceptibles d'engendrer des arrêts de production coûteux.

Ainsi, il devient indispensable d'analyser leur comportement en fonctionnement réel afin d'évaluer leur niveau de fiabilité et d'identifier les causes principales de dégradation des performances.

Dans cette optique, le chapitre suivant sera consacré à l'analyse de la fiabilité des camions de transport, basée sur l'exploitation des données d'exploitation et de maintenance, dans le but d'évaluer la disponibilité des équipements et d'améliorer la sûreté de fonctionnement du système de transport au sein de la mine de Djebel Onk.



Chapitre II
Lois et caractéristiques
de la fiabilité

II.1. Introduction

La fiabilité constitue aujourd'hui un élément essentiel dans l'étude et l'exploitation des systèmes industriels, en particulier dans le domaine minier, où les équipements sont soumis à des conditions de travail sévères telles que les contraintes mécaniques, la poussière, les variations climatiques et les charges élevées.

L'analyse de la fiabilité permet d'évaluer la capacité d'un système ou d'un équipement à accomplir la fonction pour laquelle il a été conçu pendant une durée déterminée et dans des conditions d'utilisation bien définies.

Dans les exploitations minières, notamment dans les carrières à ciel ouvert, les engins de transport tels que les camions miniers jouent un rôle fondamental dans la continuité du processus de production. Toute défaillance de ces équipements peut entraîner une baisse de productivité, une augmentation des coûts de maintenance et, parfois, des risques pour la sécurité.

II.2. Notions générales de défaillance

Une défaillance (« failure ») est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. La défaillance d'une entité résulte de causes pouvant dépendre des circonstances liées à la conception, à la fabrication ou à l'utilisation, et qui ont conduit à cette défaillance. Enfin, le mode de défaillance est la manière dont une défaillance se manifeste. [13]

Le taux de défaillance peut être rapproché de la probabilité pour qu'un composant devienne défaillant à l'instant $t + dt$, sachant qu'il ne l'est pas à l'instant t . On le note λ et il s'exprime à partir de la fiabilité selon la relation suivante :

$$\lambda(t) = -\frac{d}{dt}(\log R(t)) \quad (\text{II.1})$$

Les défaillances peuvent être classées selon plusieurs critères :

✓ Défaillance totale : elle correspond à l'arrêt complet du fonctionnement de l'équipement.

✓ Défaillance partielle : le système continue à fonctionner, mais avec des performances réduites.

✓ Défaillance progressive : elle se produit progressivement avec le temps en raison de l'usure des composants.

✓ Défaillance brutale : elle apparaît soudainement, sans signes précurseurs apparents.

L'analyse des défaillances permet d'identifier leurs causes et de mettre en place des actions correctives afin d'améliorer la performance globale des systèmes.

II.3. Les concepts de base de la sûreté de fonctionnement (SDF)

La sûreté de fonctionnement (SDF) est appelée la science des « défaillances ». D'autres désignations existent suivant les domaines d'application : analyse de risque (domaine pétrolier), aléatoire, cindynique (science du danger), FMD (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité), en anglais RAM (Reliability, Availability, Maintainability) [14].

Elle se distingue par l'étude des systèmes sous leurs aspects structurels, à la fois statiques et dynamiques, en adoptant une approche prévisionnelle, opérationnelle et expérimentale (essais, accidents). Elle prend en considération les aspects probabilistes ainsi que les conséquences engendrées par les défaillances, qu'elles soient d'origine technique ou humaine.

Cette discipline intervient aussi bien sur des systèmes déjà existants que dès la phase de conception, lors de la réalisation des systèmes.

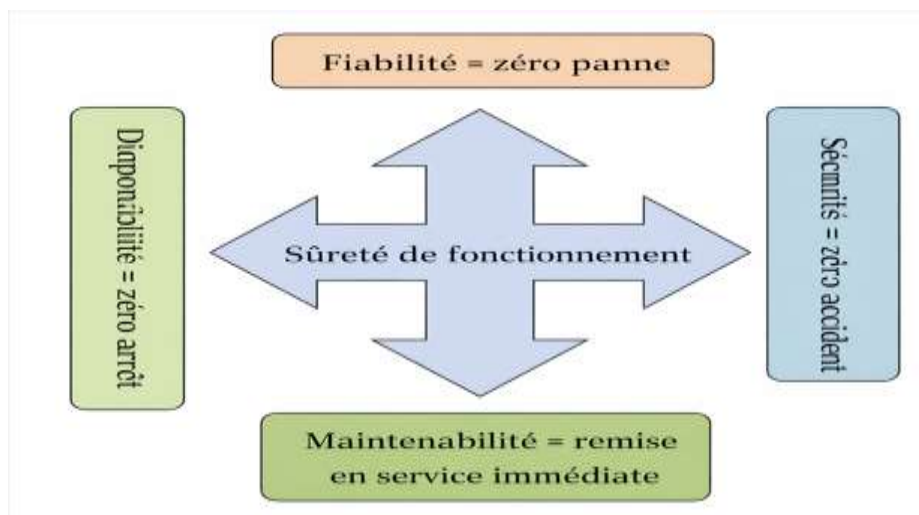


Figure II.1 : Les éléments clés de la sûreté de fonctionnement

II.3.1. La fiabilité

II.3.1.1. Définition de la fiabilité

Selon la norme NF X60-500, la fiabilité est définie comme la capacité d'une entité à assurer une fonction donnée dans des conditions spécifiées, durant une période de temps déterminée.

Le terme entité désigne, au sens général, tout élément technique tel qu'un composant, un sous-système ou un système complet. Quant à la fonction requise, elle correspond à l'ensemble des opérations que le dispositif doit réaliser afin de remplir correctement la mission qui lui est assignée.

Soit T l'instant aléatoire correspondant à l'apparition d'une défaillance. Cette variable permet d'introduire la notion de fiabilité, qui se traduit par la probabilité que l'entité fonctionne sans panne jusqu'à un instant donné t , ou, de manière équivalente, qu'elle ne subisse pas de défaillance avant cet instant.

Par abus de langage, le terme fiabilité est également utilisé pour désigner la fonction $R(t)$, qui représente la mesure probabiliste associée à cette aptitude. [14]

Elle est définie par :

$R(t) = P(E \text{ non-défaillante sur la durée } [0, t], \text{ en supposant qu'elle n'est pas défaillante à l'instant } t = 0).$

Ce qui peut s'exprimer par :

$$R(t) = P(T > t) \quad (\text{II.2})$$

L'aptitude contraire est appelée défiabilité, est définie par :

$$\bar{R}(t) = 1 - R(t) = p(t < T) = F(t) \quad (\text{II.3})$$

II.3.1.2. Les différentes sortes de fiabilité

On distingue plusieurs types de fiabilité :

La fiabilité opérationnelle (observée ou estimée) déduite de l'analyse d'entités identiques dans les mêmes conditions opérationnelles à partir de l'exploitation d'un retour d'expérience;

La fiabilité prévisionnelle (prédite) correspondant à la fiabilité future d'un système et établie par son analyse, connaissant les fiabilités de ses composants;

La fiabilité extrapolée déduite de la fiabilité opérationnelle par extrapolation ou interpolation pour des conditions ou des durées différentes;

La fiabilité intrinsèque ou inhérente qui découle directement des paramètres de conception, sans modification de conception des entités, il n'est pas possible d'obtenir un niveau de fiabilité au plus égal à la fiabilité intrinsèque. [15]

II.3.1.3. Représentation Graphique De $R(t)$, $F(t)$

Un dispositif mis en marche pour la première fois à (t_0) tombera en panne à un instant non connu a priori "t" : date de la panne est une variable aléatoire de la fonction de répartition "F(t)."

F(t) est la probabilité d'une défaillance avant l'instant (ti);

$R(t)$ est la probabilité de bon fonctionnement à (t_i) , c'est une fonction monotone décroissante;

$R(t)$ et $F(t)$ sont des probabilités complémentaires, telle que :

$$R(t) + F(t) = 1 \text{ ou } \int_0^t f(t) dt + \int_t^\infty f(t) dt = 1 \quad (\text{II.4})$$

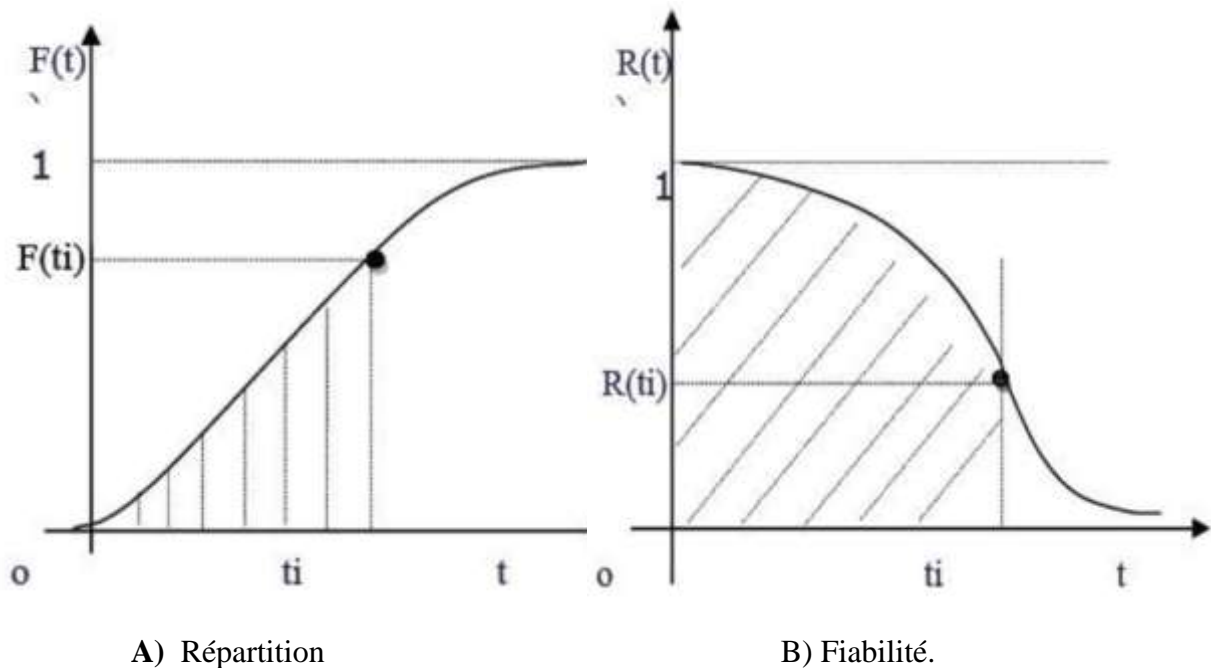


Figure II.2 : Courbes paramétrique [16]

II.3.1.4. Caractéristiques de la fiabilité

La fiabilité d'un système se caractérise par plusieurs grandeurs fondamentales permettant de décrire son comportement face aux défaillances au cours du temps.

La première caractéristique est la **durée de vie**, qui représente le temps de fonctionnement d'un système avant l'apparition d'une défaillance. Cette durée est généralement modélisée par une variable aléatoire, traduisant le caractère incertain des pannes.

Une autre caractéristique essentielle est la **fonction de fiabilité** $R(t)$, qui exprime la probabilité qu'un système fonctionne sans défaillance jusqu'à un instant donné t . Elle permet d'évaluer la performance du système dans le temps.

La **fonction de défaillance** $F(t)$, complémentaire de la fonction de fiabilité, représente la probabilité qu'une défaillance survienne avant l'instant t . Elle est définie par la relation :

$$F(t)=1-R(t) \quad (\text{II.5})$$

Par ailleurs, le **taux de défaillance** $\lambda(t)$ constitue une caractéristique importante. Il traduit la probabilité instantanée de défaillance à un instant donné, en tenant compte du fait que le système a fonctionné sans panne jusqu'à cet instant. [17]

II.3.1.5. Les indicateurs de fiabilité

Les indicateurs de fiabilité constituent des outils fondamentaux permettant d'évaluer les performances des systèmes industriels en termes de défaillance et de maintenance.

Le **taux de défaillance** (λ) représente la fréquence d'apparition des pannes au cours du temps. Dans le cas d'un taux constant, il est considéré comme l'inverse du temps moyen de bon fonctionnement.

Le **MTBF (Mean Time Between Failures)** est défini comme le temps moyen de fonctionnement entre deux défaillances successives pour un système réparable. Il constitue un indicateur essentiel pour mesurer la fiabilité globale.

Le **MTTR (Mean Time To Repair)** correspond au temps moyen nécessaire pour remettre un système en état de fonctionnement après une panne. Il permet d'évaluer l'efficacité des opérations de maintenance.

Le **MTTF (Mean Time To Failure)** désigne le temps moyen avant la première défaillance d'un système non réparable. Il est généralement utilisé pour les composants à durée de vie limitée. [18]

II.3.2. La disponibilité

II.3.2.1. Définition

C'est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné. La disponibilité est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité E soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à l'instant t.

$$A(t) = P [E \text{ non défaillante à l'instant } t]$$

Cette caractéristique est appelée disponibilité instantanée. L'aptitude contraire sera dénommée indisponibilité ; sa mesure est notée La disponibilité ainsi définie ne fait pas appel à l'histoire de l'entité, qu'elle ait été ou non réparée une ou plusieurs fois avant l'instant t (c'est en quelque sorte une probabilité non conditionnelle). Il est donc évident que pour un système non réparable, la disponibilité est égale à la fiabilité et que d'une façon générale $A(t) \geq R(t)$.

La disponibilité peut se décliner en termes de fiabilité et maintenabilité. [19]

II.3.2.2. Différents niveaux de la disponibilité

➤ Disponibilité intrinsèque théorique

Cette disponibilité est évaluée en prenant en compte les moyennes des temps de bon fonctionnement et les moyennes de réparations, ce qui donne:

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (\text{II.6})$$

➤ Disponibilité moyenne

La disponibilité moyenne sur un intervalle de temps donné peut-être évalué par les rapports suivants:

$$D_m = \frac{TCBF}{MCBF + TCI} \quad (\text{II.7})$$

TCI : Temps cumulé d'immobilisation

➤ Disponibilité opérationnelle

Pour cette mesure, sont pris en compte les temps logistiques, ce qui donne:

$$D_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MLT} \quad (\text{II.8})$$

Avec:

MTL : moyenne des temps logistiques.

➤ **Disponibilité asymptotique**

Lorsque λ et μ sont indépendants de temps et quand (t) devient grand, on constate que D (t) tend vers une valeur constante.

Cette valeur est souvent dénommée disponibilité asymptotique et se note A_∞ est égale à:

$$A_\infty = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (\text{II.9})$$

Avec:
$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (\text{II.10})$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (\text{II.11})$$

➤ **Disponibilité Instantanée**

Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance λ constant et d'un taux de réparation μ constant, on montre que la disponibilité instantanée a pour expression:

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (\text{II.12})$$

II.3.3. La Maintenabilité

Dans des conditions données, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

Maintenabilité = être rapidement dépanné

C'est aussi la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. [20]

A partir de ces définitions, on distingue :

La maintenabilité intrinsèque : elle est « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges prenant en compte les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc.).

La maintenabilité prévisionnelle : elle est également « construite », mais à partir de l'objectif de disponibilité.

La maintenabilité opérationnelle : elle sera mesurée à partir des historiques d'interventions.

L'analyse de maintenabilité permettra d'estimer la MTTR ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité (sur les mêmes modèles que la fiabilité).

II.3.4. La sécurité

Bien que la norme [CEI 50 (191), 1990] n'intègre pas la sécurité comme composant de la sûreté de fonctionnement, nous considérons qu'il est important de la prendre en compte car l'occurrence d'un événement catastrophique met en péril la vie humaine.

En fait, le concept de sécurité est probablement le plus difficile à définir et à évaluer, car il englobe des aspects très divers. Cependant, la norme [EN 292 – 1, 1991] sur la sécurité des machines donne cette définition:

Aptitude d'une machine à accomplir sa fonction, à être transportée, installée, mise au point, entretenue, démontée et mise au rebut dans les conditions d'utilisation normales spécifiées dans la notice d'instructions, sans causer de lésions ou d'atteinte à la santé.

La sécurité peut également s'exprimer sous forme d'une probabilité que le système évite de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [21]. Si on considère que les défaillances d'un système se partagent en deux catégories, celles qui sont dangereuses et celles qui ne le sont pas, la sécurité peut être considérée comme la part de la fiabilité relative aux défaillances dangereuses. Ce concept peut devenir prépondérant dans une analyse de sûreté de fonctionnement, dans la mesure où une défaillance du système peut présenter un risque de dommage corporel à l'encontre des usagers.

La Sécurité, se définit par l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données sans provoquer d'événement catastrophique:

$$S(t) = \text{Probabilité } \{E \text{ soit sans défaillance catastrophique sur } [0,t]\}$$

Les grandeurs caractéristiques de la sûreté de fonctionnement sont régies par un certain nombre d'interactions (Figure II.3)

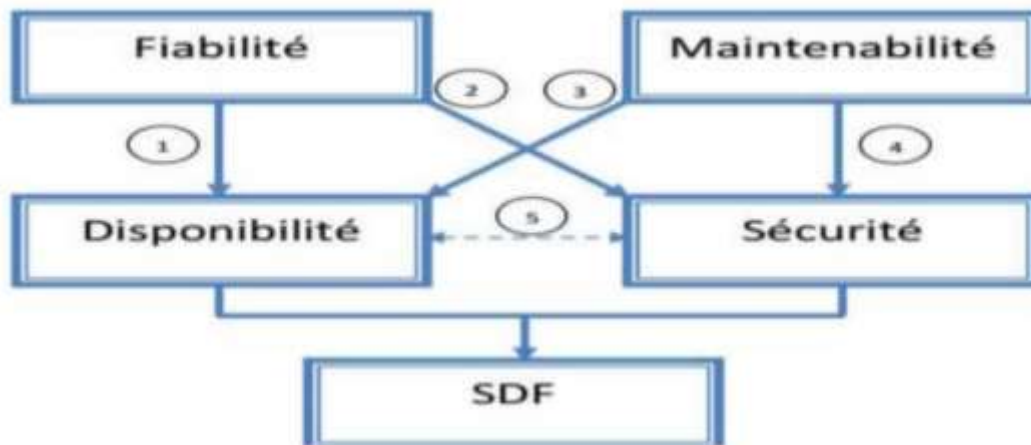


Figure II.3 : Les interactions entre les grandeurs de la sûreté De fonctionnement (SDF) [17]

II.4. Les principales lois utilisées en fiabilité

La fiabilité est, de plus en plus fréquemment, une grandeur quantitative et nécessite la connaissance des distributions de durée de vie afin de l'estimer.

Nous présentons dans cette section les lois et les modèles de fiabilité susceptibles, selon l'expérience, de représenter des distributions de durée de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse de la sûreté de fonctionnement. Nous rappelons les principales propriétés de ces lois, les fonctions associées, les densités de probabilité ainsi que les taux de défaillance. [17]

On distingue deux types :

✚ **Lois discrètes**

✚ **Lois continues**

L'analyse de la fiabilité repose souvent sur l'utilisation de lois probabilistes permettant de modéliser les défaillances.

II.4.1. Les lois discrètes

Une loi est dite discrète si elle prend ses valeurs dans \mathbb{N} c'est à dire des valeurs entières comme par exemple celle qui compte le nombre de pannes.

Parmi les lois discrètes on peut citer:

II.4.1.1. Loi uniforme

Une distribution de probabilité suit une loi uniforme lorsque toutes les valeurs prises par la variable aléatoire sont équiprobables. Si n est le nombre de valeurs différentes prises par la variable aléatoire. La fonction de fiabilité est définie par l'expression suivante:

$$p(x = xi) = \frac{1}{n} \quad (\text{II.13})$$

Avec les paramètres de signification:

n : est le nombre de valeurs différentes prises par la variable aléatoire.

II.4.1.2. Loi binomiale

Décrite pour la première fois par Isaac Newton en 1676 et démontrée pour la première fois par le mathématicien suisse Jacob Bernoulli en 1713, la loi binomiale est l'une des distributions de probabilité les plus fréquemment rencontrées en statistique appliquée.

En mathématiques, une loi binomiale de paramètres n et p est une loi de probabilité qui correspond à une expérience aléatoire à deux issues possibles, généralement dénommées respectivement « succès » et « échec », la probabilité d'un succès étant p .

Sa fonction de probabilité est:

$$P(k) = P(x = k) = C_k^n p^k q^{n-k} \quad (\text{II.14})$$

$$C_k^n = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (\text{II.15})$$

Avec les paramètres de signification:

$(n \geq 0)$: Nombre d'épreuves.

$(0 \leq p \leq 1)$: probabilité de succès.

Et $q = 1 - p$.

II.4.1.3. La loi binomiale négative

La loi binomiale négative est la loi de probabilité de la variable aléatoire X qui comptabilise le nombre d'échecs nécessaires avant obtention de n succès, sachant que la probabilité d'un succès est p .

Sa fonction de probabilité est :

$$P(X = k) = f(k, n, p) = C_k^{k+n} p^n q^k \quad (\text{II.16})$$

La loi binomiale négative peut aussi s'écrire sous la forme :

$$f(k, n, p) = C_k^{-n} p^n (-q)^k \quad (\text{II.17})$$

Où C_k^{-n} est un coefficient binomial appliqué à un entier négatif et est défini par :

$$C_k^{-n} = \frac{(-n)(-n-1)\dots(-n-k+1)}{k!} \quad (\text{II.18})$$

II.4.1.4. Loi de Bernoulli

Soit un univers constitué de deux éventualités, S pour succès et E pour échec = $\{E, S\}$ sur lequel on construit une variable aléatoire discrète, « nombre de succès » telle qu'au cours d'une épreuve :

Si (S) est réalisé, $X = 1$

Si (E) est réalisé, $X = 0$

L'expression de la fonction de fiabilité s'écrit :

$$P(X = 0) = q$$

$$P(X = 1) = p$$

$$(p + q = 1) \quad (\text{II.19})$$

II.4.1.5. Loi de Poisson

Une variable aléatoire x suit une loi de « Poisson » si elle peut prendre les valeurs entières $0, 1, 2, 3 \dots n$. La probabilité pour que x soit égal à k est :

$$(x = n) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^n}{n!} \quad (\text{II.20})$$

λ : paramètre de la loi (constante positive).

