



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 : *ÉLECTROMECANIQUE*

Option : *Maintenance industrielle*

*Contribution à l'étude des concepts de la
sûreté de fonctionnement des machines de
transport dans la mine de Boukhadra*

Par

BAHLOUL Meriem

MANAA Hadjer

Devant le jury :

LOUAFI Messaoud	Président	PROF	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
TALEB Mounia	Encadreur	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
HAOUAM Ala	Examineur	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2025/2026



Année universitaire : 2025/2026

Tébessa le : 1/6/2026

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1/MANAA Hadjer

2 / BAHLOUL Meriem

Niveau : Master 2

Option : Maintenance industrielle

Thème : Contribution à l'étude des concepts de la sureté de fonctionnement
des machines de transport dans la mine de Boukhadra

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

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre 01	
Chapitre 02	
Chapitre 03	
Chapitre 04	

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي: جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لاتجاز بحث

أنا الممضى أدناه،

السيد (ة) بهلول مريم

الحاملة لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 110030367013010008 و الصادرة بتاريخ 26/02/2023

المسجلة ب: معهد المناجم قسم: المناجم و الجيو تكنولوجيا

والمكلفة بإتجاز أعمال بحث (مذكرة ماستر) عنوانها:

Contribution à l'étude des concepts de la sûreté de fonctionnement des machines de transport dans la mine de Boukhadra

أصرح بشرفي أنني ألتم بمرعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ 03/06/2026

إمضاء المعنى (ة)



Do 23/02/26

الحمد لله

رئيس المجلس القضي البلدي وتطويعه
المنشوب البلدي
السيد جواد محمد

92426

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 (ة) مانع هاجر الصفة: طالبة

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 110010367012980007 والصادرة بتاريخ 10/10/2024

المسجل بمعهد المناجم قسم: المناجم والجيوتكنولوجيا

والمكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها:

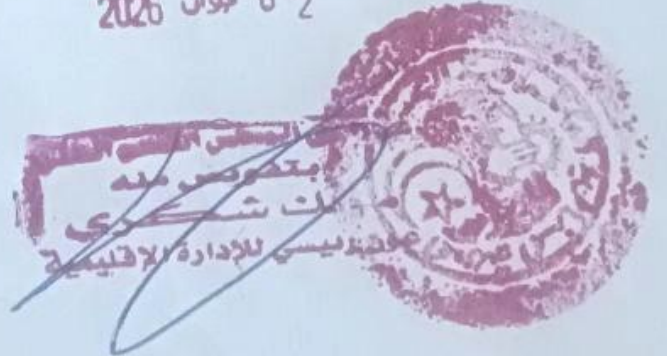
Contribution à l'étude des concepts de la sureté de fonctionnement des machines de transport dans la mine de Boukhadra

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 1 /6/2026

2 0 جوان 2026

إمضاء المعني (ة)



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Tout d'abord, nous remercions ALLAH de nous avoir accordé le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous profitons de cette occasion pour adresser nos vifs remerciements à notre encadreur, **Dr Taleb Mounia**, pour son suivi constant, ses orientations pertinentes et ses précieuses suggestions qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux travailleurs de la mine de Boukhadra, en particulier à Mme **Massidi Samia**, M. **Bakhouché Imed**, M. **Halimi Abd Essatar**, M. **Chegrouche Abd El Hafid** et M. **Guenez Abass**, pour leurs précieux conseils, leur accompagnement et leur soutien durant notre stage pratique, qui ont largement contribué à enrichir nos connaissances et à faciliter la réalisation de ce travail.

Nous exprimons également notre profonde gratitude aux professeurs de l'Institut des Mines pour les connaissances et l'expérience qu'ils nous ont transmises tout au long de notre formation.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.



وَكَانَ فَضْلُ اللَّهِ عَلَيْكَ عَظِيمًا

Dédicace

À ceux qui ont été la lumière de mon chemin...

À ceux qui ont cru en moi même lorsque je peinais à croire en moi-même.

À chaque cœur qui m'a offert une prière, un mot d'encouragement ou un peu de patience dans les moments les plus difficiles...

À ma mère, qui m'a appris que les rêves ne se réalisent qu'avec la patience.

À mon père, qui a toujours été le soutien sur lequel je pouvais m'appuyer lorsque les épreuves de la vie me faisaient vaciller.

À mes sœurs, à ma cousine, à l'épouse de mon frère, à **Awab** et à mon frère, qui ont été mon sourire au milieu de la fatigue, ma force dans les moments de doute et mon soutien tout au long de ce parcours.

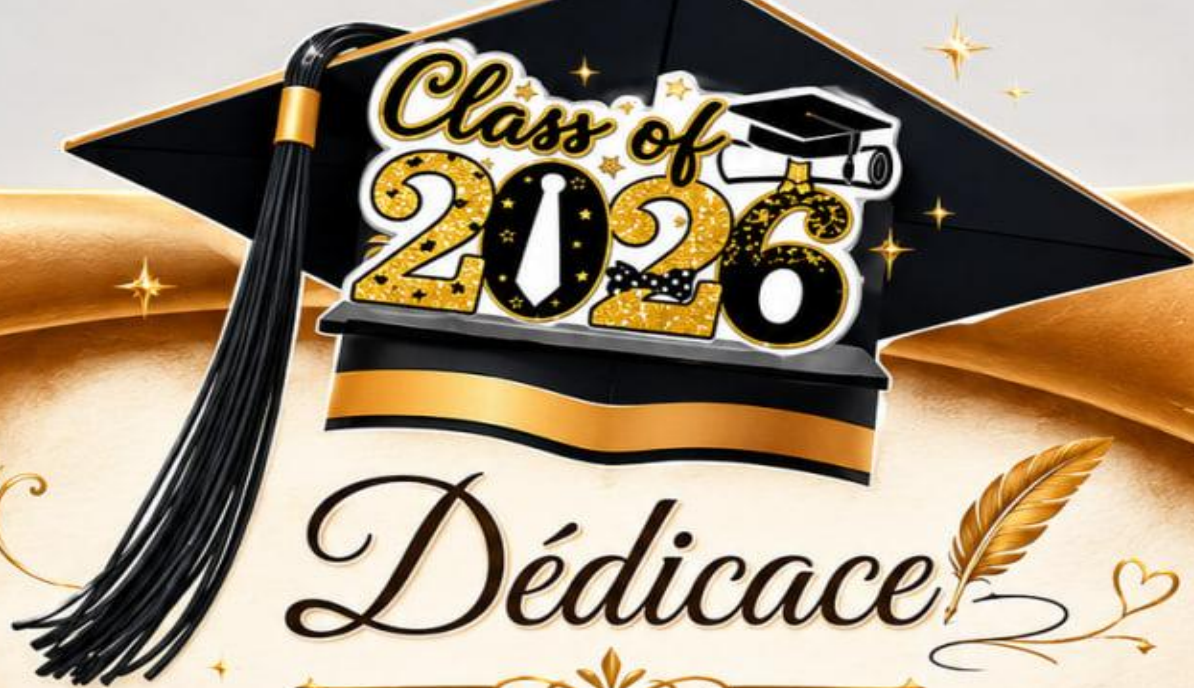
À mon enseignante encadrante, **Dr Taleb Mounia**, qui n'a pas été seulement une directrice de mémoire, mais une main tendue à chaque fois que je trébuchais, une voix qui me guidait lorsque les chemins devenaient incertains. Elle a laissé dans mon parcours une empreinte indélébile.

Cette réussite n'est pas la mienne seulement...

Elle est la vôtre à tous.

Du fond du cœur... merci.

BATLOUL Meriem



Je dédie ce modeste travail à mes très chers *parents*,
ma mère et mon père, pour leur amour,
leur patience, leurs sacrifices et leur soutien
tout au long de mon parcours.

Merci d'avoir toujours cru en moi et de
m'avoir encouragée à avancer. ♡

À mes frères et sœurs,
merci pour votre présence, votre soutien
et vos encouragements permanents. ♡

Je tiens également à adresser mes sincères
remerciements à ma deuxième mère, *Fairouz*,
pour sa patience, son accompagnement et son soutien
durant tout ce chemin.

À vous tous, j'offre ce travail
avec beaucoup d'*amour*, de *respect*
et de *gratitude*. ♡



Résumé

Les études de fiabilité et de maintenance jouent un rôle essentiel dans les entreprises minières en assurant la continuité de la production, en améliorant les performances des équipements et en réduisant les temps d'arrêt causés par les défaillances. Ce travail vise à évaluer les performances des tombereaux miniers Caterpillar 775F et Caterpillar 775G exploités au niveau de la mine de Boukhadra, à travers l'analyse des données de défaillance enregistrées durant la période d'étude.