Relation de Poisson

La probabilité pour qu'un événement se produise est d'autant plus vraie que la population concernée est grande et le nombre d'évènement petit.

Par conséquence la loi de Poisson servira à étudier les phénomènes rares, tels que les accidents, pannes, défauts de fabrication où la probabilité p est très faible ($p < 0.05$). Elle peut également dans certaines conditions être définie comme limite d'une loi binomiale.

La probabilité de constater un certain nombre de pannes (n) dans le temps (t) et seulement (n) pannes est :

$$P(x = n) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^n}{n!} \quad (\text{II.21})$$

L'espérance mathématique est : λt .

La variance : λt .

L'écart type $\sigma = \sqrt{\lambda t}$.

II.4.2. Les lois continues

II.4.2.1. La loi Gamma

La loi gamma est la loi de l'instant d'occurrence du $\alpha^{\text{ème}}$ évènement dans un processus de Poisson.

Soit $\{T\}$ le vecteur représentant les durées inter évènements (les temps entre les défaillances successives d'un système). Si ces durées sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées selon une loi exponentielle de paramètre β , alors le temps cumulé d'apparition de ces défaillances suit une loi Gamma de paramètre (α, β) . Sa densité de probabilité s'écrit:

Sa fonction de densité de probabilité est

$$f(t) = \frac{\beta^\alpha t^{\alpha-1} e^{-\beta t}}{\Gamma(\alpha)} \quad t \geq 0, \alpha \geq 1 \text{ et } \beta \geq 0. \quad (\text{II.22})$$

II.4.2.2. Loi inverse gamma

Dans la Théorie des probabilités et en Statistiques, la distribution inverse-gamma est une famille de lois de probabilité continues à deux paramètres sur la demi-droite des réels positifs.

Il s'agit de l'inverse d'une variable aléatoire distribuée selon une Distribution Gamma.

Sa fonction caractéristique est:

$$P(x) = \frac{\beta}{\tau(\alpha)} x^{-\alpha-1} e^{\left(\frac{-\beta}{x}\right)} \quad (\text{II.23})$$

Avec les paramètres de signification:

$\alpha > 0$: paramètre de forme

$\beta > 0$: paramètre d'échelle

II.4.2.3. La loi normale

Cette loi est aussi appelée loi de Gauss, en l'honneur du grand mathématicien allemand Karl Friedrich Gauss (1777_1855).

La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus utile, elle est utilisée afin d'approcher des probabilités associées à des variables aléatoires binomiales possédant un paramètre 'n' très grand. Elle représente beaucoup de phénomènes aléatoires. De plus, de nombreuses autres lois statistiques peuvent être approchées par la loi normale, tout spécialement dans le cas des grands échantillons.

Sa fonction de fiabilité est :

$$n(t) = \frac{n}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{II.23})$$

Avec les paramètres de signification:

μ : La moyenne.

σ : L'écart type.

N : Le nombre totale d'individus dans l'échantillon.

n(x) : Le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur x.

II.4.2.4. Loi exponentielle

La loi exponentielle a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales Cette loi est la plus couramment utilisée en fiabilité électroniques pour décrire la période durant laquelle le

taux de défaillance des équipements est considéré comme constant (défaillance aléatoire).

Elle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances. Elle est définie par un seul paramètre (le taux de défaillance λ).

Une variable aléatoire T est de loi exponentielle de paramètre $\lambda > 0$, notée $\exp(\lambda)$, si et seulement si:

_Sa fonction de répartition est:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{II.25})$$

_Sa fiabilité est:

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - F(t) & (\text{II.26}) \\ &= e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

_Sa densité est:

$$\begin{aligned} f(t) &= \dot{F}(t) & (\text{II.27}) \\ &= \lambda e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

_Sa durée de vie moyenne est:

$$\begin{aligned} \text{MTTF} &= E[T] & (\text{II.28}) \\ &= \int_0^{+\infty} R(t) dt \\ &= \int_0^{+\infty} e^{-\lambda t} dt \\ &= \frac{1}{\lambda} \end{aligned}$$

_Son taux de défaillance est:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{II.29})$$

Le taux de défaillance est donc constant, ce qui signifie que la loi exponentielle modélise les durées de vie de systèmes qui ne s’usent pas et qui ne s’améliorent pas.

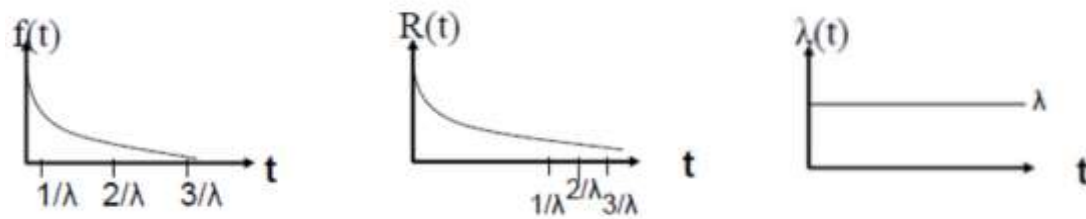


Figure II.4 : distribution des fonctions de la loi exponentielle [16]

II.4.2.5. Loi de Weibull

La loi de Weibull, notée par $W(\eta; \beta; \gamma)$, est souvent utilisée en mécanique. Cette loi a l’avantage d’être très souple et de pouvoir s’ajuster à différents résultats d’expérimentations.

La distribution de Weibull est décrite par trois paramètres :

Le paramètre de forme β : est un paramètre la forme de la distribution.

Si $\beta > 1$, le taux de défaillance est croissant, caractéristique de la zone de vieillesse.

$1,5 < \beta < 2,5$: fatigue

$3 < \beta < 4$: usure, corrosion

Si $\beta = 1$, le taux de défaillance est constant, caractéristique de la zone de maturité.

Si $\beta < 1$, le taux de défaillance est décroissant, caractéristique de la zone de jeunesse.

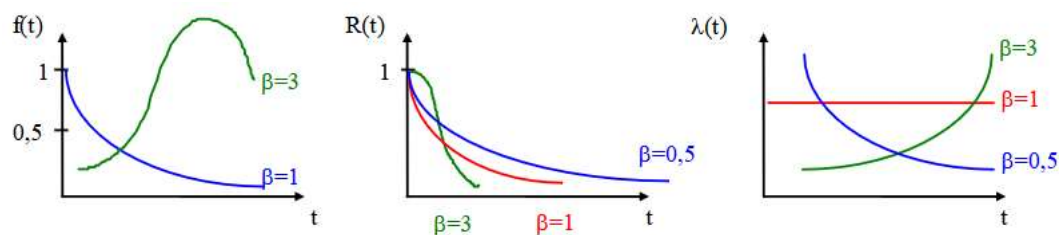


Figure II.5 : Représentation du paramètre de forme de la distribution β .

Cette loi est très flexible : selon la valeur du **paramètre de forme β** , elle peut représenter différents types de comportements de panne :

Tableau II.1 : Interprétation du paramètre de forme β de la loi de Weibull

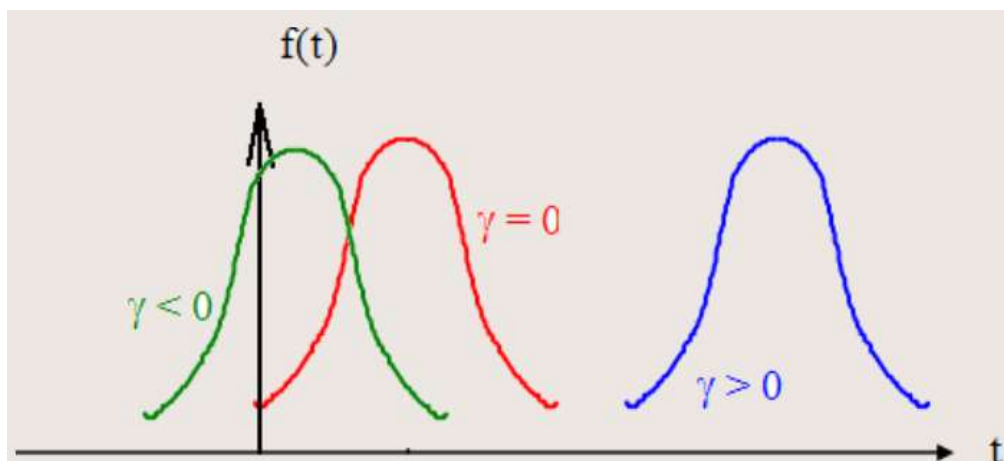
Valeur de β	Type de défaillance	Interprétation
$\beta < 1$	Défaillances précoces	Défauts de jeunesse ou de fabrication
$\beta = 1$	Pannes aléatoires	Loi exponentielle (pannes imprévisibles)
$\beta > 1$	Usure progressive	Vieillessement ou fatigue du matériel

Le paramètre de position γ est, comme son nom l'indique, un paramètre qui régit la position d'une distribution de probabilité.

Si $\gamma > 0$: une probabilité de défaillance dans les premières utilisations du système est nulle.

Si $\gamma = 0$: une probabilité de défaillance sera présente dès la mise en service du Système.

Si $\gamma < 0$: ceci explique qu'une probabilité de défaillance est déjà présente au moment de l'installation du système.

**Figure II.6** : Représentation du paramètre de position γ

Le paramètre d'échelle η

η : Paramètre d'échelle > 0 qui s'exprime dans l'unité de temps.

Il dirige l'échelle ou encore la dispersion de la distribution. Si h est grand, alors la distribution est très étalée, si h est petit, la distribution est concentrée.

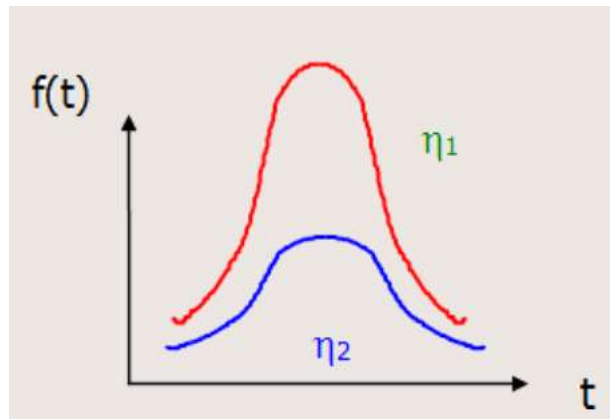


Figure II.7 : Représentation du paramètre d'échelle η

La loi de Weibull est donc un **outil statistique complet** permettant de décrire :

- ✓ La **fiabilité** $R(t)$,
- ✓ La **probabilité de défaillance** $F(t)$, et le **taux de défaillance** $\lambda(t)$ en fonction du temps.

Elle est caractérisée par :

_ La fonction de répartition :

Est la probabilité qu'un composant tombe en panne avant le temps t .

C'est la fonction complémentaire de la fiabilité :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{II.30})$$

_ La fiabilité :

Fonction de fiabilité : représente la probabilité qu'un composant fonctionne encore correctement au temps t , c'est-à-dire qu'aucune panne ne s'est produite avant ce moment.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{II.31})$$

_ La densité de probabilité :

Densité de probabilité $f(t)$: exprime la probabilité instantanée de défaillance à l'instant t . Elle représente la proportion d'éléments qui tombent en panne exactement à ce moment-là.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (\text{II.32})$$

_ Le taux de défaillance :

Taux de défaillance instantané $\lambda(t)$: est la probabilité conditionnelle qu'un composant tombe en panne entre t et $t+dt$, sachant qu'il a fonctionné jusqu'à t .

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \frac{(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta} \quad (\text{II.33})$$

Si $\beta < 1$ → le taux de panne diminue (défauts précoces).

Si $\beta = 1$ → le taux est constant (pannes aléatoires).

Si $\beta > 1$ → le taux augmente (usure progressive).

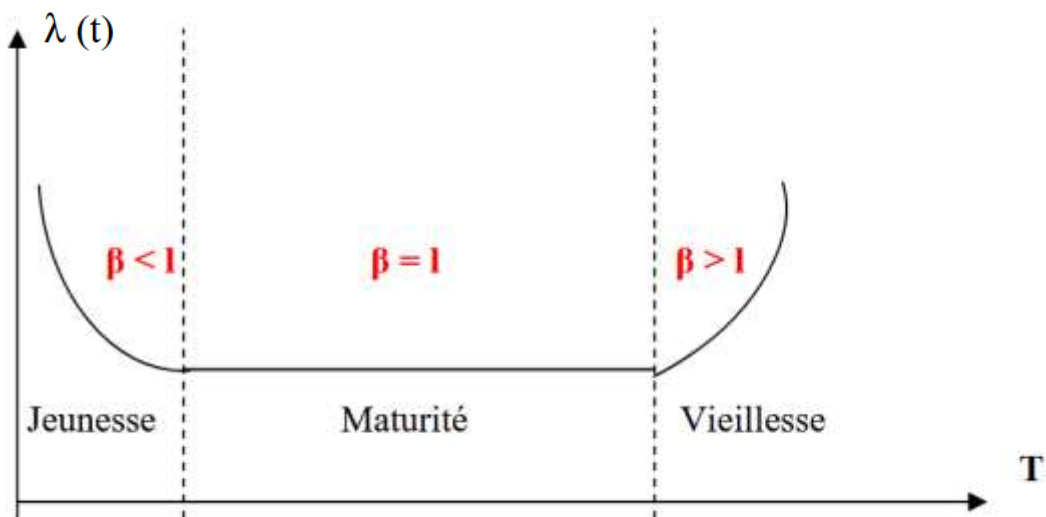


Figure II.8 : courbe en baignoire de Variation du taux de défaillance [22]

On peut remarquer l'influence du paramètre β (coefficient de forme)

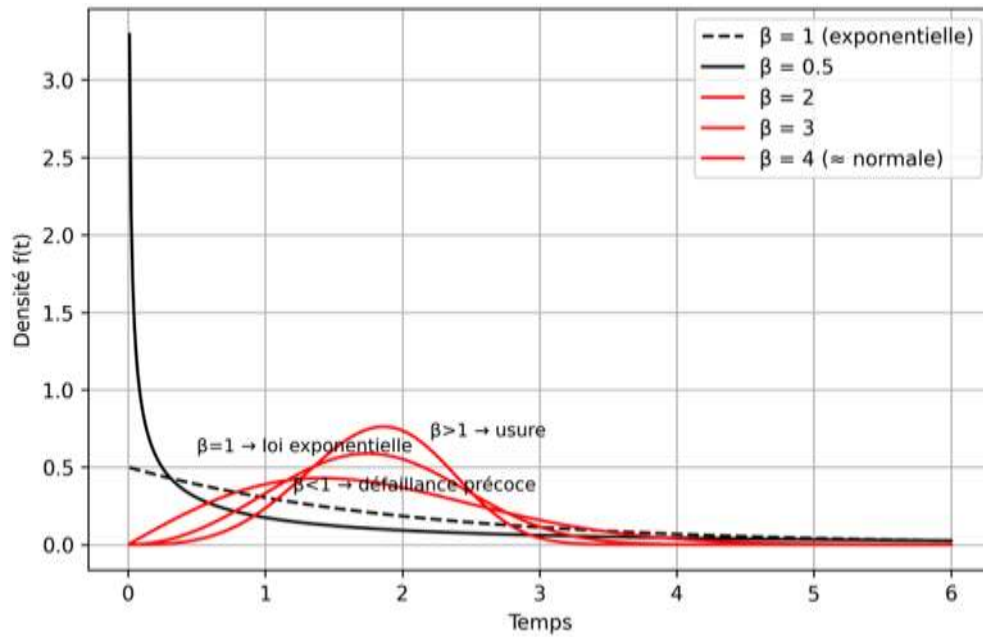


Figure II.9 : Densités de Weibull pour différentes valeurs de β [20]

_ **Le moyen de temps de bon fonctionnement MTBF** : c'est la racine de temps de bon fonctionnement MTBF divisée par le nombre de pannes.

$$MTBF = \gamma + A\eta \text{ et } \sigma = B\eta \tag{II.34}$$

Remarque si :

$$\left\{ \gamma = 0 \text{ et } \beta = 1 \Rightarrow \lambda = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF} \right. \tag{II.35}$$

Tableau II.2 : Paramètres de la loi de Weibull

β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,20	120	1901	1,50	0,9027	0,613	4	0,9064	0,254
0,25	24	199	1,55	0,8994	0,593	4,1	0,9077	0,249
0,30	9,2605	50,08	1,60	0,8966	0,574	4,2	0,9089	0,244
0,35	5,0731	19,98	1,65	0,8942	0,556	4,3	0,9102	0,239
0,40	3,3234	10,44	1,70	0,8922	0,540	4,4	0,9114	0,235
0,45	2,4786	6,44	1,75	0,8902	0,525	4,5	0,9126	0,230
0,50	2	4,47	1,80	0,8893	0,511	4,6	0,9137	0,226
0,55	1,7024	3,35	1,85	0,8882	0,498	4,7	0,9149	0,222
0,60	1,5046	2,65	1,90	0,8874	0,486	4,8	0,9160	0,218
0,65	1,3663	2,18	1,95	0,8867	0,474	4,9	0,9171	0,214
0,70	1,2638	1,85	2	0,8862	0,463	5	0,9182	0,210
0,75	1,1906	1,61	2,1	0,8857	0,443	5,1	0,9192	0,207
0,802	1,1330	1,43	2,2	0,8856	0,425	5,2	0,9202	0,203
0,85	1,0880	1,29	2,3	0,8859	0,409	5,3	0,9213	0,200
0,90	1,0522	1,17	2,4	0,8865	0,393	5,4	0,9222	0,197
0,95	1,0234	1,08	2,5	0,8873	0,380	5,5	0,9232	0,194
1	1	1	2,6	0,8882	0,367	5,6	0,9241	0,191
1,05	0,9803	0,934	2,7	0,8893	0,355	5,7	0,9251	0,186
1,10	0,9649	0,878	2,8	0,8905	0,344	5,8	0,9260	0,185
1,15	0,9517	0,830	2,9	0,8917	0,334	5,9	0,9269	0,183
1,20	0,9407	0,787	3	0,8930	0,325	6	0,9277	0,180
1,25	0,9314	0,750	3,1	0,8943	0,316	6,1	0,9286	0,177
1,30	0,9236	0,716	3,2	0,8957	0,307	6,2	0,9294	0,175
1,35	0,9170	0,687	3,3	0,8970	0,299	6,3	0,9302	0,172
1,40	0,9114	0,660	3,4	0,8984	0,292	6,4	0,9310	0,170
1,45	0,9067	0,635	3,5	0,8997	0,285	6,5	0,9316	0,168
			3,6	0,9011	0,278	6,6	0,9326	0,166
			3,7	0,9025	0,272	6,7	0,9333	0,163
			3,8	0,9038	0,266	6,8	0,9340	0,161
			3,9	0,9051	0,260	6,9	0,9347	0,156

II.4.2.5.1. Papier De Weibull

Le papier de Weibull est utilisé pour **déterminer graphiquement les paramètres** d'une loi de Weibull lorsque le paramètre de position est nul ($\gamma=0$).

Dans ce cas, la fonction de répartition associée, caractérisée par les paramètres β et η , peut être transformée en une **équation linéaire**, ce qui permet une représentation graphique sous forme de droite, est définie par : [20]

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \tag{II.36}$$

$$\Rightarrow \ln(1 - F(t)) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$$

$$\Rightarrow -\ln(1 - F(t)) = \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$$

$$\Rightarrow \ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln \frac{t}{\eta}$$

$$\Rightarrow \ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln t - \beta \ln \eta$$

$$\Rightarrow Y = \beta X - \beta \ln \eta$$

Le paramètre η se détermine à partir de **l'intersection de la droite avec l'axe des abscisses**, qui est gradué en échelle logarithmique.

Le paramètre β correspond au **coefficient directeur (la pente)** de la droite. Pour le déterminer, il suffit de tracer une droite parallèle à la première et de lire directement sa pente sur l'axe d'équation $X = -1$

II.4.2.5.2. Echelles du papier de Weibull

Axe des abscisses :

Échelle supérieure : échelle naturelle en X.

Échelle intermédiaire : échelle logarithmique pour la lecture de t.

Échelle inférieure : échelle logarithmique correspondant à $\ln(t)$.

Axe des ordonnées :

À gauche : les valeurs de $F(t)$ sont exprimées en pourcentage et représentées selon $\ln(-\ln(1-F(t)))$.

Sur l'axe $X = -1$: on lit directement les valeurs de $\ln(-\ln(1-F(t)))$, utiles pour déterminer le paramètre β .

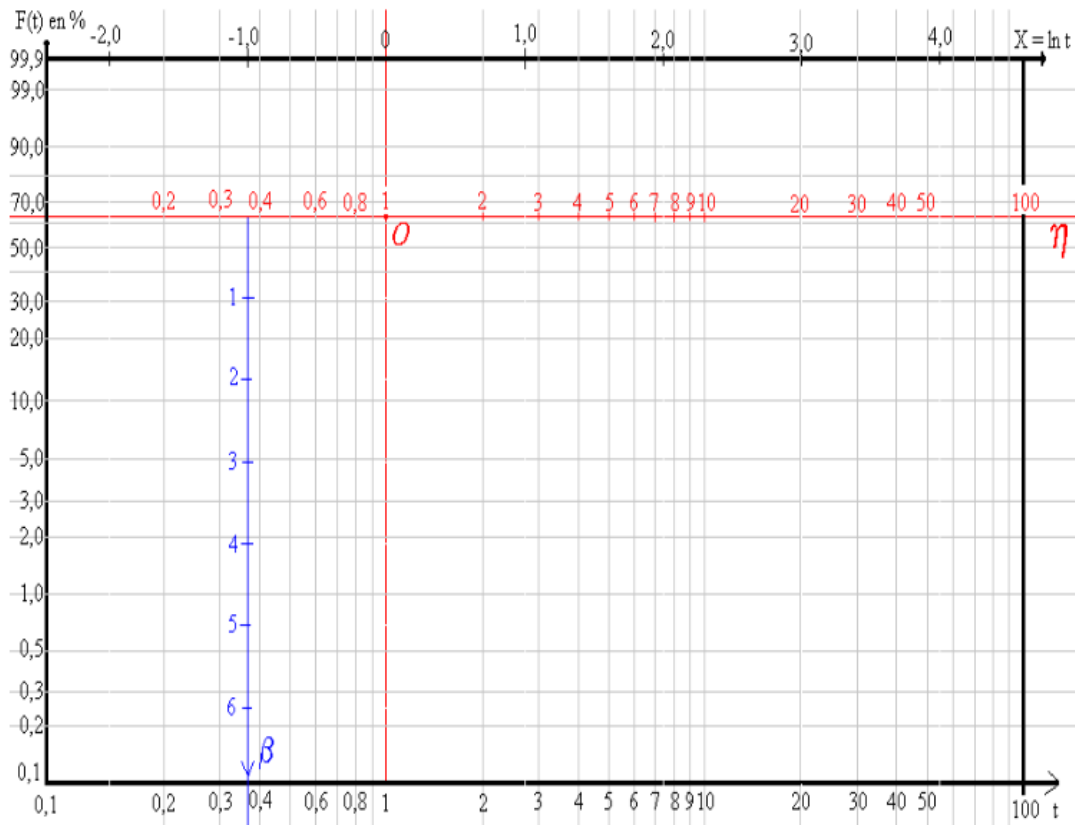


Figure II.10 : Papier de Weibull [23]

A titre d'exemple :

On construit tout d'abord le nuage de points $(t ; F(t))$ puis une droite d'ajustement D , on lit la valeur du paramètre η sur l'axe des abscisses puis on trace la parallèle D' à la droite D passant par l'origine O du repère, on lit le paramètre β sur l'axe d'équation $X = -1$.

Pour calculer gamma. Si le nuage de points correspond à une droite, alors $\gamma=0$. Si le nuage de points correspond à une courbe, on la redresse par une translation de tous les points en ajoutant ou en retranchant aux abscisses "t", une même valeur (gamma) afin d'obtenir une droite. Ceci est montré à la figure (II .11). [20]

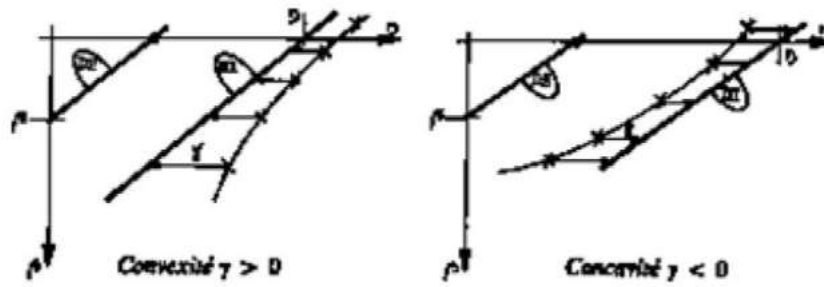


Figure II.11 : Recherche de paramètre gamma γ [20]

Pour le calcul d'êta ; La droite de régression linéaire coupe l'axe A à l'abscisse

$t = \eta$.

β est la pente de la droite de corrélation. On trace une droite parallèle à la droite de corrélation, et passant par $\eta = 1$. On lit ensuite bêta sur l'axe bêta est sans dimension.

La figure (II.12), montre la démarche pour ce calcul. [20]

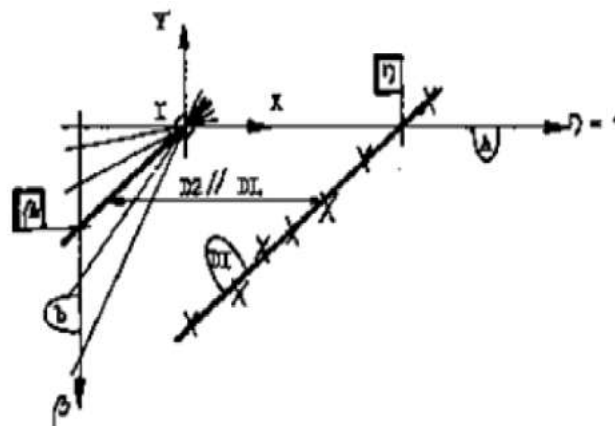


Figure II.12 : Recherche de bêta β [20]

II.5. Approche De La Fiabilité Par Les Probabilités

Définition : selon la NF X 06-501 : la fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période de temps déterminée. [24]

II.5.1. Probabilité :

c'est le rapport :
$$\frac{\text{Nb cas favorables}}{\text{Nb cas possibles}} < 1$$

On notera $R(t)$ la probabilité de fonctionnement à l'instant t . Le symbole R provient de l'anglais Reliability. On notera $F(t)$ la fonction définie par $F(t) = 1 - R(t)$. C'est la

probabilité complémentaire. $F(t)$ est la probabilité de défaillance à l'instant t .
 $F(t)+R(t)=1$.

II.5.2. Fonction requise

ou accomplir une mission ou rendre le service attendu. La définition de la fonction requise implique un seuil d'admissibilité en deçà duquel la fonction n'est plus remplie.

II.5.3. Conditions d'utilisation

Définition des conditions d'usage, c'est à dire l'environnement et ses variations, les contraintes mécaniques, chimiques, physiques, etc. Il est évident que le même matériel placé dans 2 contextes de fonctionnement différents n'aura pas la même fiabilité.

II.5.4. Période de temps

Définition de la durée de mission T en unités d'usage.

Ex : on se fixe un minimum $R(T_m) = 0,9$ pour une durée de mission $T_m = 8000$ heures ; à tout instant T_i de la mission est associée une fiabilité $R(t_i)$.

Ex : moteur de voiture préparé pour les 24 heures du Mans :

- Probabilité : c'est celle de terminer ; fiabilité requise=0,98
- Fonction requise : 200 km/h de moyenne (seuil minimal)
- Conditions d'utilisation : de jour, de nuit, avec de la pluie, n ravitaillements, etc.
- Période de temps : au bout de 24 heures (durée de la mission)

Expressions Mathématiques :

– Fonctions de distribution et de répartition :

Notion de variable aléatoire : on appelle variable aléatoire X une variable telle qu'à chaque valeur x de la VA X on puisse associer une probabilité $F(x)$. Une variable aléatoire est donc une fonction qui à chaque événement d'une expérience aléatoire associe un nombre réel. Une VA peut être : [24]

Continue : intervalle de temps entre 2 défaillances consécutives

Discrète : nombre de défaillance sur un intervalle de temps.

Soit une loi de probabilité relative à une VA continue T. Cette loi est caractérisée par sa fonction de distribution (appelée aussi densité de probabilité) $f(t)$ et par sa fonction de répartition $F(t)$ telles que :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t+dt)}{dt} \tag{II.37}$$

La fonction $F(t)$ représente la probabilité qu'un évènement (défaillance) survienne à l'instant T dans l'intervalle $[0, t]$.

$$F(t) = P(T < t) \tag{II.38}$$

Comme $f(t) \cdot dt = P(t < T < t+dt) \Rightarrow F(t) = \int_{-\infty}^{t_i} f(t) dt = P(T < t_i)$ (II.39)

Remarque : si la VA est discrète, l'expression devient :

$$F(t_n) = \sum_0^n f(t_i) = P(T < t_n) \tag{II.40}$$

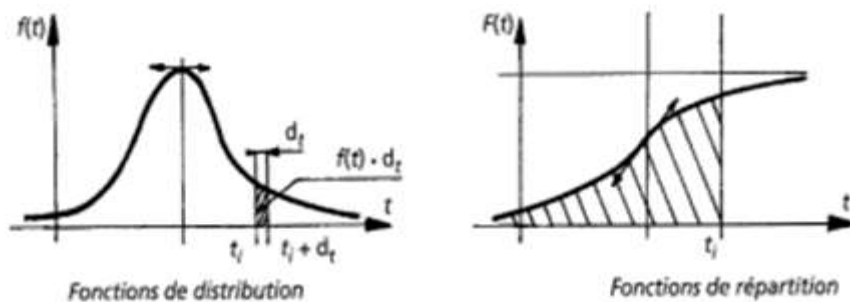


Figure II.13 : courbe fonction de distribution /de répartition [24]

II.6. Objectifs et intérêts de la fiabilité

L'étude de la fiabilité représente une étape essentielle dans toute démarche visant à assurer le bon fonctionnement des systèmes. Initialement, ce concept était principalement appliqué aux systèmes de haute technologie tels que les installations nucléaires ou les équipements aérospatiaux. Aujourd'hui, la fiabilité s'est imposée comme un indicateur fondamental de la qualité et un outil d'aide à la décision, utilisé dans l'analyse de nombreux produits et systèmes du quotidien, notamment dans les secteurs du transport, de l'énergie, du bâtiment ainsi que dans les composants électroniques et mécaniques.

De nombreux industriels intègrent désormais l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité tout au long du cycle de vie de leurs produits, depuis la phase de conception jusqu'à l'exploitation. Cette démarche permet d'optimiser le rapport coût/fiabilité et d'identifier les principales sources de défaillance.

Dans le domaine de la mécanique, l'analyse de la fiabilité constitue un outil incontournable pour caractériser le comportement des systèmes à différentes étapes de leur durée de vie. Elle permet également d'évaluer l'impact des modifications de conception sur la robustesse du produit, de valider un nouveau système et d'améliorer ses performances dans le cadre de sa mission. [20]

II.7. Conclusion

À l'issue de ce chapitre, le cadre théorique général de la fiabilité, inscrit dans la sûreté de fonctionnement, a été présenté à travers l'étude des concepts fondamentaux liés aux défaillances, leurs classifications, ainsi que les différents indicateurs quantitatifs permettant d'évaluer les performances des systèmes industriels. Par ailleurs, les principales lois probabilistes utilisées dans l'analyse de la fiabilité ont été exposées.

Un accent particulier a été mis sur la loi de Weibull (Weibull Distribution), en raison de sa grande flexibilité et de son large domaine d'application dans la modélisation du comportement des défaillances. En effet, cette loi permet de représenter les différents modes de défaillance, qu'ils soient liés à la phase initiale, au régime aléatoire ou à l'usure progressive, ce qui a permis d'établir une base scientifique et méthodologique solide. De ce fait, le chapitre III sera consacré à la mise en œuvre de ces concepts à travers une étude comparative basée sur des données réelles.

Cette étude portera sur deux environnements industriels distincts, à savoir la mine de phosphate de Djebel El Onk et la carrière de la cimenterie d'El Ma Labiod, dont l'objectif principal est d'analyser l'influence des conditions minières et environnementales (nature du sol, conditions climatiques, modes d'exploitation) sur le comportement des défaillances et le niveau de fiabilité des équipements, en particulier les camions.



Chapitre III

**Étude de la fiabilité appliquée
aux carrières : cas de Djebel
Onk et d'El Ma Labiod**

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous passons du cadre théorique présenté précédemment à une approche appliquée, en mobilisant les concepts et les modèles statistiques de la fiabilité pour analyser des données réelles issues du milieu industriel. L'objectif principal est d'étudier le comportement des défaillances et de comparer le niveau de fiabilité des équipements dans deux environnements industriels distincts, caractérisés par des conditions d'exploitation différentes, en s'appuyant sur la loi de Weibull comme outil d'analyse principal.

Cette étude vise également à mettre en évidence l'influence des facteurs environnementaux et opérationnels sur la performance des systèmes industriels, en particulier les équipements de transport, à travers une compréhension approfondie de la nature des défaillances et de leur variabilité selon les spécificités de chaque environnement, qu'il soit minier ou industriel.

III.2. Présentation des sites d'étude

III.2.1. Mine de phosphate de Djebel Onk

La mine de Djebel Onk constitue l'un des principaux pôles d'exploitation du phosphate en Algérie. Elle se distingue par une exploitation à ciel ouvert, caractérisée par des conditions de travail particulièrement exigeantes.

Par ailleurs, la nature géologique du gisement, souvent dure et hétérogène, contribue à accentuer l'usure des équipements et à augmenter la fréquence des défaillances. De plus, les conditions climatiques, notamment les variations de température et les vents chargés de poussière, influencent également le comportement des machines et leur durée de vie.

Le processus d'exploitation au sein de ce site se déroule selon plusieurs étapes successives :

- La foration et l'abattage, visant à fragmenter la roche.
- Le chargement du minerai à l'aide de pelles mécaniques.
- Le transport assuré principalement par des camions de grande capacité.

- Le traitement et le stockage du phosphate extrait.

III.2.2. Cimenterie d'El Ma Labiod

La carrière de la cimenterie d'El Ma Labiod constitue une unité industrielle dédiée à l'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication du ciment, telles que le calcaire et l'argile. Contrairement au contexte minier de Djebel Onk, ce site présente des conditions d'exploitation relativement plus stables et mieux maîtrisées.

Les contraintes environnementales existent également, mais elles restent généralement plus contrôlées grâce à des dispositifs industriels adaptés. Par ailleurs, la disponibilité des ressources techniques et humaines favorise une meilleure prise en charge des opérations de maintenance, ce qui contribue à améliorer la fiabilité des équipements.

Le processus d'exploitation dans ce site comprend :

- L'extraction des matières premières
- Le chargement et le transport vers les unités de traitement
- La préparation des matières pour la production du ciment

Tableau III.1: Comparaison des conditions d'exploitation

Facteur	Djebel Onk	El Ma Labiod
Nature du sol	Phosphate de Moyenne abrasivité	Calcaire
Conditions climatiques	Sévères	Modérées
Environnement	Poussièreux	Industriel
Maintenance	Variable	Structurée

Cette différence influence directement :

- Le taux de défaillance
- La durée de vie des équipements
- Les coûts de maintenance

III.3. Collecte et traitement des données

III.3.1. Source des données

Les données utilisées proviennent du système **GMAO**, incluant :

- Heures de fonctionnement
- Heures d'arrêt
- Nombre de pannes
- Nature des défaillances

III.3.2. Préparation des données

Les données ont été:

- Classifiées (MEC, ELC, HYD, autres)
- Transformées en TBF (Temps entre pannes)

III.4. Étude théorique et statistique

III.4.1. Cas de la mine de Djebel Onk

III.4.1.1. Camion Caterpillar 773F

Le Caterpillar 773F est un tombereau rigide utilisé dans les mines à ciel ouvert pour le transport de matériaux lourds tels que le minerai et les stériles. Il se distingue par sa robustesse et sa fiabilité, étant conçu pour fonctionner dans des conditions difficiles comme la poussière, les charges élevées et les terrains accidentés, ce qui garantit une performance stable et une continuité de service. Il dispose d'une capacité de charge d'environ 55 tonnes et d'une vitesse maximale proche de 65 km/h. Il est également équipé d'une benne d'une capacité comprise entre 30 et 35 m³, avec un système de basculement hydraulique assurant un déchargement rapide et efficace. De plus, il est doté d'une transmission automatique et d'un système de freinage performant, ce qui en fait un équipement essentiel contribuant à une productivité élevée, à la sécurité et à la continuité des opérations minières. [25]



Figure III.1: Camion Caterpillar 773F

Tableau III.2: Historique des pannes de Caterpillar 773F

Historique des pannes								
Engin	Années	Heure De Marche	Heure D'arrêt	Nombre de Panne	NATURE DE PANNE			
					MEC	ELC	HYD	Autres
Camion CAT 773F	2023	5001	2338	17	688	550	137.5	962.5
	2024	6143	1172	40	0	381	88	703
	2025	4235	969	40	48.5	145.5	0	775
Total	3 Années	15379	4479	97	736.5	1076.5	225.5	2440.5

N.B : Il convient de souligner que la mine de Djebel El Onk a également pris en charge d'autres types de pannes, en plus de celles présentées dans le tableau ci-dessus. À des fins illustratives, ces défaillances ont été regroupées dans la catégorie « Autres », laquelle comprend principalement les pannes d'ordre pneumatique, celles liées aux suspensions, ainsi que les défaillances du châssis, entre autres.

III.4.1.1.1. Étude des heures d'arrêt par nature de panne

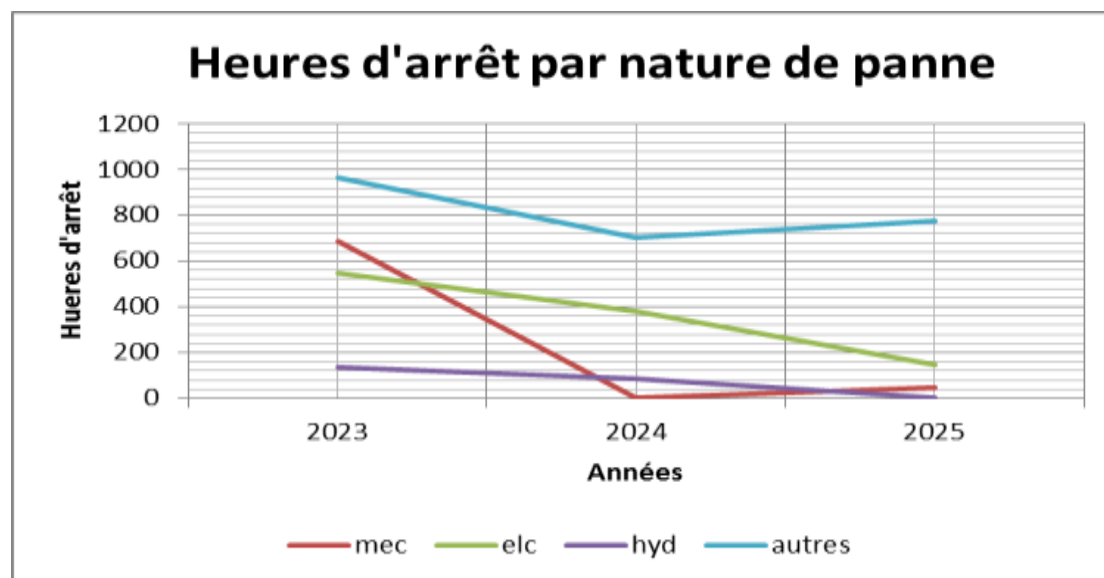


Figure III.2 : Evolution du temps d'arrêt de Caterpillar 773F

🔍 Analyse

D'après le graphique représentant les heures d'arrêt par nature de panne durant les années 2023, 2024 et 2025, on peut formuler les observations suivantes:

Premièrement, les pannes mécaniques ont connu une forte diminution. Elles étaient élevées en 2023 (environ 700 heures), puis ont chuté drastiquement en 2024 jusqu'à un niveau presque nul, avant de connaître une légère augmentation en 2025 (environ 50 heures). Cela traduit l'efficacité des actions de maintenance mises en place, malgré une légère réapparition des défaillances.

Deuxièmement, les pannes électriques ont diminué de manière progressive et continue, passant d'environ 550 heures en 2023 à 400 heures en 2024, puis à près de 150 heures en 2025. Cette évolution indique une amélioration du système électrique ou l'efficacité de la maintenance préventive.

Troisièmement, les pannes hydrauliques restent faibles par rapport aux autres catégories, avec une diminution continue de 120 heures en 2023 à moins de 50 heures en 2025, ce qui reflète une bonne maîtrise de ce type de défaillance.

Enfin, la catégorie (Autres) demeure la plus importante en termes d'heures d'arrêt. Malgré une baisse en 2024 (environ 700 heures), elle augmente de nouveau en 2025

(près de 800 heures), ce qui montre la persistance de problèmes non identifiés ayant un impact significatif sur la production.

III.4.1.1.2. Étude du nombre des pannes par nature

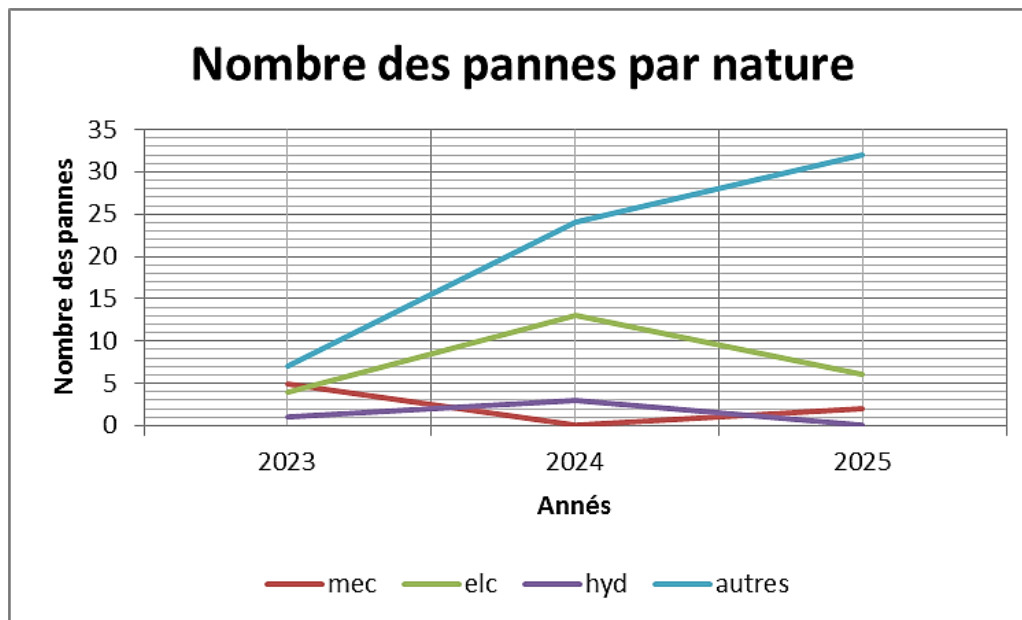


Figure III.3 : Evolution du nombre des pannes de Caterpillar 773F

🔍 Analyse

Ce graphique illustre l'évolution du nombre de pannes selon leur nature durant la période 2023–2025.

On observe que la catégorie « autres » présente une augmentation continue et significative, passant d'environ 7 pannes en 2023 à plus de 30 pannes en 2025. Cette tendance peut indiquer soit l'apparition de nouveaux types de défaillances (panne du suspension, châssis et pneumatique), soit un manque de précision dans la classification des pannes.

Concernant les pannes électriques, on note une hausse entre 2023 et 2024, suivie d'une diminution en 2025, ce qui reflète l'efficacité des actions de maintenance corrective ou préventive mises en place.

Les pannes mécaniques restent globalement faibles et relativement stables, avec de légères variations, ce qui traduit une certaine maîtrise du comportement mécanique des équipements .

Enfin, les pannes hydrauliques sont peu fréquentes, avec un léger pic en 2024, puis une quasi-disparition en 2025, indiquant un bon contrôle de ce type de défaillance.

III.4.1.2. Camion TEREX TR60

Le TEREX TR60 est un tombereau rigide utilisé dans les mines et les carrières pour le transport de matériaux lourds tels que les roches et le minerai. Il se distingue par sa robustesse et sa capacité à fonctionner dans des conditions difficiles comme la poussière, les terrains accidentés et les charges élevées. Il offre une capacité de charge d'environ 55 tonnes et est équipé d'un moteur diesel, avec une vitesse maximale d'environ 60 km/h. Il est également doté d'un système de benne à commande hydraulique assurant un déchargement rapide et efficace. Grâce à sa fiabilité et à sa facilité de maintenance, il constitue un équipement essentiel contribuant à l'amélioration de la productivité et à la continuité des opérations minières. [26]



Figure III.4 : Camion TEREX TR60

Tableau III.3: Historique des pannes de camion TEREX TR60

Historique des pannes								
Engin	ANNEES	Heure Marche	Heure D'arrêt	Nombre Panne	NATURE DE PANNE			
					MEC	ELC	HYD	AUTRES
Camion TEREX TR60	2023	2128	1095	34	67	100	160	768
	2024	1619	1144	47	45	168	220.5	710.5
	2025	1344	2443	32	0	458	1070	915
Total	3 Années	5091	4682	113	112	726	1450.5	2393.5

III.4.1.2.1. Étude des heures d'arrêt par nature de panne

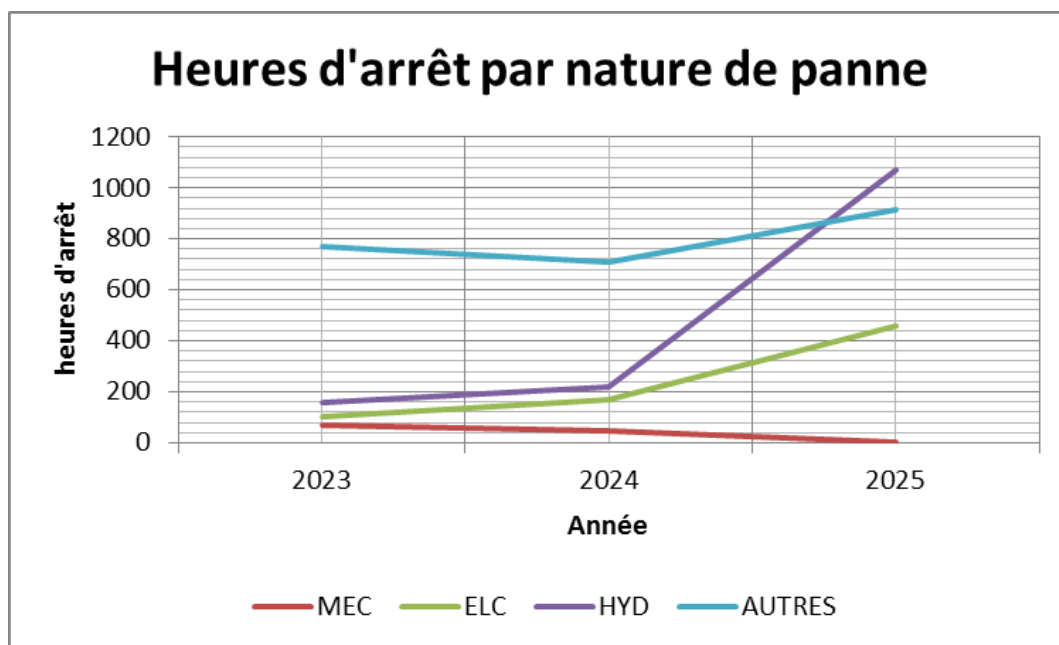


Figure III.5: Evolution du temps d'arrêt de TEREX TR60

🔍 Analyse

Le graphique intitulé « Heures d'arrêt par nature de panne » présente l'évolution des temps d'arrêt entre 2023 et 2025 selon quatre catégories de défaillances : mécaniques, électriques, hydrauliques et autres. Il vise à analyser la performance des équipements, à évaluer l'efficacité des stratégies de maintenance mises en œuvre, et à identifier les principales sources de perturbation affectant la continuité de la production.

Les résultats montrent que les pannes mécaniques ont connu une diminution progressive jusqu'à devenir quasi nulles en 2025, ce qui traduit une réduction de la fréquence des défaillances mécaniques et une amélioration de l'état des composants liés au moteur et au système de transmission. En revanche, les pannes électriques ont enregistré une augmentation continue, avec une hausse significative en 2025. Cela peut être attribué à l'usure des câbles et connexions électriques, aux défaillances répétées des capteurs et des batteries, ainsi qu'à l'effet de l'humidité et des fortes vibrations durant l'exploitation, entraînant une augmentation des arrêts électriques.

Concernant les pannes hydrauliques, elles ont connu une forte augmentation pour atteindre leur niveau maximal en 2025, ce qui révèle une détérioration importante du système hydraulique et en fait la principale cause des arrêts. Ces défaillances peuvent être liées aux fuites d'huile hydraulique, à l'usure des pompes et des vérins, à l'obstruction des filtres ou encore à la surchauffe du système due aux conditions d'exploitation sévères.

Enfin, la catégorie des « autres pannes » présente une évolution irrégulière, avec une baisse en 2024 suivie d'une hausse en 2025, ce qui reflète l'influence de facteurs variables ou mal définis tels que les erreurs d'exploitation, la surcharge, les problèmes d'organisation et de maintenance, ou encore les conditions environnementales difficiles comme la poussière et les vibrations. Cela nécessite une analyse plus approfondie afin d'identifier précisément les causes réelles de ces arrêts.

III.4.1.2.2. Étude du nombre des pannes par nature

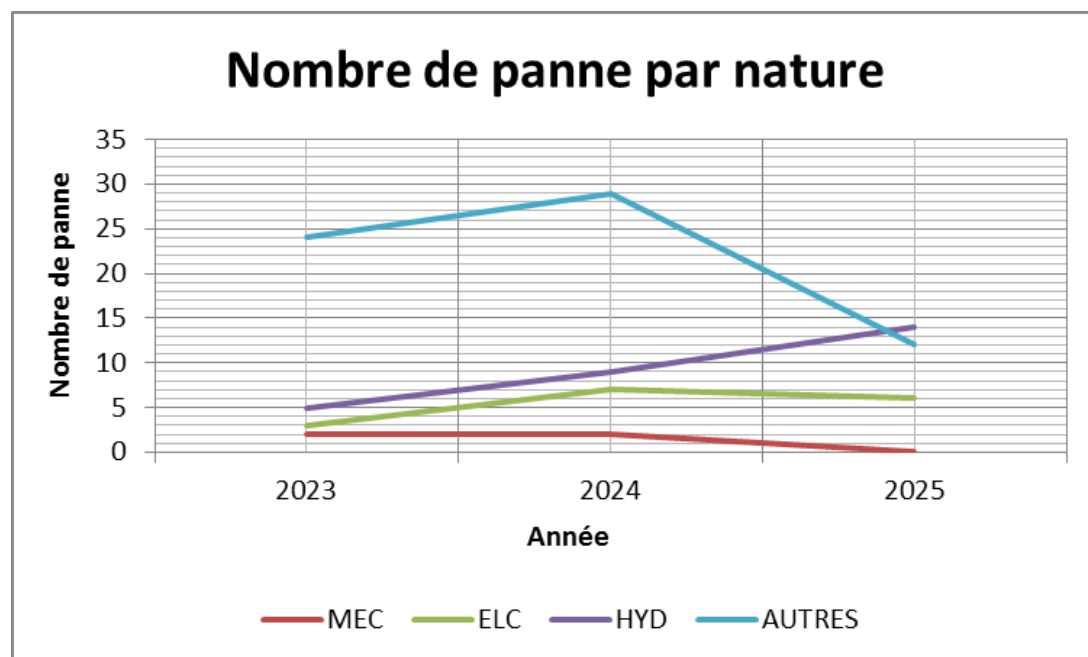


Figure III.6: Evolution du nombre des pannes de TEREX TR60

🔍 Analyse

À partir de ce graphique qui présente l'évolution des pannes (MEC, ELC, HYD et AUTRES) durant la période 2023–2025, on observe des comportements différents selon les catégories.

La troisième catégorie enregistre le nombre de pannes le plus élevé sur la majorité de la période, passant de 24 pannes en 2023 à environ 29 en 2024, avant de chuter fortement à 12 en 2025. Cette baisse reflète une amélioration dans la gestion des pannes non classées et l'efficacité des actions correctives mises en place.

Concernant les pannes hydrauliques, elles connaissent une augmentation continue, passant de 5 pannes en 2023 à 9 en 2024, puis à 14 en 2025, ce qui indique une dégradation progressive du système hydraulique nécessitant une attention particulière.

Les pannes électriques présentent une légère hausse entre 2023 et 2024, suivie d'une stabilisation en 2025 avec une légère diminution, traduisant un certain équilibre après une période d'augmentation.

Enfin, les pannes mécaniques restent les moins fréquentes, relativement stables en 2023 et 2024, puis en nette diminution en 2025, ce qui montre une bonne maîtrise de ce type de défaillance.

III.4.1.3. Étude comparative des deux engins de la mine de Djebel Onk

Sur la base des heures d'arrêt et de la nature des pannes des deux engins de production de la mine de Djebel Onk au cours des trois dernières années, le tableau suivant a été établi.

Tableau III.4: Étude des heures d'arrêt par nature des deux engins

Engin	MEC	ELC	HYD	Autres
Caterpillar 773F	736.5	1076.5	225.5	2440.5
TEREX TR 60	112	726	1450.5	2393.5
Total	848.5	1802.5	1676	4834

III.4.1.3.1. Étude des heures d'arrêt par nature de panne

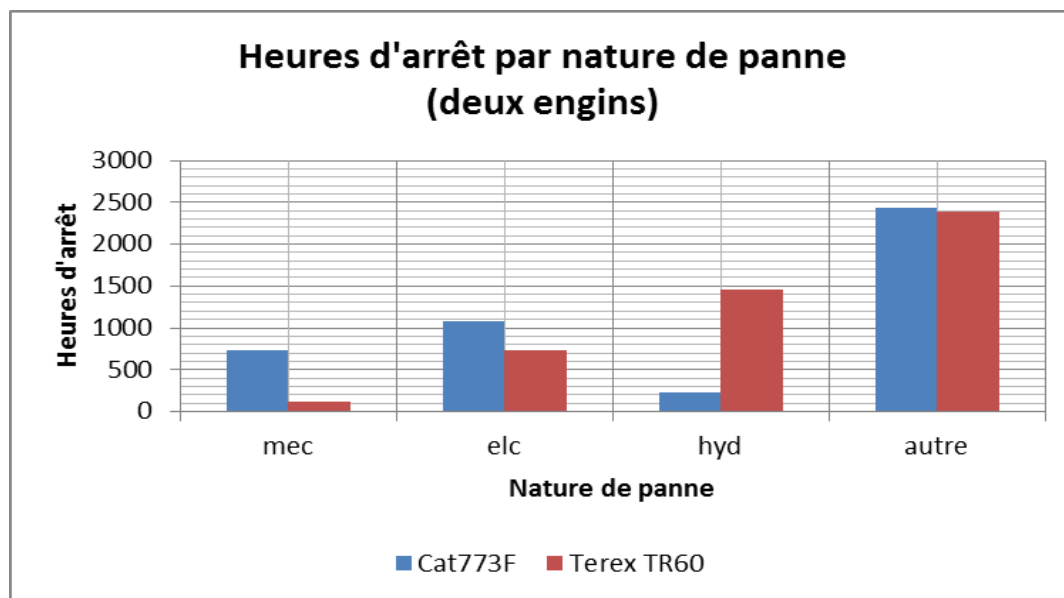


Figure III.7: Heures d'arrêt par nature de deux engins ensemble

Analyse

À partir du graphique intitulé « Heures d'arrêt par nature de panne (deux engins) », on compare les heures d'arrêt des deux camions Caterpillar 773F et TEREX TR60 selon les quatre types de pannes : mécaniques, électriques, hydrauliques et autres.

Concernant les pannes mécaniques, le CAT 773F enregistre un nombre élevé des heures d'arrêt (environ 700 h), alors que le TEREX TR60 reste à un niveau faible (environ 100 h), ce qui montre un impact plus important des défaillances mécaniques sur le CAT. Ces pannes sont principalement liées aux problèmes du moteur, du turbo, de l'échappement, du ralentisseur et du système de freinage. Les opérations de contrôle moteur, d'élimination des fuites d'huile et de remplacement des plaquettes de frein ont constitué les principales interventions réalisées.

Pour les pannes électriques, les deux engins présentent des valeurs importantes, mais le CAT 773F reste plus affecté (≈ 1100 h) que le TEREX TR60 (≈ 700 h), ce qui traduit une fréquence plus élevée des interventions électriques sur le CAT. Les causes observées concernent surtout les problèmes de démarrage, les défaillances de câblage électrique, les signaux témoins de boîte de vitesse et de freinage, les problèmes d'éclairage ainsi que les relais électriques et batteries.

En ce qui concerne les pannes hydrauliques, la situation est inversée : le TEREX TR60 enregistre des heures d'arrêt très élevées (≈ 1500 h), tandis que le CAT 773F reste faible (≈ 200 h), ce qui indique une faiblesse importante du système hydraulique du TEREX. Ces arrêts sont principalement causés par les nombreuses fuites d'huile hydraulique, les détériorations répétitives des flexibles, les problèmes de benne hydraulique, de direction et des vérins hydrauliques. La répétition des interventions sur les pompes et flexibles hydrauliques montre une dégradation accélérée du circuit hydraulique sous les conditions sévères d'exploitation.

Enfin, pour la catégorie des autres pannes, les deux engins présentent des valeurs très élevées et proches (≈ 2400 h), ce qui montre que cette catégorie constitue la principale source d'arrêt pour les deux camions. Elle regroupe principalement les problèmes de suspension, de châssis, de pneumatiques, de refroidissement et de climatisation. Les défaillances les plus fréquentes concernent les amortisseurs

nécessitant un remplissage d'azote ou un remplacement, les fissurations du châssis, les soudures de marchepieds et d'échelles, les crevaisons répétitives des pneus ainsi que les vibrations et dommages structurels. Ces problèmes sont directement liés aux fortes charges transportées, aux vibrations permanentes et aux conditions difficiles des pistes minières.

Tableau III.5: Étude du Nombre de pannes par nature pour les deux engins

Engin	MEC	ELC	HYD	Autres
Caterpillar 773F	16	23	5	53
TEREX TR 60	3	18	35	57
Total	19	41	40	110

III.4.1.3.2. Étude du nombre des pannes par nature

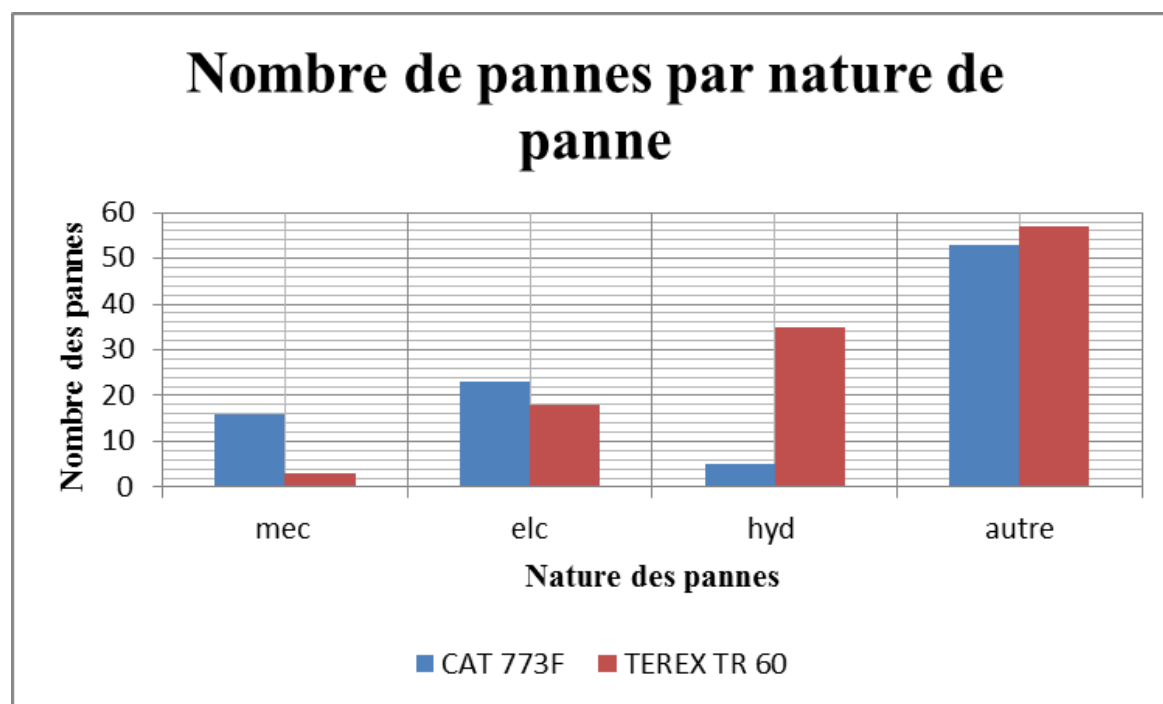


Figure III.8: Nombre de pannes par nature pour les deux engins

Analyse

Le graphique intitulé « Nombre de pannes par nature de panne » présente une comparaison entre les tombereaux miniers Caterpillar 773F et TEREX TR60 selon quatre catégories principales de défaillances : mécaniques, électriques, hydrauliques et autres.

Les pannes mécaniques ont atteint environ 16 défaillances pour le Caterpillar 773F contre seulement 3 pour le TEREX TR60, soit un écart d'environ 13 pannes. Cette différence montre que le CAT 773F est davantage exposé à l'usure des composants mécaniques tels que le moteur, la transmission et les organes de roulement, tandis que le TEREX TR60 présente une meilleure résistance mécanique dans les conditions d'exploitation étudiées.

Concernant les pannes électriques, le CAT 773F a enregistré environ 23 défaillances contre 18 pour le TEREX TR60. Ces résultats indiquent que les systèmes électriques représentent une source importante d'arrêts pour les deux équipements. Ces défaillances peuvent être liées aux capteurs, aux batteries, au câblage ou encore aux systèmes électroniques de commande, avec une fréquence légèrement plus élevée chez le CAT 773F.

Les pannes hydrauliques montrent la différence la plus importante entre les deux tombereaux. Le TEREX TR60 a enregistré environ 35 défaillances hydrauliques contre seulement 5 pour le CAT 773F, soit un écart d'environ 30 pannes. Cette situation révèle une faiblesse importante du système hydraulique du TEREX TR60 pouvant être causée par des fuites, une contamination de l'huile hydraulique ou l'usure des pompes et vérins. Le système hydraulique constitue ainsi le principal point faible du TEREX TR60 et nécessite un renforcement de la maintenance préventive.

La catégorie « autres pannes » présente les valeurs les plus élevées pour les deux équipements, avec environ 52 défaillances pour le CAT 773F et 57 pour le TEREX TR60. Ces pannes regroupent différents problèmes liés aux freins, à la structure ou à d'autres systèmes auxiliaires. Cette forte proportion montre qu'un classement plus détaillé des défaillances serait nécessaire afin d'identifier avec précision les principales causes des arrêts techniques.

Globalement, le nombre total de pannes est estimé à environ 96 défaillances pour le CAT 773F contre 113 pour le TEREX TR60, soit une différence d'environ 17 pannes supplémentaires pour le TEREX TR60. Ces résultats indiquent que le CAT 773F présente une meilleure fiabilité opérationnelle dans les conditions d'exploitation minière étudiées.

III.4.2. Cas de la carrière de El Ma Labiod

III.4.2.1. Camion Caterpillar 770G

Le Caterpillar 770G est un tombereau rigide utilisé dans la carrière d'El Ma Labiod pour le transport des matériaux extraits tels que les roches et les stériles. Il se distingue par sa robustesse et ses bonnes performances, étant conçu pour fonctionner dans des conditions difficiles telles que la poussière, les terrains irréguliers et les charges élevées, ce qui garantit un transport efficace et sécurisé. Il offre une capacité de charge d'environ 40 tonnes, avec une vitesse maximale proche de 65 km/h. Il est également équipé d'une benne d'une capacité comprise entre 22 et 25 m³, avec un système de basculement hydraulique, ainsi que d'une transmission automatique et d'un système de freinage performant, ce qui en fait un équipement fiable, facile à entretenir et contribuant à une productivité élevée au sein de la carrière. [27]



Figure III.9: Camion Caterpillar 770G

Tableau III.6: Historique des pannes de Caterpillar 770G

Historique des pannes								
Engin	Années	Heure Marche	Heure D'arrêt	Nombre de Panne	Nature de panne			
					MEC	ELC	HYD	autres
Camion CAT 770G	2023	3290	592.5	29	100	121.5	144	227
	2024	3559.5	478	17	92	27	103	256
	2025	3551	503.5	22	0	120	112	271.5
Total	3 Années	10400.5	1574	68	192	268.5	359	754.5

III.4.2.1.1. Étude des heures d'arrêt par nature de panne

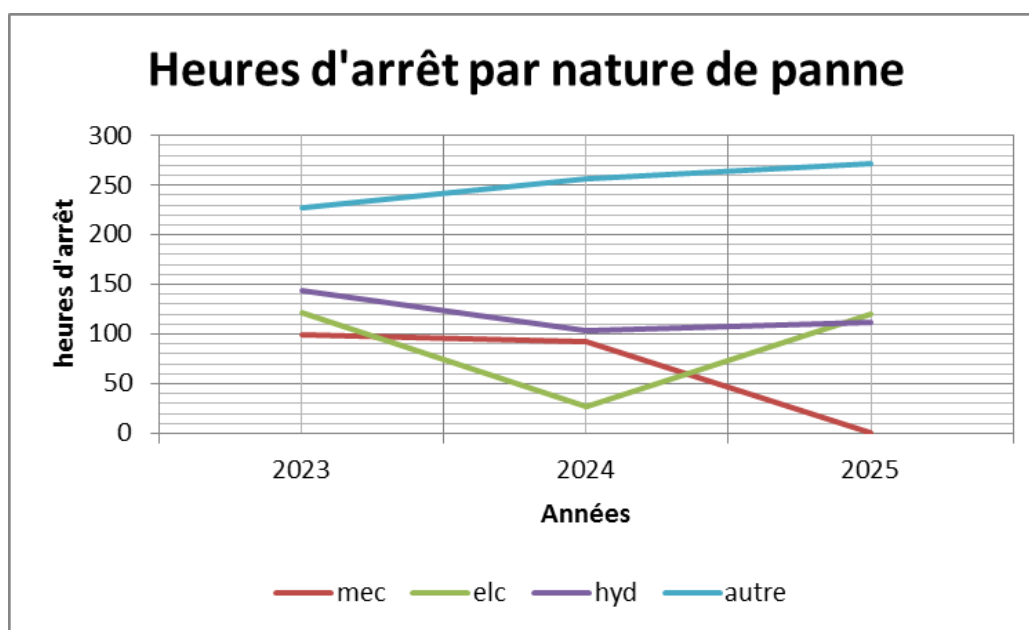


Figure III.10: Evolution du temps d'arrêt de Caterpillar 770G

Analyse

Le graphique « heures d'arrêt par nature de panne » montre l'évolution du temps d'arrêt causé par les différentes pannes (mécaniques, électriques, hydrauliques et autres) durant la période 2023–2025, ce qui permet de comprendre l'impact de chaque type de défaillance sur la continuité de travail.

On observe d'abord que les heures d'arrêt dues aux pannes mécaniques sont en diminution continue, passant d'environ 100 heures en 2023 à une stabilité relative en 2024, puis à 0 heure en 2025. Cela indique une amélioration importante dans la gestion des pannes mécaniques et une réduction de leur impact sur la production.

Concernant les pannes électriques, elles présentent une variation notable. Les heures d'arrêt diminuent de 120 heures en 2023 à environ 30 heures en 2024, puis augmentent de nouveau à 120 heures en 2025. Cette fluctuation montre un manque de stabilité dans la maîtrise de ce type de pannes, ce qui influence négativement la continuité de l'exploitation.

Pour les pannes hydrauliques, on constate une baisse de 140 heures en 2023 à 100 heures en 2024, suivie d'une légère hausse à 110 heures en 2025. Cela traduit une amélioration relative, mais encore insuffisante, car ces pannes continuent de générer un temps d'arrêt important.

Enfin, la catégorie « autres pannes » reste la plus importante en termes d'heures d'arrêt, avec une augmentation progressive de 230 heures en 2023 à 260 heures en 2024, puis à 270 heures en 2025. Cela indique que ce type de pannes a l'impact le plus élevé sur la production, et qu'il regroupe probablement plusieurs problèmes mal identifiés ou mal classés.

III.4.2.1.2. Etude du nombre des pannes par nature

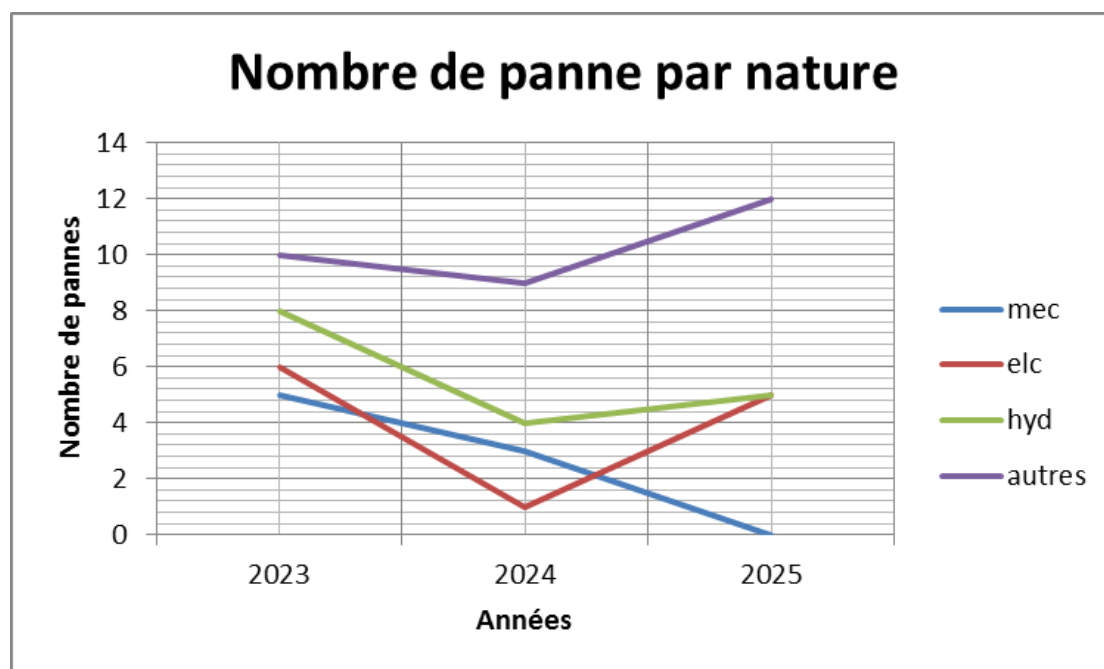


Figure III.11: Evolution du nombre des pannes de Caterpillar 770G

🔍 Analyse

Le graphique « Nombre de panne par nature » présente l'évolution des défaillances entre 2023 et 2025 selon quatre catégories.

Concernant les pannes mécaniques, on observe une diminution continue, passant de 5 pannes en 2023 à 3 pannes en 2024, puis à 0 panne en 2025, ce qui traduit une nette amélioration de la fiabilité.

Pour les pannes électriques, la tendance est instable : elles diminuent fortement de 6 pannes en 2023 à 1 panne en 2024, puis augmentent de nouveau à 5 pannes en 2025, indiquant un manque de stabilité dans la gestion de ce type de défaillance.

Les pannes hydrauliques montrent une évolution modérée, avec une baisse de 8 pannes en 2023 à 4 pannes en 2024, suivie d'une légère hausse à 5 pannes en 2025, ce qui reflète une amélioration partielle non durable.

Enfin, la catégorie autre reste la plus importante durant toute la période, avec 10 pannes en 2023, 9 pannes en 2024 et 12 pannes en 2025, ce qui confirme son impact majeur sur les performances des équipements.

Globalement, on constate une amélioration significative des pannes mécaniques, tandis que les pannes électriques et hydrauliques restent fluctuantes, et que les pannes « autres » continuent de dominer, nécessitant une analyse plus approfondie et une meilleure classification.

III.5. Étude comparative des deux camions du type CAT des deux carrières de Djebel Onk et El Ma Labiod

Sur la base des heures d'arrêt et de la nature des pannes des deux engins de production durant les trois dernières années, le tableau suivant a été établi.

Tableau III.7: Étude d'heures d'arrêt par nature de Deux engins

Engin	MEC	ELC	HYD	Autres
Caterpillar 773F	736.5	1076.5	225.5	2440.5
Caterpillar 770G	192	268.5	359	754.5
Total	928.5	1345	584.5	3195

III.5.1. Étude des heures d'arrêt par nature de panne

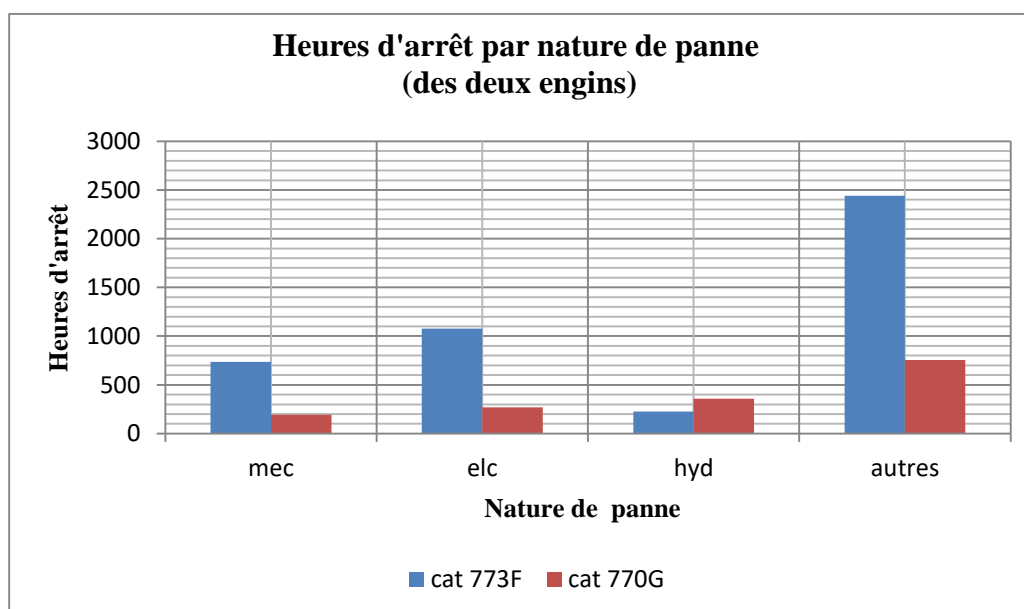


Figure III.12 : Heures d'arrêt par nature des deux engins ensemble

Analyse

L'analyse de ce graphique met en évidence une dominance claire des heures d'arrêt liées à la catégorie « autres », en particulier pour le camion Caterpillar 773F, où les heures d'arrêt dans cette catégorie ont atteint environ 2440,5 heures, contre seulement 754,5 heures pour le Caterpillar 770G, soit un total global de 3195 heures. Cette situation indique l'existence de défaillances non clairement identifiées ou insuffisamment classifiées. Cette catégorie peut regrouper plusieurs causes telles que des problèmes d'exploitation (erreurs de conduite, surcharge, mauvaise utilisation de l'engin), des problèmes organisationnels (retard dans l'approvisionnement des pièces de rechange, insuffisance de planification de la maintenance), ainsi que des conditions de travail sévères comme la poussière, les vibrations et les températures élevées. Elle peut également inclure des défaillances liées aux pneumatiques, au châssis, au système de freinage ou encore des pannes mineures mal diagnostiquées.

Les défaillances électriques représentent la deuxième catégorie la plus importante après « autres », particulièrement pour le camion 773F, avec 1076,5 heures d'arrêt contre 268,5 heures pour le 770G, soit un total de 1345 heures. Cela révèle une certaine sensibilité du système électrique, notamment au niveau des capteurs, faisceaux électriques, batteries, alternateurs et systèmes de commande électronique. Ces pannes peuvent être causées par l'humidité, les fortes vibrations, l'usure des connexions électriques ou des courts-circuits, ce qui nécessite un renforcement de la maintenance préventive et un diagnostic périodique du système électrique.

Concernant les défaillances mécaniques, les heures d'arrêt ont atteint 736,5 heures pour le 773F contre 192 heures pour le 770G, avec un total global estimé à 928,5 heures. Ces défaillances peuvent être dues à l'usure des composants du moteur, du système de transmission, des roulements, des suspensions ou du système de freinage. Les conditions sévères de l'exploitation minière ainsi que les charges lourdes contribuent à accélérer l'usure de ces composants, surtout en cas d'insuffisance de maintenance ou de surexploitation des engins.

Les défaillances hydrauliques ont enregistré les valeurs les plus faibles pour le 773F avec environ 225,5 heures, tandis qu'elles ont été plus importantes pour le 770G avec 359 heures, soit un total de 584,5 heures. Ces défaillances peuvent être expliquées par

des fuites d'huile hydraulique, l'usure des pompes et vérins, le colmatage des filtres ou encore la surchauffe du circuit hydraulique, en plus de l'influence des conditions d'exploitation et des charges transportées.

D'une manière générale, le camion 773F enregistre un volume d'heures d'arrêt plus élevé dans la majorité des catégories de pannes par rapport au 770G. Toutefois, cela ne signifie pas nécessairement une performance technique inférieure, car les résultats de la fiabilité, de la disponibilité et de la maintenabilité ont montré de meilleures performances pour le 773F. Cette situation peut s'expliquer par une durée d'exploitation plus importante et une utilisation plus intensive du 773F, ainsi que par des défaillances moins fréquentes et plus facilement réparables. Ces résultats soulignent la nécessité d'optimiser la stratégie de maintenance à travers un diagnostic précis des pannes, l'identification des causes racines, l'amélioration du suivi des opérations de maintenance et la formation des opérateurs afin de réduire les arrêts non planifiés et d'améliorer la productivité des équipements.

Tableau III.8: Étude du Nombre de pannes par nature pour les deux engins de production

Engin	MEC	ELC	HYD	Autres
Caterpillar 773F	7	23	4	63
Caterpillar 770G	7	12	17	32
Total	14	35	21	95

III.5.2. Étude du nombre des pannes par nature

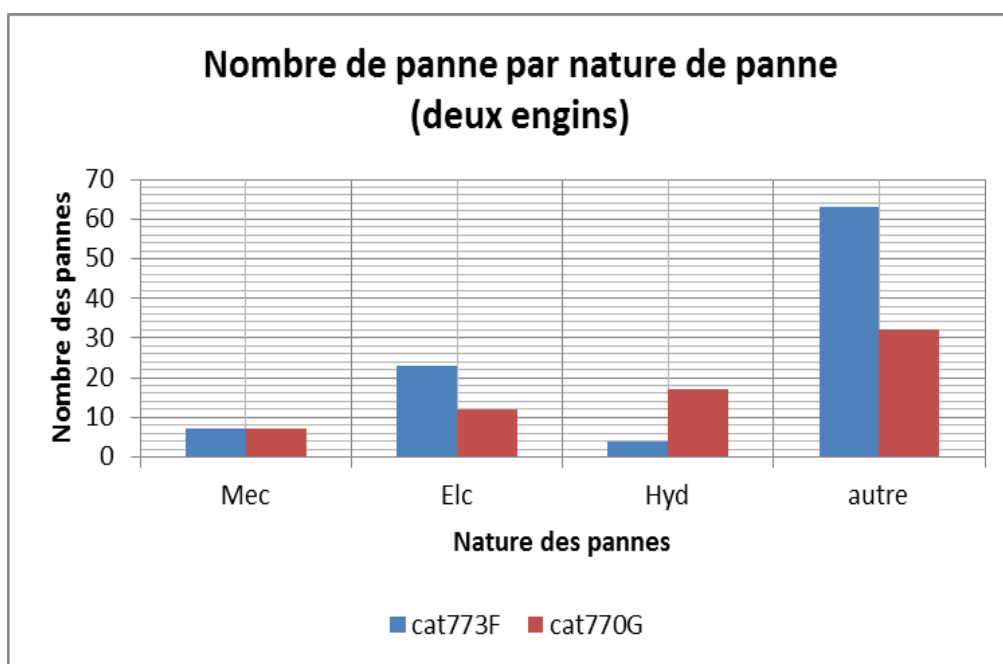


Figure III.13: Nombre de pannes par nature pour les deux engins de production

Analyse

Le graphique intitulé « Nombre de pannes par nature de panne (deux engins) » met en évidence la répartition des défaillances pour les deux camions miniers Caterpillar 773F et Caterpillar 770G selon quatre catégories : mécaniques, électriques, hydrauliques et autres. L'analyse des données révèle que la catégorie « autres » représente la part la plus importante des pannes pour les deux engins, avec environ 63 pannes pour le CAT773F contre 32 pannes pour le CAT770G, soit un total de 95 pannes. Cette dominance peut s'expliquer par le caractère hétérogène de cette catégorie, qui regroupe différentes défaillances non classées telles que les erreurs d'exploitation, les surcharges, les défauts de conduite, les problèmes liés aux pneumatiques, aux freins, au châssis, aux conditions climatiques sévères (poussière, chaleur, vibrations) ainsi que certaines défaillances mineures mal diagnostiquées ou insuffisamment enregistrées.

Concernant les pannes électriques, le CAT773F enregistre un nombre plus élevé avec environ 23 pannes, contre 12 pannes pour le CAT770G, soit un total de 35 pannes. Cela suggère une vulnérabilité plus marquée du système électrique du 773F ou des conditions d'utilisation plus contraignantes. Ces défaillances peuvent être causées par

des problèmes au niveau des capteurs, faisceaux électriques, batteries, alternateurs, relais ou systèmes électroniques de commande. Elles peuvent également être favorisées par l'humidité, les fortes vibrations, l'usure des connexions ou les courts-circuits.

À l'inverse, les pannes hydrauliques sont nettement plus importantes pour le CAT770G avec environ 17 pannes, contre seulement 4 pannes pour le CAT773F, soit un total de 21 pannes. Cela indique une possible faiblesse au niveau du circuit hydraulique du 770G ou un besoin d'amélioration de la maintenance préventive ciblée. Ces défaillances peuvent être liées à des fuites d'huile hydraulique, l'usure des pompes et vérins, le colmatage des filtres, la contamination de l'huile ou encore la surchauffe du système hydraulique durant les cycles de travail intensifs.

En ce qui concerne les pannes mécaniques, les deux engins présentent des valeurs similaires avec environ 7 pannes chacun, soit un total de 14 pannes, traduisant une fiabilité mécanique relativement comparable. Ces défaillances mécaniques peuvent être dues à l'usure des composants du moteur, du système de transmission, des roulements, des suspensions ou encore du système de freinage. Les conditions sévères de l'exploitation minière et les charges lourdes accélèrent souvent l'usure de ces composants.

Globalement, le CAT773F apparaît davantage affecté par les pannes électriques et les pannes diverses, tandis que le CAT770G est plus exposé aux défaillances hydrauliques. Toutefois, cela ne signifie pas nécessairement que le CAT773F présente de moins bonnes performances globales, car les indicateurs de fiabilité, de disponibilité et de maintenabilité peuvent rester meilleurs grâce à une exploitation plus importante, une meilleure réparabilité ou des temps de fonctionnement plus élevés. Ces résultats soulignent donc l'importance d'adapter les stratégies de maintenance aux spécificités de chaque engin afin d'améliorer la disponibilité technique et de réduire les arrêts imprévus.

III.6. Méthode d'Ishikawa

III.6.1. Définition

La méthode d'Ishikawa, appelée également diagramme causes-effets ou diagramme en arêtes de poisson, est une méthode d'analyse permettant d'identifier et

de classer les différentes causes possibles d'un problème afin de déterminer les causes racines responsables d'une défaillance ou d'un dysfonctionnement. Elle repose généralement sur la classification des causes selon les 5M : Machine, Méthode, Main-d'œuvre, Milieu et Matière. Cette méthode est largement utilisée dans les domaines industriels, de la maintenance et de la qualité pour améliorer la fiabilité et les performances des systèmes. [28]

III.6.2. Application de la méthode d'Ishikawa (5M) aux « autres pannes » des camions miniers

Dans cette étude, la méthode d'Ishikawa (5M) est appliquée à la catégorie des « autres pannes » des camions miniers Caterpillar 773F et Caterpillar 770G, car cette catégorie représente le nombre de pannes et les heures d'arrêt les plus élevés durant la période étudiée.

En effet, les résultats ont montré environ 63 pannes pour le CAT773F contre 32 pannes pour le CAT770G, avec des heures d'arrêt atteignant respectivement 2440,5 heures et 754,5 heures.

L'objectif de cette analyse est d'identifier les causes principales responsables de ces défaillances afin d'améliorer la disponibilité et les performances des équipements.

Vu que la catégorie des pannes (Autres) est la plus critique pour les deux engins des deux carrières (CAT 773F et CAT 770G) point de vue heures d'arrêt ainsi que le nombre de pannes par nature par rapport aux pannes mécaniques, électriques et hydrauliques, nous avons jugé utile d'appliquer le diagramme des causes à effets sur cette catégorie.



Figure III.14: Diagramme d'Ishikawa (autres pannes)

III.6.3. Interprétation

III.6.3.1. Machine (Matériel)

Cette catégorie regroupe les causes liées aux caractéristiques techniques et à l'état des composants des camions miniers Caterpillar 773F et Caterpillar 770G.

- **Usure des pneumatiques**

Les pneumatiques sont soumis à des sollicitations mécaniques élevées dues aux fortes charges transportées, aux longues distances de roulage et à l'état dégradé des pistes minières. Cette situation entraîne une dégradation accélérée de la bande de roulement et augmente les risques d'éclatement ou d'immobilisation des engins.

- **Défaillance du système de freinage**

Les cycles répétitifs de freinage sous fortes charges provoquent une élévation importante de la température des organes de freinage, favorisant l'usure des garnitures, la diminution de l'efficacité du freinage et l'apparition de défaillances critiques.

- **Dégradation du châssis**

Les contraintes dynamiques générées par les vibrations et les surcharges peuvent entraîner des fissurations, des déformations structurales ou une fatigue mécanique du châssis.

- **Dysfonctionnement des systèmes auxiliaires**

Les systèmes auxiliaires tels que l'éclairage, la climatisation, les dispositifs d'alarme ou les systèmes électroniques de surveillance peuvent subir des défaillances perturbant les conditions normales d'exploitation.

- **Usure des composants secondaires**

Les éléments secondaires tels que les roulements, articulations, joints et fixations mécaniques subissent une usure progressive sous l'effet des vibrations et des conditions sévères d'exploitation.

- **Dégradation des suspensions**

Le mauvais état des suspensions réduit la capacité d'absorption des chocs, augmente les contraintes mécaniques transmises au châssis et accélère la détérioration des autres composants.

III.6.3.2. Méthode

Cette catégorie concerne les procédures de maintenance et l'organisation des opérations d'exploitation.

- **Planification insuffisante des interventions**

Une mauvaise organisation des opérations de maintenance entraîne un retard dans les interventions correctives et augmente le risque de défaillances imprévues.

- **Absence de traçabilité des défaillances**

Le manque d'historique détaillé des pannes limite l'identification des causes récurrentes et réduit l'efficacité des actions correctives.

- **Diagnostic technique incomplet**

Une analyse insuffisante des défaillances peut conduire à des réparations partielles sans élimination de la cause racine.

- **Retard de remplacement des composants usés**

Le maintien en service de composants dégradés augmente la probabilité de pannes majeures et d'arrêts prolongés.

- **Insuffisance des inspections préventives**

L'absence de contrôle périodique réduit la capacité de détection précoce des anomalies techniques.

- **Gestion inefficace des arrêts programmés**

Une mauvaise coordination des opérations de maintenance peut prolonger les temps d'immobilisation et affecter la continuité de la production.

III.6.3.3. Main-d'œuvre

Cette catégorie regroupe les causes associées au facteur humain.

- **Erreurs d'exploitation**

Une conduite inadaptée caractérisée par des accélérations brusques, des freinages excessifs ou une mauvaise manipulation des commandes augmente les contraintes mécaniques sur les équipements.

- **Surcharge des engins**

Le dépassement de la capacité nominale de transport provoque une sollicitation excessive du moteur, des suspensions, des pneumatiques et du système de freinage.

- **Mauvaise utilisation des équipements**

Le non-respect des conditions normales d'utilisation favorise l'apparition de défaillances prématurées.

- **Non-respect des procédures opérationnelles**

L'absence d'application rigoureuse des consignes techniques augmente les risques de dysfonctionnement.

- **Insuffisance de qualification du personnel**

Un manque de formation technique peut entraîner des erreurs de manipulation ou des interventions de maintenance inadéquates.

- **Erreurs lors des opérations de maintenance**

Un montage incorrect, un mauvais réglage ou l'omission de certaines vérifications techniques peuvent générer des défaillances supplémentaires.

III.6.3.4. Milieu (Environnement)

Cette catégorie concerne les contraintes environnementales liées à l'exploitation minière.

- **Présence excessive de poussière**

Les particules de poussière provoquent l'encrassement des filtres, l'usure abrasive des composants et la détérioration des systèmes électriques et mécaniques.

- **Températures élevées**

Les fortes températures accélèrent la dégradation des lubrifiants, des joints d'étanchéité et des composants électroniques.

- **Vibrations importantes**

Les vibrations permanentes durant le transport entraînent le desserrage des assemblages mécaniques et accélèrent la fatigue des structures.

- **État dégradé des pistes minières**

Les irrégularités du terrain augmentent les charges dynamiques appliquées au châssis, aux suspensions et aux pneumatiques.

- **Conditions sévères d'exploitation**

Les longues durées de fonctionnement sous fortes charges augmentent le niveau global de sollicitation des équipements.

- **Cycles de travail intensifs**

Le fonctionnement continu réduit les périodes de récupération thermique et mécanique des composants, accélérant leur vieillissement.

III.6.3.5. Matière

Cette catégorie regroupe les causes liées aux consommables et aux pièces de rechange utilisées.

- **Qualité insuffisante des pièces de rechange**

L'utilisation de pièces non conformes aux spécifications constructeur réduit la fiabilité des équipements.

- **Utilisation de composants incompatibles**

Des composants non adaptés peuvent provoquer des dysfonctionnements ou une usure prématurée des systèmes.

- **Retard d’approvisionnement des pièces**

L’indisponibilité des pièces de rechange entraîne le prolongement de l’utilisation de composants dégradés.

- **Utilisation de lubrifiants non adaptés**

Un lubrifiant inapproprié réduit l’efficacité de la lubrification et augmente les phénomènes de frottement et d’usure.

- **Dégradation des filtres et consommables**

L’usure ou le colmatage des filtres favorise la contamination des circuits et réduit les performances des systèmes mécaniques et hydrauliques.

III.7. Application de la loi de Weibull

III.7.1. Introduction

La loi de Weibull est l’un des modèles les plus utilisés en analyse de la fiabilité. Elle permet d’étudier le comportement des défaillances et d’en identifier la nature (aléatoire, usure ou défaillances précoces).

Ce modèle a été appliqué aux différents types de camions des deux carrières étudiées précédemment .

L’analyse est basée sur des données réelles de pannes extraites du système de maintenance propre à chaque mine.

III.7.2. Méthodologie de calcul

III.7.2.1. Calcul du TBF

On calcul du TBF à partir des dates successives des pannes selon la relation :

$$\text{TBF} = \text{Date}_{i+1} - \text{Date}_i \quad (\text{III.1})$$

et après conversion en heures (1 jour=24 heures), les valeurs obtenues sont ensuite classées par ordre croissant ($t_1 < t_2 < \dots < t_n$)

Cette étape est essentielle pour pouvoir déterminer la fonction de répartition empirique à l’aide de la relation suivante :

$$F_i = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (\text{III.2})$$

Nous prenons un nombre d'échantillons $n \leq 20$

Par la suite, afin de linéariser la loi de Weibull, on effectue les transformations logarithmiques suivantes :

$$X = \ln(t), Y = \ln(-\ln(1-F)) \quad (\text{III.3})$$

Le paramètre de forme β a été déterminé par régression linéaire après transformation des données TBF selon le modèle de Weibull. »

$$\beta = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum(X_i - \bar{X})^2} \quad (\text{III.4})$$

Tableau III.9: Tableau de TBF du camion Caterpillar 773F en 2023

Ordre i	TBF (heures)	Fi	X = ln (TBF)	Y = ln(-ln(1-Fi))
1	24	0.045	3.178	-3.08
2	24	0.110	3.178	-2.15
3	24	0.175	3.178	-1.65
4	120	0.240	4.787	-1.29
5	144	0.305	4.969	-1.01
6	168	0.370	5.124	-0.77
7	192	0.435	5.257	-0.56
8	240	0.500	5.481	-0.37
9	288	0.565	5.663	-0.18
10	336	0.630	5.817	-0.006
11	480	0.695	6.174	0.17
12	720	0.760	6.579	0.36
13	840	0.825	6.733	0.56
14	1176	0.890	7.069	0.79
15	1968	0.955	7.585	1.13

Le tracé des points (X, Y) donne une droite appelée droite de Weibull.

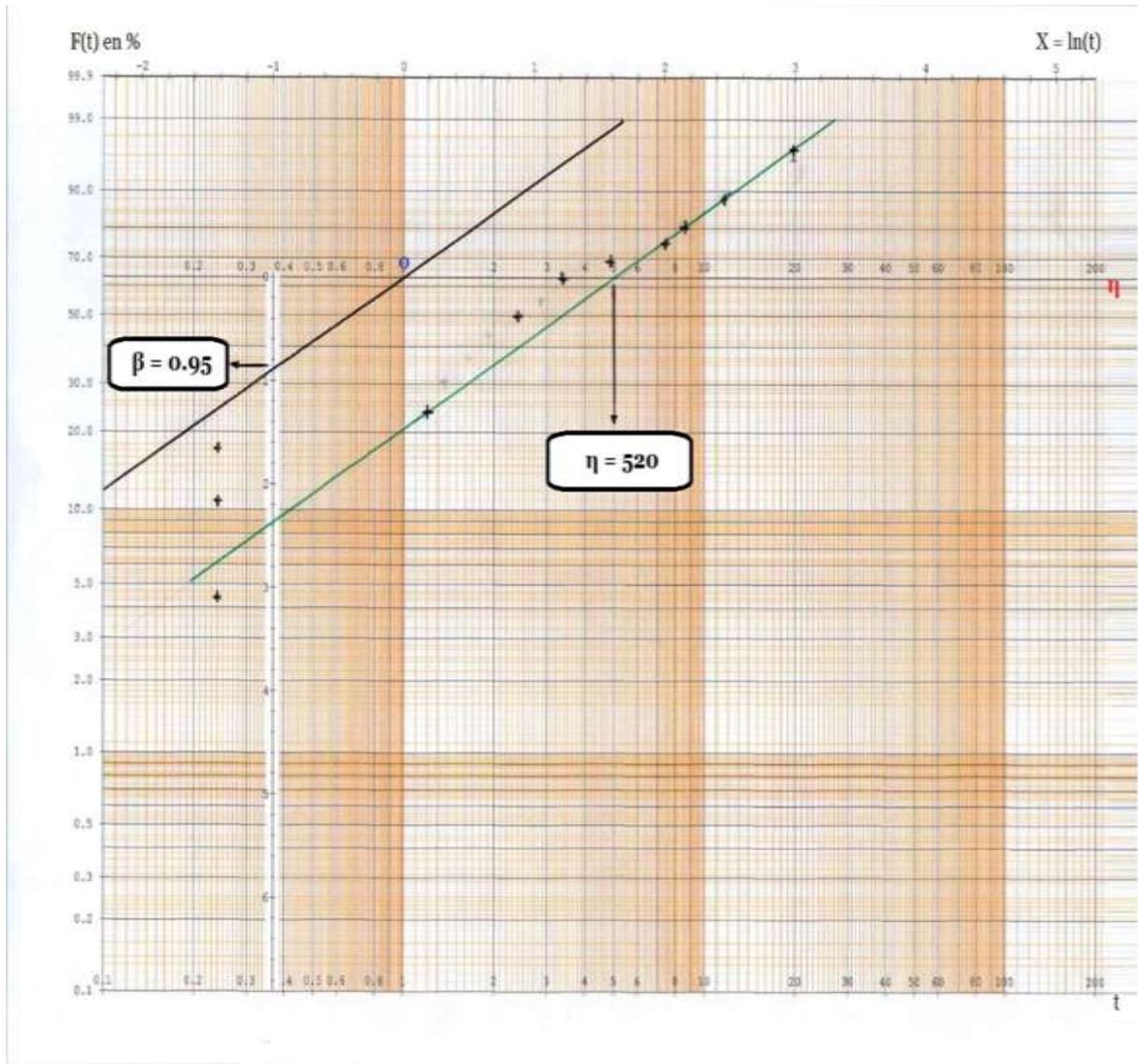


Figure III.15: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 773F – 2023

Tableau III.10: Tableau de TBF du camion Caterpillar 773F en 2024

Ordre i	TBF (heures)	Fi	$X = \ln(\text{TBF})$	$Y = \ln(-\ln(1-F_i))$
1	24	0.042	3.178	-3.15
2	48	0.104	3.871	-2.21
3	72	0.165	4.277	-1.71
4	72	0.226	4.277	-1.36
5	96	0.287	4.564	-1.08
6	120	0.348	4.787	-0.85
7	144	0.409	4.969	-0.64
8	168	0.470	5.124	-0.45
9	168	0.530	5.124	-0.28
10	192	0.591	5.257	-0.11
11	216	0.652	5.375	0.05
12	240	0.713	5.481	0.22
13	312	0.774	5.743	0.40
14	336	0.835	5.817	0.59
15	408	0.896	6.011	0.82
16	1032	0.957	6.940	1.15

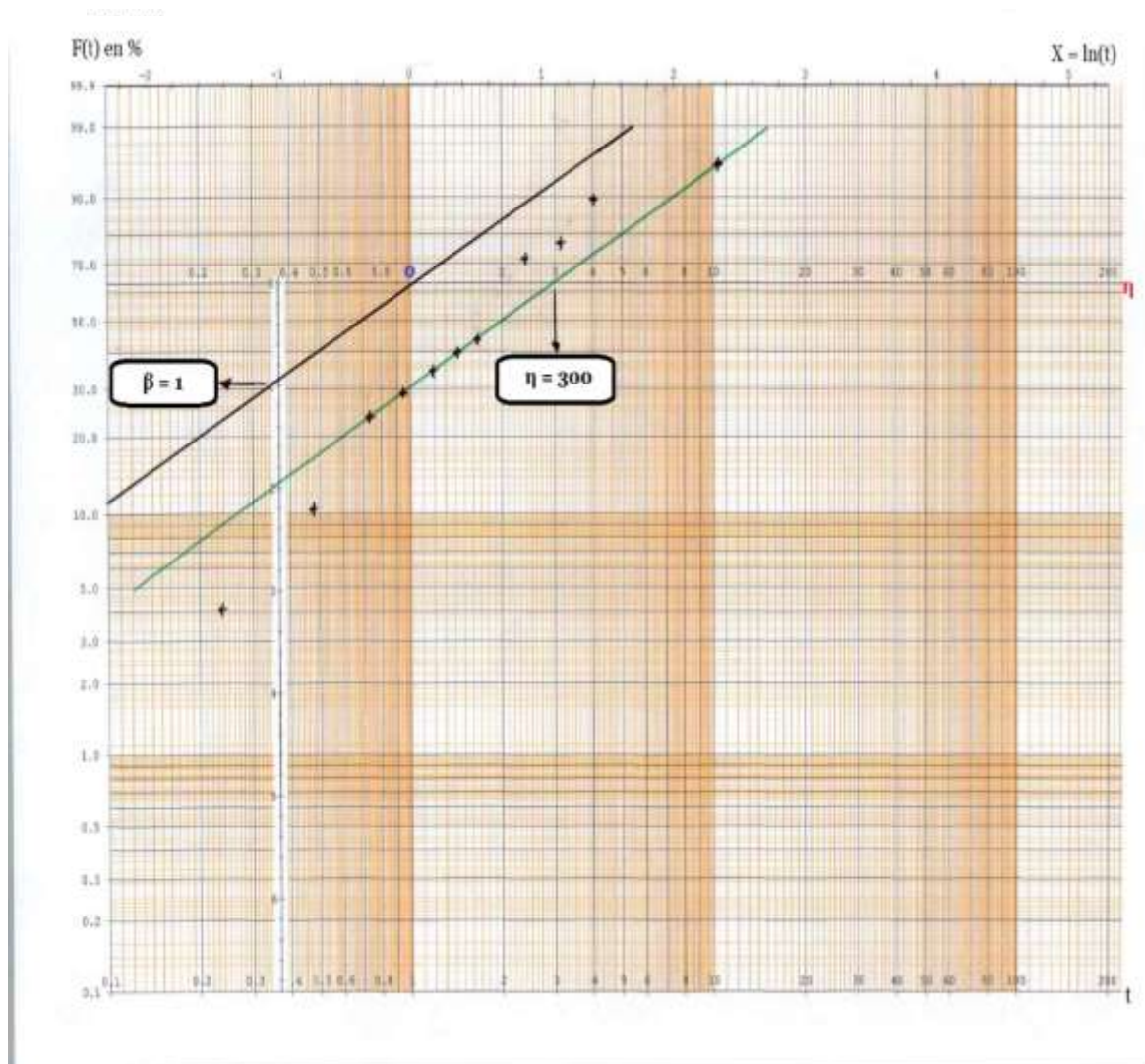


Figure III.16: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 773F – 2024

Tableau III.11: Tableau de TBF du camion Caterpillar 773F en 2025

Ordre i	TBF (heures)	Fi	$X = \ln(TBF)$	$Y = \ln(-\ln(1-Fi))$
1	24	0.042	3.178	-3.15
2	24	0.104	3.178	-2.21
3	24	0.165	3.178	-1.71
4	48	0.226	3.871	-1.36
5	48	0.287	3.871	-1.08
6	120	0.348	4.787	-0.85
7	144	0.409	4.970	-0.64
8	168	0.470	5.124	-0.45
9	168	0.530	5.124	-0.28
10	216	0.591	5.375	-0.11
11	288	0.652	5.663	0.05
12	432	0.713	6.068	0.22
13	456	0.774	6.122	0.40
14	816	0.835	6.704	0.59
15	1032	0.896	6.940	0.82
16	1032	0.957	6.940	1.15

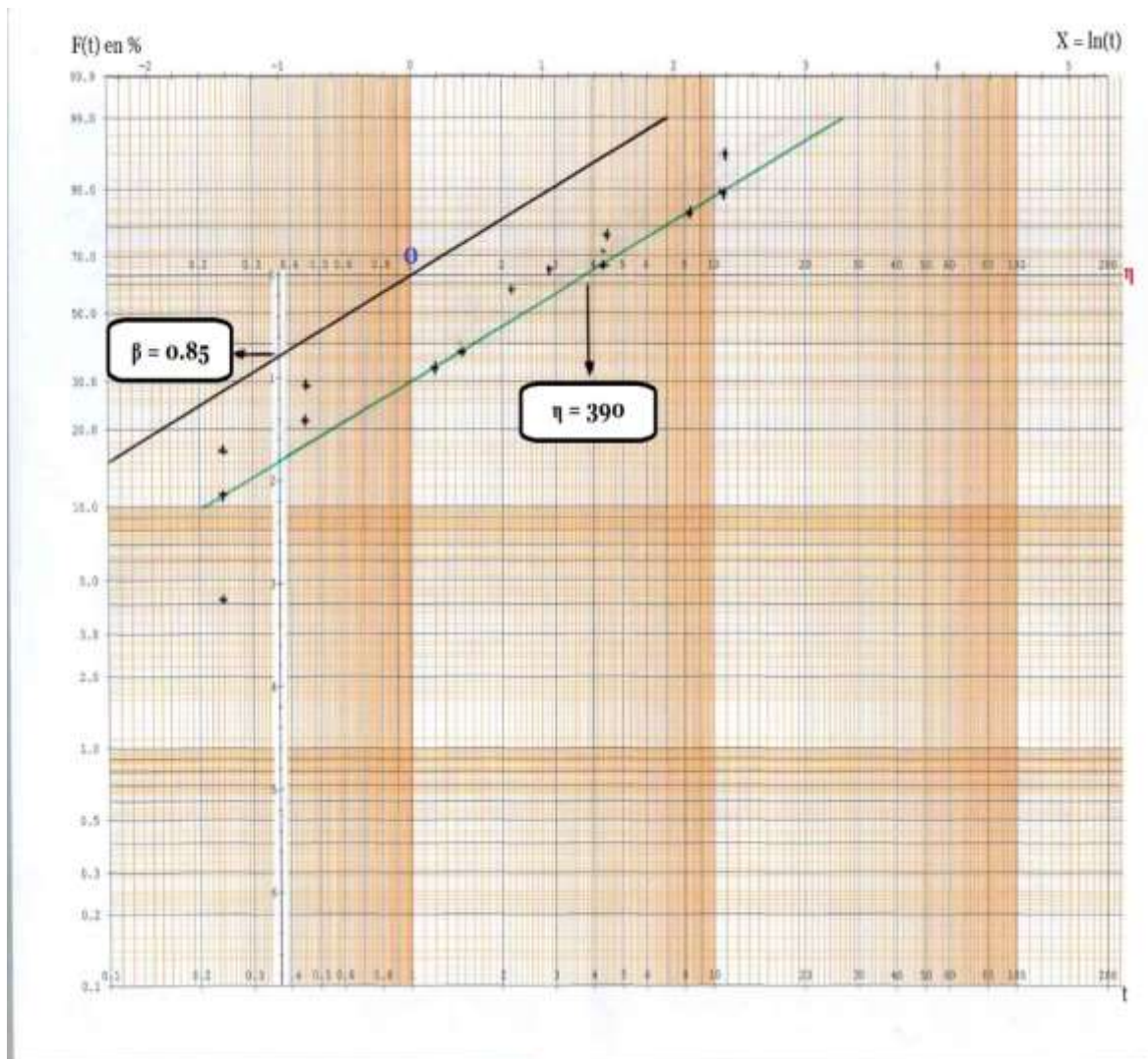


Figure III.17: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 773F – 2025

Après la construction de la droite de Weibull et l'estimation des paramètres (β , η), nous procédons au calcul du MTBF ainsi que de la fiabilité du système du camion Caterpillar 773F au site de Djebel Onk.

Remarque :

$$\text{MTBF} = A * \eta + \gamma \tag{III.5}$$

(A : valeur sur le tableau de Weibull)

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \tag{III.6}$$

Tableau III.12: Évolution des paramètres de fiabilité de CAT773F

Années	β	η (h)	MTBF (h)	R (MTBF)%	R(η) %
2023	0.95	520	532.168	41.85	36.79
2024	1.00	300	300	46.77	36.79
2025	0.85	390	424.32	43.43	36.79

- $\beta \approx 1 \rightarrow$ régime de défaillance aléatoire et stabilité relative du système.
- La baisse de η et du MTBF en 2024 indique une dégradation, suivie d'une amélioration en 2025.
- La fiabilité reste globalement moyenne ($\approx 40\%$) avec de faibles variations selon les conditions d'exploitation et la fréquence des défaillances observées.

Tableau III.13: Tableau de TBF du camion Caterpillar 770G en 2023

Ordre i	TBF	F_i	$X = \ln(TBF)$	$Y = \ln(-\ln(1-F_i))$
1	22	0.043	3.091	-3.124
2	35	0.104	3.555	-2.209
3	41	0.165	3.714	-1.713
4	58	0.226	4.060	-1.362
5	63	0.287	4.143	-1.084
6	77	0.348	4.343	-0.849
7	85	0.409	4.443	-0.643
8	94	0.470	4.543	-0.454
9	110	0.531	4.700	-0.278
10	126	0.591	4.836	-0.112
11	139	0.652	4.934	-0.054
12	152	0.713	5.024	0.222
13	168	0.774	5.124	0.397

14	181	0.835	5.198	0.589
15	195	0.896	5.273	0.817
16	210	0.957	5.347	1.146

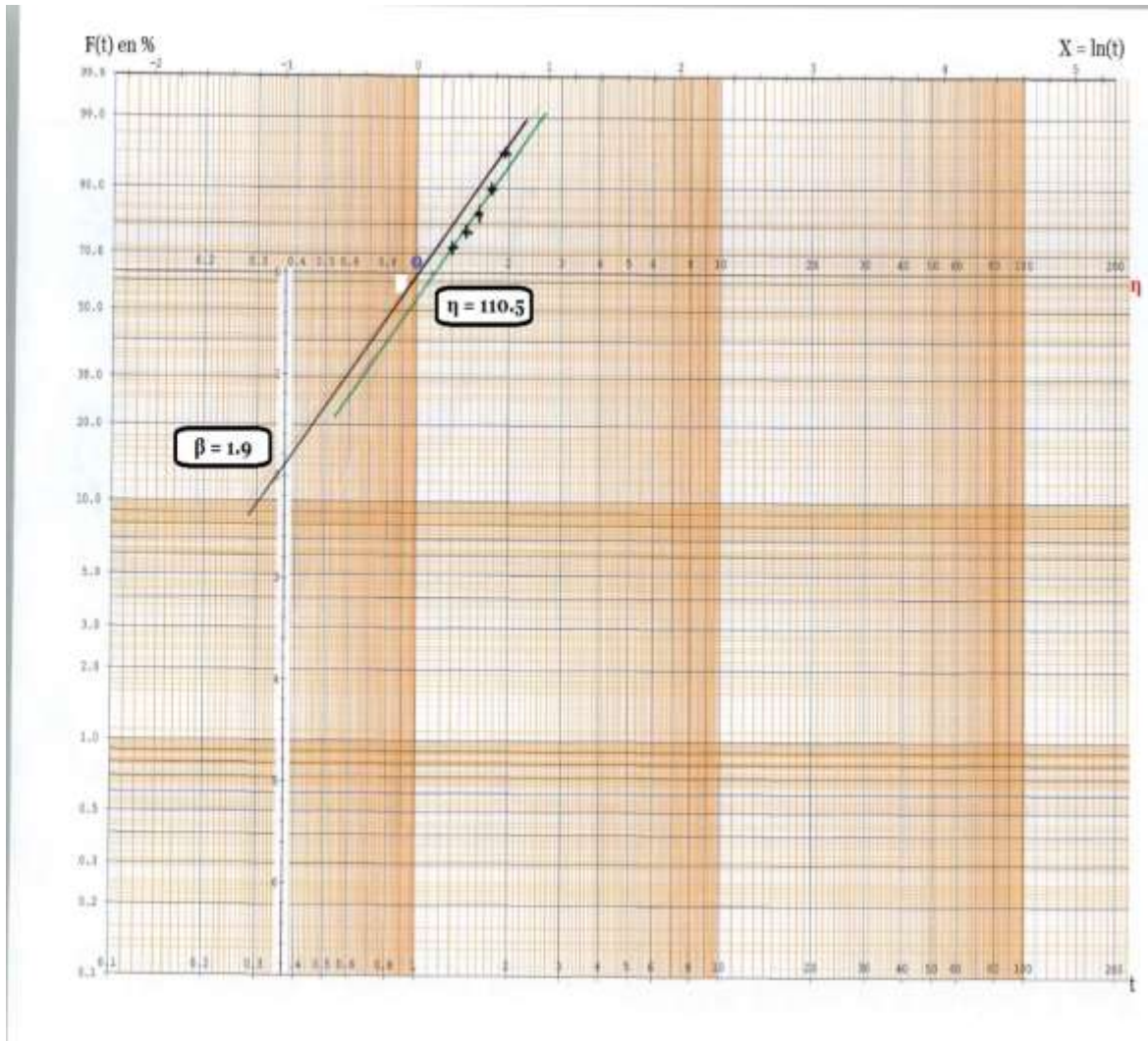


Figure III.18: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 770G – 2023

Tableau III.14: Tableau de TBF du camion Caterpillar 770G en 2024

Ordre i	TBF	Fi	X = ln (TBF)	Y = ln(-ln(1-Fi))
1	28	0.043	3.332	-3.124
2	39	0.104	3.664	-2.209
3	52	0.165	3.951	-1.713
4	66	0.226	4.190	-1.362
5	74	0.287	4.304	-1.084
6	89	0.348	4.489	-0.849
7	101	0.409	4.615	-0.643
8	117	0.470	4.762	-0.454
9	129	0.531	4.860	-0.278
10	141	0.591	4.949	-0.112
11	158	0.652	5.063	-0.054
12	172	0.713	5.148	0.222
13	185	0.774	5.220	0.397
14	199	0.835	5.293	0.589
15	214	0.896	5.365	0.817
16	228	0.957	5.429	1.146

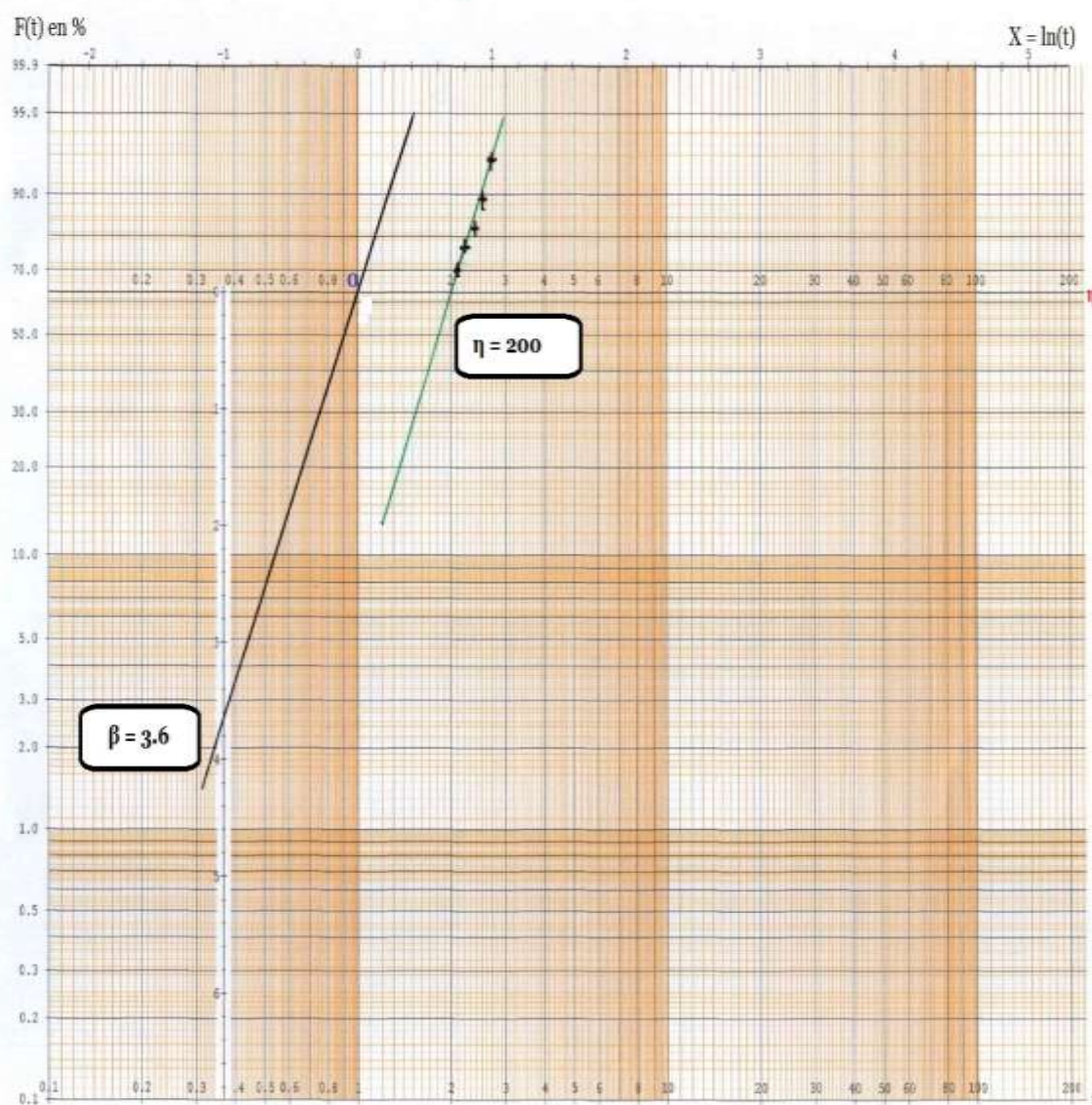


Figure III.19: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 770G – 2024

Tableau III.15: Tableau de TBF du camion Caterpillar 770G en 2025

Ordre i	TBF	Fi	$X = \ln(TBF)$	$Y = \ln(-\ln(1-Fi))$
1	31	0.0427	3.434	-3.124
2	46	0.1037	3.829	-2.209
3	59	0.1646	4.077	-1.713
4	73	0.2256	4.290	-1.362
5	88	0.2866	4.477	-1.084
6	102	0.3476	4.625	-0.849
7	118	0.4085	4.770	-0.643
8	134	0.4695	4.897	-0.454
9	149	0.5305	5.004	-0.278
10	165	0.5915	5.105	-0.112
11	182	0.6524	5.204	-0.054
12	198	0.7134	5.288	0.222
13	216	0.7744	5.375	0.397
14	233	0.8354	5.451	0.589
15	249	0.8963	5.517	0.817
16	265	0.9573	5.579	1.146

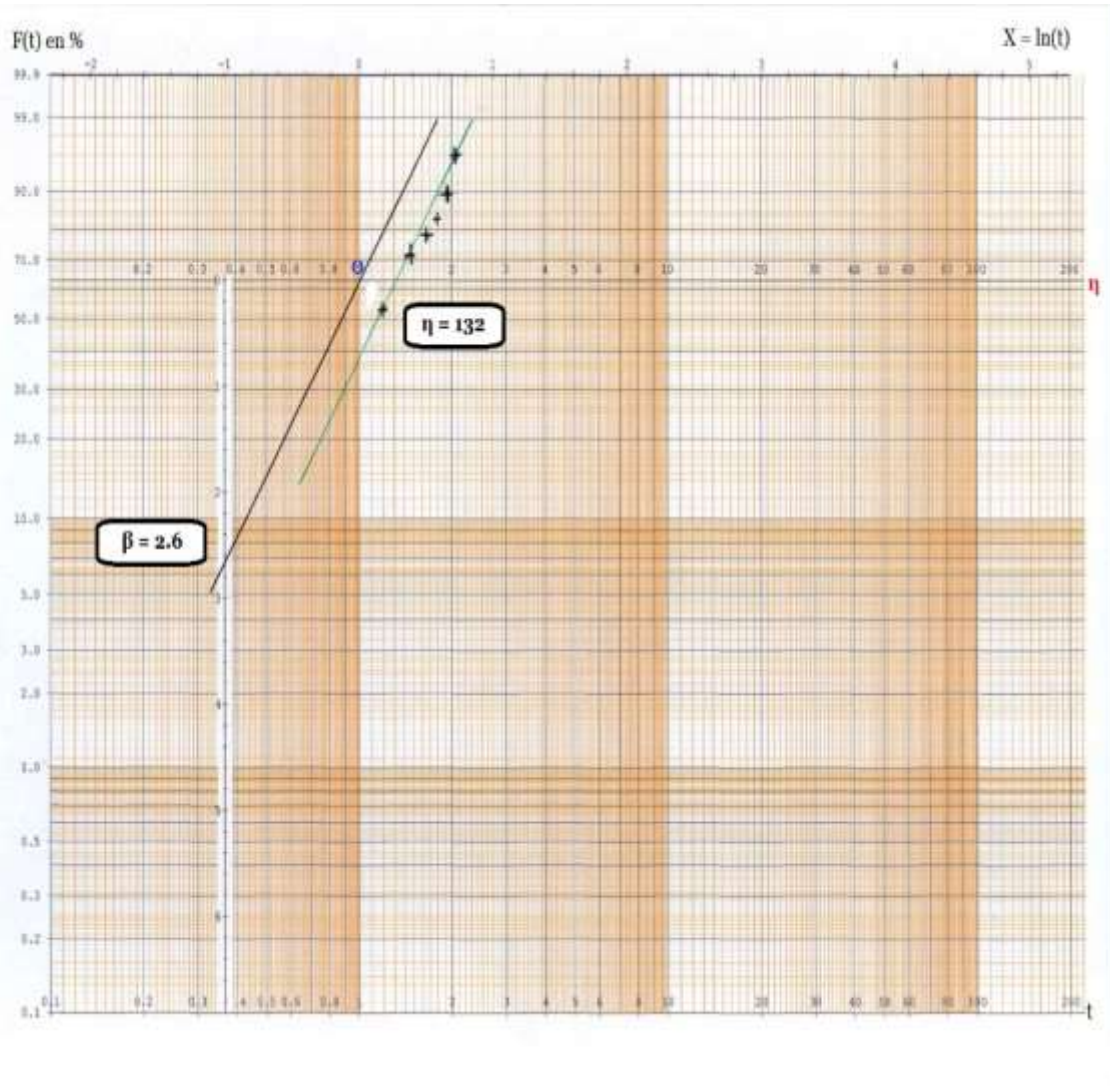


Figure III.20: Représentation de la droite de Weibull du camion Caterpillar 770G – 2025

Tableau III.16: Évolution des paramètres de fiabilité de CAT770G

Années	β	η (h)	MTBF (h)	R (MTBF) %	R(η) %
2023	1.9	110.5	208.56	37.26	36.79
2024	3.6	200	180.22	83.40	36.79
2025	2.6	132	117.24	28.38	36.79

- $\beta > 1 \rightarrow$ régime d’usure, ce qui indique une augmentation progressive des défaillances.
- Le paramètre η montre une amélioration en 2024, traduisant une augmentation de la

durée caractéristique de fonctionnement, suivie d'une dégradation en 2025, tandis que le MTBF présente une diminution progressive sur toute la période étudiée.

- La fiabilité est très variable, avec un pic en 2024 (83 %) suivi d'une baisse importante.
- Le système présente un comportement instable nécessitant un renforcement de la maintenance préventive

III.7.2.2. Étude de la fiabilité entre les deux camions (CAT773F et CAT770G)

La comparaison de la fiabilité entre les deux camions reflète le comportement réel des équipements à partir des données effectives de défaillances en exploitation.

Tableau III.17: La fiabilité des deux engins pendant 3 années

Années	Caterpillar 773F Djebel Onk	Caterpillar 770G El Ma Labiod
2023	41.85 %	37.26 %
2024	46.77 %	83.40 %
2025	43.43 %	28.38 %

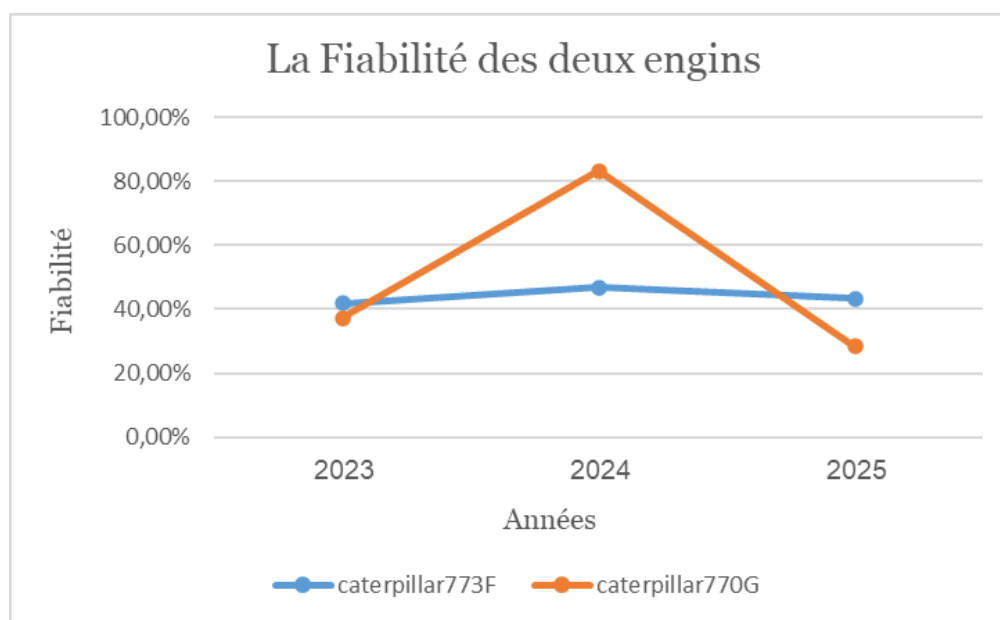


Figure III.21: Diagramme de la fiabilité des deux engins pendant 3 années

Analyse

Le graphique (Figure III.20) montre l'évolution de la fiabilité des deux camions durant la période 2023–2025. On constate que le camion 773F présente une fiabilité relativement stable, avec des valeurs comprises entre 42 % et 47 %. Cette faible variation traduit une régularité dans le comportement des défaillances et l'absence de fluctuations importantes des performances au fil des années, ce qui indique une certaine stabilité des conditions d'exploitation et des pratiques de maintenance appliquées. Toutefois, cette stabilité ne signifie pas nécessairement une bonne performance, car le niveau de fiabilité reste inférieur à 50 %, ce qui révèle la persistance des pannes et leur impact sur la disponibilité opérationnelle du camion.

Par ailleurs, l'absence d'amélioration significative de la fiabilité durant la période étudiée peut refléter une prédominance de la maintenance corrective par rapport à la maintenance préventive, ainsi que l'influence des conditions sévères d'exploitation minière telles que les fortes charges, les vibrations permanentes et la poussière, qui accélèrent la dégradation des composants. Ainsi, bien que le 773F présente une bonne stabilité de fonctionnement, il ne montre pas d'évolution notable en termes d'amélioration de la fiabilité.

À l'inverse, le camion 770G présente un comportement nettement plus instable, caractérisé par une forte variabilité de la fiabilité. Cette fiabilité augmente considérablement en 2024 pour dépasser 80 %, ce qui peut traduire une amélioration temporaire des conditions d'exploitation ou une efficacité accrue des opérations de maintenance durant cette période. Cependant, cette amélioration n'a pas été durable, puisque la fiabilité chute fortement en 2025 pour atteindre moins de 30 %, traduisant une dégradation rapide des performances et une augmentation importante des défaillances.

Ces résultats montrent que le 770G souffre d'une instabilité du comportement opérationnel, fortement influencée par les variations des conditions d'exploitation ou par l'efficacité des actions de maintenance. À l'inverse, le 773F conserve un comportement plus régulier malgré un niveau de fiabilité relativement faible. On peut donc conclure que le 773F présente une fiabilité faible mais stable, tandis que le 770G se caractérise par une forte instabilité de la fiabilité, augmentant ainsi le risque de défaillances imprévues et d'arrêts soudains.

D'une manière générale, cette comparaison met en évidence que la stabilité de la fiabilité n'implique pas nécessairement une performance élevée, tout comme une amélioration temporaire de la fiabilité ne garantit pas sa durabilité. Par conséquent, les deux camions nécessitent une optimisation des stratégies de maintenance, mais avec des priorités différentes : le 773F nécessite une amélioration du niveau global de fiabilité, alors que le 770G nécessite surtout une meilleure stabilité des performances et une réduction des fluctuations importantes des défaillances.

III.7.2.3. Étude de la maintenabilité entre les deux camions (CAT773F et CAT770G)

Après avoir déterminé la fiabilité, nous passons au calcul de la maintenabilité, le 2ème paramètre de la sureté de fonctionnement par la formule suivante :

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

MTTR : Le temps technique moyen de réparation.

Tableau III.18: la maintenabilité des deux engins pendant 3 années

Années	Caterpillar 773F Djebel Onk	Caterpillar 770G El Ma Labiod
2023	64,02 %	96,47 %
2024	63,21 %	49,71 %
2025	65,85 %	52,03 %

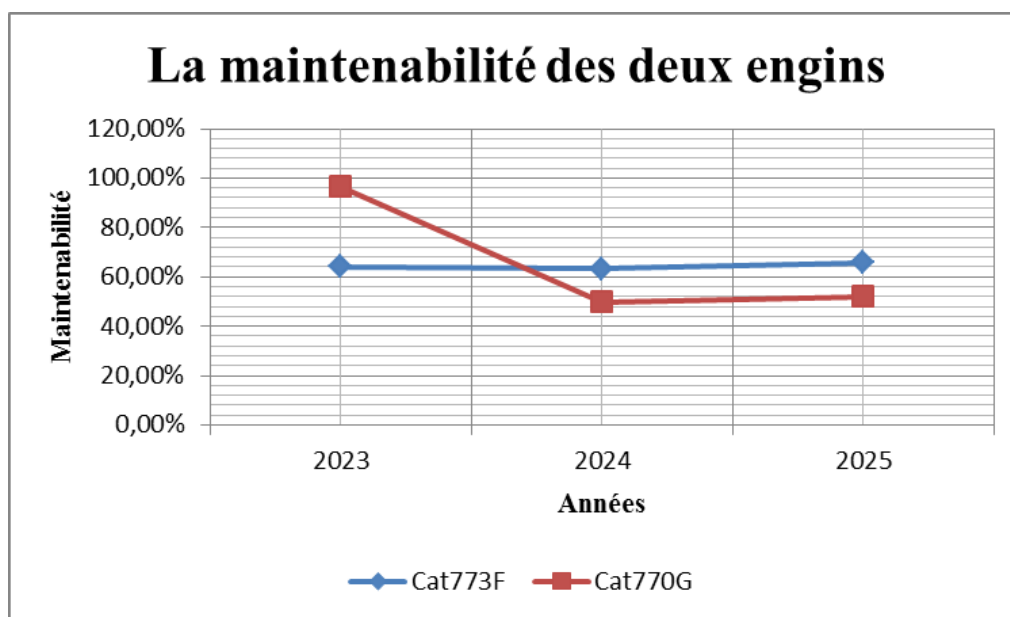


Figure III.22: Diagramme de la maintenabilité des deux engins pendant 3 années

Analyse

À travers l'analyse de la courbe de maintenabilité des deux engins Caterpillar 773F et Caterpillar 770G sur la période 2023–2025, on observe une différence nette dans leur comportement opérationnel.

En 2023, la maintenabilité du Caterpillar 770G est très élevée par rapport au 773F, ce qui indique une meilleure rapidité de réparation et une réduction des temps d'arrêt pour le 770G.

En 2024, on observe une baisse significative de la maintenabilité du 770G (49,71 %) contre une relative stabilité du 773F (63,21 %), ce qui peut s'expliquer par l'apparition de pannes plus complexes sur le 770G durant cette année.

En 2025, la maintenabilité du 770G s'améliore légèrement mais reste moyenne (52,03 %), tandis que le 773F maintient une stabilité avec une légère amélioration (65,85 %).

Globalement, le Caterpillar 773F présente une performance plus stable en maintenabilité sur les trois années par rapport au 770G. Le fort niveau de fluctuation

du 770G reflète une instabilité des opérations de maintenance ou de la nature des défaillances durant la période étudiée.

III.7.2.4. Étude de la disponibilité entre les deux camions (CAT773F et CAT770G)

Après avoir déterminé la fiabilité, nous passons au calcul de la disponibilité, le 2^{ème} paramètre de la sûreté de fonctionnement par la formule suivante :

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (\text{III.8})$$

MTBF : Temps moyen de bon fonctionnement.

Tableau III.19: la disponibilité des deux engins pendant 3 années

Années	Caterpillar 773F Djebel Onk	Caterpillar 770G El Ma Labiod
2023	94.29 %	91.08 %
2024	92.50 %	86.50 %
2025	84.75 %	83.66 %

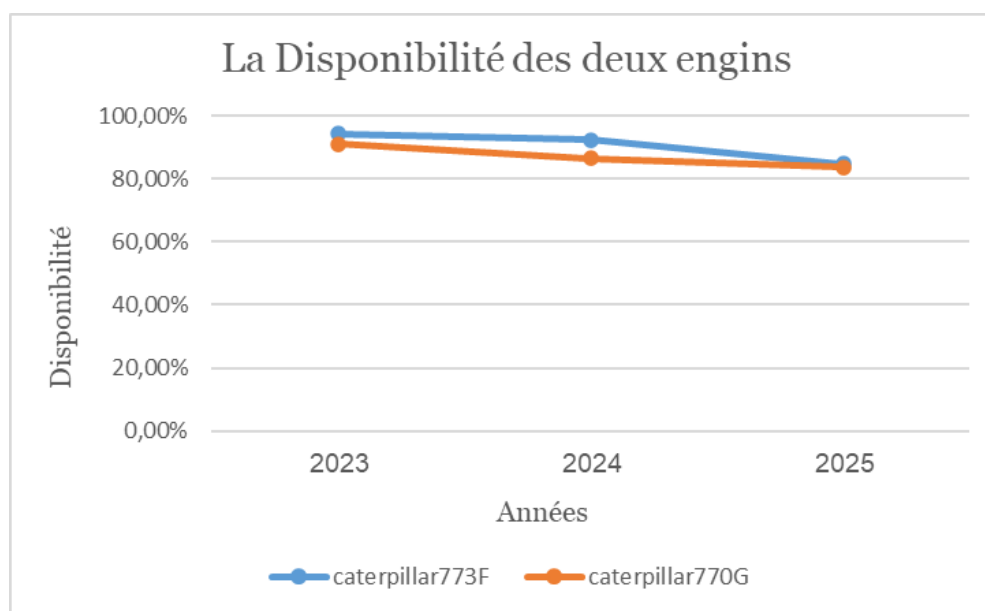


Figure III.23: Diagramme de la disponibilité des deux engins pendant 3 années

Analyse

Le graphique montre que les deux camions présentent un niveau de disponibilité élevé durant toute la période étudiée (2023–2025), avec des valeurs supérieures à 80%.

Le camion 773F enregistre les meilleures performances en 2023 et 2024, avec une disponibilité proche de 95%, mais ce pourcentage ne reflète pas automatiquement la fiabilité ce qui est prouvé par le nombre des heures d'arrêt très élevé pour le cas de la carrière de Djebel Onk.

Cependant, on observe une diminution progressive de la disponibilité pour les deux camions jusqu'en 2025, où leurs performances deviennent presque similaires (≈ 84 –85%). Cette baisse peut être liée à une augmentation des temps de réparation (MTTR) ou à une fréquence plus élevée des pannes.

Le camion 770G, bien qu'il soit légèrement inférieur au 773F en 2023 et 2024, montre une convergence en 2025, ce qui indique une amélioration relative de ses performances ou une légère dégradation de celles du 773F.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué les outils de l'analyse de la fiabilité, notamment la loi de Weibull, afin d'étudier le comportement des défaillances des camions dans deux environnements industriels distincts : la mine de Djebel Onk et la carrière d'El Ma Labiod.

Les résultats obtenus montrent que les conditions d'exploitation influencent fortement la performance des équipements. En effet, les engins opérant en milieu minier présentent une variabilité plus importante des défaillances, notamment en raison des contraintes environnementales sévères telles que la poussière, la nature abrasive du sol et les charges élevées.

L'analyse a également révélé que la catégorie « autres pannes » représente une part importante des arrêts, ce qui met en évidence une insuffisance dans la classification des défaillances et nécessite une amélioration du système de gestion de maintenance.

Par ailleurs, l'étude des paramètres de Weibull a permis d'identifier différents régimes de défaillance, allant d'un comportement aléatoire à un phénomène d'usure, selon le type d'équipement et les conditions d'exploitation.

Enfin, cette étude souligne l'importance d'adopter une stratégie de maintenance adaptée, basée sur l'analyse statistique des données réelles, afin d'améliorer la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité des équipements industriels.

Recommandations générales

Au terme de cette étude portant sur l'analyse de la fiabilité des camions miniers dans les sites de Djebel Onk et d'El Ma Labiod, plusieurs recommandations peuvent être proposées afin d'améliorer la disponibilité des équipements, de réduire les temps d'arrêt et d'assurer une meilleure continuité de la production.

• Renforcer la maintenance préventive

Il est recommandé de renforcer les opérations de maintenance préventive à travers des contrôles réguliers des systèmes mécaniques, électriques et hydrauliques des engins. Cette démarche permet de détecter les anomalies avant l'apparition des pannes majeures, de limiter les arrêts imprévus et d'augmenter la durée de vie des équipements.

• Améliorer la classification des pannes

Les résultats obtenus montrent que la catégorie « autres pannes » représente une part importante des temps d'arrêt. Il est donc nécessaire d'améliorer le système de classification des défaillances afin d'identifier précisément les causes réelles des arrêts, notamment les problèmes liés aux pneumatiques, aux suspensions, au châssis et au système de refroidissement.

Une classification plus détaillée facilite l'analyse statistique et améliore l'efficacité des interventions de maintenance.

• Réduire les temps d'arrêt hydrauliques

Les pannes hydrauliques constituent l'une des principales causes d'immobilisation, particulièrement au niveau du camion TEREX TR60. Il est recommandé d'effectuer un suivi périodique des pompes, des vérins, des flexibles et des circuits hydrauliques, ainsi que de contrôler régulièrement les niveaux et la qualité des huiles hydrauliques afin de prévenir les défaillances et réduire les temps d'arrêt.

• Assurer le suivi des composants critiques

Les composants les plus sollicités, tels que les moteurs, les systèmes de freinage, les suspensions et les équipements hydrauliques, doivent faire l'objet d'un suivi régulier basé sur les indicateurs de fiabilité comme le MTBF, le MTTR et le taux de défaillance.

Cette méthode permet d'anticiper les dégradations et de planifier les interventions avant l'apparition des pannes critiques.

- **Renforcer la formation des opérateurs**

Il est recommandé d'assurer une formation continue des opérateurs et des agents de maintenance concernant les bonnes pratiques d'exploitation, les méthodes de diagnostic et les procédures de maintenance préventive.

Une meilleure maîtrise des équipements contribue à réduire les erreurs humaines et à améliorer les performances globales des engins.

- **Améliorer les conditions d'exploitation**

Les conditions sévères de travail, telles que la poussière, les vibrations et les fortes charges, influencent directement la fiabilité des équipements. Il est donc recommandé d'améliorer l'état des pistes minières, de limiter les surcharges et d'assurer un environnement d'exploitation plus adapté afin de réduire l'usure prématurée des composants.

- **Mettre en place un système de suivi de fiabilité**

Enfin, il est recommandé d'adopter un système informatisé de gestion et de suivi des défaillances permettant la collecte et l'analyse des données de maintenance en temps réel.

Cette approche facilite la prise de décision et contribue à l'amélioration continue de la disponibilité et de la performance des équipements miniers.



Conclusion Générale

Conclusion générale

Cette étude a permis d'analyser la fiabilité des camions utilisés dans deux environnements industriels différents, à savoir la mine de phosphate de Djebel Onk et la carrière d'El Ma Labiod, dans le but d'étudier le comportement des défaillances ainsi que l'impact des conditions d'exploitation sur la performance et la disponibilité des équipements de transport minier.

Sur le plan théorique, les notions fondamentales de la sûreté de fonctionnement ont été abordées, notamment la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité, qui constituent des indicateurs essentiels pour l'évaluation des systèmes industriels. Les principaux indicateurs de performance tels que le MTBF (Mean Time Between Failures), le MTTR (Mean Time To Repair) ainsi que le taux de défaillance ont été également présentés. En outre, une attention minutieuse a été accordée aux modèles probabilistes utilisés en fiabilité, en particulier la loi de Weibull, largement employée pour l'analyse et la modélisation des durées de vie des équipements.

Sur le plan pratique, l'étude s'est basée sur des données réelles issues des services de maintenance des deux sites étudiés en utilisant les historiques des pannes, comprenant les heures de fonctionnement, les temps d'arrêt, le nombre et la nature des pannes. Ces données ont permis de réaliser une analyse statistique détaillée des défaillances mécaniques, électriques, hydrauliques ainsi que d'autres types de pannes.

Les résultats obtenus montrent clairement que les conditions d'exploitation sévères de la mine de Djebel Onk, caractérisées par la poussière, les vibrations, les fortes charges et la nature des pistes minières, ont un impact direct sur la fiabilité des équipements. Ces conditions entraînent une augmentation des défaillances, en particulier au niveau des systèmes hydrauliques et électriques.

L'étude comparative entre les équipements a également mis en évidence des différences significatives en termes de fréquence des pannes, de durée d'arrêt et de comportement en fonctionnement. Certaines machines présentent une forte sensibilité aux défaillances hydrauliques, tandis que d'autres sont d'avantage affectées par les pannes électriques ou mécaniques. Cette analyse a permis d'identifier les composants les plus critiques et les plus sensibles au sein du système étudié.

Par ailleurs, les résultats montrent que l'amélioration des pratiques de maintenance préventive, le suivi régulier des équipements critiques et la détection précoce des anomalies constituent des leviers essentiels pour améliorer la fiabilité globale des engins, réduire les coûts de maintenance et optimiser la disponibilité opérationnelle.

Enfin, cette étude confirme l'importance de l'application des méthodes de fiabilité dans le domaine minier et industriel, en tant qu'outil d'aide à la décision permettant d'améliorer les performances des équipements, d'assurer la continuité de production et de minimiser les arrêts non planifiés. Ce travail peut également servir de base pour des études futures intégrant des approches plus avancées de maintenance prédictive et d'optimisation des systèmes industriels



Bibliographie

Bibliographie

- [1] FERPHOS, Site officiel : www.ferphos.com
- [2] Ministère de l'Énergie et des Mines, "Le secteur minier en Algérie", Algérie.
- [3] ORGM, Études géologiques du bassin phosphaté de Djebel Onk, Algérie.
- [4] SOMIPHOS, Données internes d'exploitation du gisement de Kef Essenoun, situation au 31/12/2025.
- [5] SOMIPHOS, Projet Intégré des Phosphates (PPI), documents internes et rapports de développement industriel.
- [6] Plan d'exploitation 2025
- [7] Centre National des Etudes et de Formation de l'Industries des Carrières et des Matériaux de construction (CEFICEM), « Le forage des roches ».
- [8] KOVALENKO.V. AMBARTSOUMIAN.N. Et LAHMER. K.M. Exploitation des carrières. Université d'Annaba. Edition OPU. 1986.
- [9] V. Koutouzov, V. Soukhanov, Destruction des roches minières à l'explosif. Nedra. Moscou. 1983
- [10] CHIBKA.N « Exploitation des gisements métallifères ». Edition Office des publications universitaires, 1980.
- [11] Ch. Derbal, Elaboration d'une méthodologie d'abattage à l'explosif dans les carrières de calcaire de cimenterie. Thèse de magister, Université d'Annaba. 1992 ;
- [12] Ch. Derbal, Influence des procédés et des paramètres des travaux de forage et de tir sur la formation des gradins stables conditions : Djebel-Safia. Mémoire de fin d'études, Zakhrouchouk, Université d'Annaba. 1987, 166p ;
- [13] CEI 60050-191 ,Vocabulaire Électrotechnique International – Sûreté de fonctionnement et qualité de service ,Commission Électrotechnique Internationale (IEC), Genève, 1990.
- [14] Zwingelstein G. « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes », Doc S 8250, Techniques de l'Ingénieur, traité Informatique industrielle, 2000, 38p.
- [15] Monchy F. « Maintenance : Méthodes et organisation » éditions DUNOD, Paris, 2000, 528p.
- [16] P. Chapouille « livre de Fiabilité et maintenabilité. Les techniques de l'ingénieur ; traité de l'entreprise industrielle » Edition1999, 287p.

- [17] Bouziane Lakhdar et Medjahed Ali. Etude et amélioration des paramètres de la sûreté de fonctionnement d'un système électromécanique. Mémoire de Master. Zine Ghemari. Université de Msila. 2020. 74p.
- [18] Melloouk Aymen et Chabbi Khaled. Optimisation de la maintenance par fiabilité (cas de la mine d'Ouenza). Mémoire de Master. Taleb Mounia. Université de Tébessa. 2023. 125p.
- [19] BOUCERRDJ Leila, (Sûreté de fonctionnement : Recherche des scénarios critique dans les systèmes mécatroniques), thèse de doctorat en sciences, d'université badji Mokhtar-Annaba, 201p.
- [20] Ahmed Bellaouar et Salima Beleulmi. FIABILITE, MAINTENABILITE et DISPONIBILITE(FMD). LOGI- Scientific journal on transport and logistics. 2014. 105p.
- [21] A. VILLEMEUR, (1997) « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels ». Éd. Eyrolles EDF, Collection de la Direction des Études et Recherches d'Electricité de France, 795p.
- [22] Kherbouche Amine et Boutalbi Mabrouk. L'impact D'amélioration De La Fiabilité Sur La Durée De Vie D'une Machine Stratégique Dans un Appareil De Forage Pétrolier. Cas De (Top Drive 8050 AC-712). Mémoire de Master. Bensaci Mohammed Abdellatif. Université d'Ouargla. 2019. 79p.
- [23] <https://homeomath2.immingo.net/loiweibull2.htm>
- [24] Bouhabila, H. (s.d). La fiabilité des systèmes de production. Cours de Stratégies de Maintenance, Master S2/MI, 23p.
- [25] Caterpillar Inc. 773F Off-highway truck specifications. Caterpillar, 2006.
- [26] TEREX corporation, TR 60 rigid dump truck specifications, TEREX, 2006.
- [27] Caterpillar Inc. 770G Off-highway truck specifications. Caterpillar, 2012.
- [28] Kaoru Ishikawa, Guide to Quality Control, Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986, 226p.



Les Annexes

Annexe 1 :**Tableau :** Processus morphogénétiques dominants

Processus	Impact
Érosion fluviale	Incision des vallées
Érosion différentielle	Mise en relief des calcaires
Altération mécanique	Désagrégation en climat semi-aride
Tectonique compressive	Soulèvement et plissement

Annexe 2 :**Tableau :** données du départ

Reserve géologique	2 250 684 789,13 T
Reserve exploitable	349 000 000 T
Angle du talus des gradins inexploitable	60°
Dureté	3-4
Densité	2.3 g/cm ³
Angle de frottement interne	37°
Résistance à la compression	78.3Mpa
Diamètre du trou	165 mm

Annexe 3 :**Tableau :** caractéristique technique du bulldozer sur pneus
Cat 824

01	Hauteur au sommet du gyrophare	4422 mm
02	Hauteur jusqu'au sommet du tuyau d'échappement	4332 mm
03	Hauteur jusqu'au sommet du capot	3204 mm
04	Garde au sol jusqu'au pare-chocs	852 mm
05	Axe de l'essieu arrière jusqu'au bord du pare-chocs	2830 mm
06	Axe de l'essieu avant jusqu'à l'attelage	1850 mm
07	Empattement	3700 mm
08	Longueur avec lame sur le sol (lame droite)	8422 mm
09	Distance garde au sol au tourillon	441.4 mm
10	Hauteur jusqu'au sommet de la cabine	4100 mm
11	Largeur au-dessus des garde-corps	3336 mm
12	Garde au sol	534.4 mm
13	Capacité du lame	7.7 m ³

Annexe 4 :**Tableau :** caractéristique technique du pelle Cat 390F

Dimensions	
Option de flèche	Flèche pour creusement intensif de 7,25 m
Option de bras	M2.92JC
Hauteur d'expédition	4890 mm
Longueur d'expédition	13690 mm
Rayon d'encombrement arrière	4700 mm
Longueur jusqu'au centre des galets	5120 mm
Longueur des chaînes	6350 mm
Garde au sol	900 mm
Voie des chaînes	2750 mm
Largeur de transport (patins de 650 mm)	4150 mm
Largeur de transport (patins de 900 mm)	4400 mm
Hauteur de la cabine	3650 mm
Hauteur du contrepoids	1540 mm
Plages de fonctionnement	
Option de flèche	Flèche pour creusement intensif de 7,25 m
Option de bras	M2.92JC
Profondeur d'excavation maximale	7 150 mm
Portée maximale au niveau du sol	12 200 mm

Hauteur de cavage maximale	12 550 mm
Hauteur de chargement maximale	7 990 mm
Hauteur de chargement minimale	3 010 mm
Profondeur de coupe maximale (fond plat de 2 440 mm)	7 020 mm
Profondeur d'excavation maximale (paroi verticale)	4 630 mm

Annexe 5 :**Tableau :** caractéristique technique du camion Cat 773F

Caractéristiques techniques	Symbole	Valeur	Unité
CATERPILLAR 773F	/	/	/
Puissance brute	N	552/750	Kw/ch
Capacité de la benne	Vb	35.6	m ³
Charge utile nominale	Vut	54.4	T
Vitesse de transmission	Vtr	67.5	Km/h
Rayon de braquage maximal	Rb	23.5	M
Hauteur au sommet du cadre ROPS	Hs	4116	Mm
Hauteur de chargement - à vide	Hch	3918	Mm
Hauteur hors tout - benne relevée	Hb	9261	Mm
Hauteur de l'auvent avant	Hla	4460	Mm
Longueur hors tout (benne)	Lb	9211	Mm
Longueur hors tout	Lt	10249	Mm
Longueur intérieure de la benne	Lib	6254	Mm
Largeur en ordre de marche	Lt	5425	Mm
Largeur hors tout des pneumatiques jumelés arrière	Hp	4406	Mm
Poids du camion à vide (standard)	Pc	44538	Kg

Annexe 6 :**Tableau :** caractéristique technique du camion Terex TR60

Caractéristiques techniques	Symbole	Valeur	Unité
Terex TR60	/	/	/
Puissance brute	N	552/700	Kw/ch
Capacité de la benne	Vb	35	m ³
Charge utile nominale	Vut	55	T
Vitesse de transmission	Vtr	65	Km/h
Rayon de braquage maximal	Rb	9540	Mm
Hauteur au sommet du cadre ROPS	Hs	7750	Mm
Hauteur de chargement - à vide	Hch	3680	Mm
Hauteur hors tout - benne relevée	Hb	8050	Mm
Hauteur de l'auvent avant	Hla	4440	Mm
Longueur hors tout (benne)	Lb	7750	Mm
Longueur hors tout	Lt	9130	Mm
Longueur intérieure de la benne	Lib	6000	Mm
Largeur en ordre de marche	Lt	4980	Mm
Largeur hors tout des pneumatiques jumelés arrière	Hp	4060	Mm
Poids du camion à vide (standard)	Pc	41250	Kg

Annexe 7 :**Tableau :** caractéristique technique du camion CAT 770G

Caractéristiques techniques	Symbole	Valeur	Unité
CAT 770G	/	/	/
Puissance brute	N	384/515	Kw/ch
Capacité de la benne	Vb	25.2	m ³
Charge utile nominale	Vut	40	T
Vitesse de transmission	Vtr	73.7	Km/h
Rayon de braquage maximal	Rb	8800	Mm
Hauteur au sommet du cadre ROPS	Hs	3860	Mm
Hauteur de chargement - à vide	Hch	3150	Mm
Hauteur hors tout - benne relevée	Hb	8255	Mm
Hauteur de l'auvent avant	Hla	4440	Mm
Longueur hors tout (benne)	Lb	8200	Mm
Longueur hors tout	Lt	8800	Mm
Longueur intérieure de la benne	Lib	5635	Mm
Largeur en ordre de marche	Lt	4780	Mm
Largeur hors tout des pneumatiques jumelés arrière	Hp	3695	Mm
Poids du camion à vide (standard)	Pc	32500	Kg