La première partie de cette étude a consisté à collecter et à analyser les données relatives aux défaillances, aux temps d'arrêt et aux opérations de maintenance des deux camions. La deuxième partie a porté sur l'application de plusieurs outils et méthodes statistiques. Le diagramme de Pareto a été utilisé afin d'identifier les défaillances les plus importantes, tandis que le diagramme d'Ishikawa a permis de déterminer leurs causes racines. L'analyse par la loi de Weibull a ensuite été appliquée pour évaluer la fiabilité et étudier le comportement des défaillances au cours du temps. Par ailleurs, les indicateurs de maintenabilité et de disponibilité ont été calculés afin d'évaluer les performances opérationnelles des équipements.

Les résultats obtenus ont mis en évidence des différences de performance entre les deux camions et ont permis d'identifier les systèmes les plus affectés par les défaillances ainsi que les principaux facteurs influençant leur fiabilité. Enfin, un programme de maintenance préventive fondé sur les résultats obtenus a été proposé afin de réduire la fréquence des défaillances, d'améliorer les performances des équipements, d'augmenter leur disponibilité et de contribuer à l'amélioration de la productivité de la mine de Boukhadra.

الملخص:

إن إجراء دراسات الموثوقية والصيانة في المؤسسات المنجمية يكتسي أهمية كبيرة لضمان استمرارية الإنتاج وتحسين أداء المعدات وتقليل فترات التوقف الناتجة عن الأعطال. يهدف هذا العمل إلى تقييم أداء شاحنتي النقل كاتربيلار F 775 وكاتربيلار G 775 المستعملتين في منجم بوخضرة، من خلال تحليل بيانات الأعطال المسجلة خلال الفترة المدروسة.

تمثل الجزء الأول من الدراسة في جمع واستغلال المعطيات المتعلقة بالأعطال وأزمنة التوقف والصيانة الخاصة بالشاحنتين. أما الجزء الثاني فقد شمل تطبيق مجموعة من الأدوات والأساليب الإحصائية، حيث تم استخدام مخطط باريتو لتحديد الأعطال الأكثر تأثيراً، ومخطط إيشيكاوا لتحليل الأسباب الجذرية لهذه الأعطال، بالإضافة إلى تطبيق قانون وبيل لتقييم الموثوقية وتحليل سلوك الأعطال مع الزمن. كما تم حساب مؤشري قابلية الصيانة والتوافر من أجل تقييم الأداء التشغيلي للمعدات.

وأظهرت النتائج وجود اختلافات في مستوى الأداء بين الشاحنتين، مع تحديد الأنظمة الأكثر تعرضاً للأعطال والعوامل الرئيسية المؤثرة على موثوقيتهما. وفي الجزء الأخير، تم اقتراح برنامج للصيانة الوقائية مبني على النتائج المتحصل عليها، بهدف الحد من تكرار الأعطال، وتحسين أداء المعدات، ورفع مستوى الجاهزية التشغيلية، والمساهمة في تحسين الإنتاجية داخل منجم بوخضرة.

Abstract

Reliability and maintenance studies play a crucial role in mining companies by ensuring production continuity, improving equipment performance, and reducing downtime caused by failures. This work aims to evaluate the performance of Caterpillar 775F and Caterpillar 775G haul trucks operating in the Boukhadra mine through the analysis of failure data recorded during the study period.

The first part of the study focused on collecting and analyzing data related to failures, downtime, and maintenance operations of both trucks. The second part involved the application of several statistical tools and methods. The Pareto diagram was used to identify the most significant failures, while the Ishikawa diagram helped determine their root causes. Weibull analysis was then applied to assess reliability and study the behavior of failures over time. In addition, maintainability and availability indicators were calculated to evaluate the operational performance of the equipment.

The obtained results highlighted differences in performance between the two trucks and made it possible to identify the systems most affected by failures as well as the main factors influencing their reliability. Finally, a preventive maintenance program based on the obtained results was proposed in order to reduce failure frequency, improve equipment performance, increase availability, and contribute to productivity improvement in the Boukhadra mine.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	2
1.1. Introduction	5
1.2. Définition de la maintenance	5
1.3. Domaines d'action de la fonction maintenance	5
1.4. Les missions de la maintenance	6
1.5. Types de maintenance	7
1.5.1. Maintenance préventive	8
1.5.1.1. Maintenance préventive systématique	8
1.5.1.2. Maintenance préventive conditionnelle	9
1.5.1.3. La maintenance prédictive	10
1.5.2. Maintenance corrective	11
1.5.3. La maintenance améliorative	11
1.6. Politique de maintenance	12
1.6.1. Prévisions à long terme	13
1.6.2. Prévisions à moyen terme	13
1.6.3. Prévisions à court terme	13
1.7. Les objectifs de la maintenance	13
1.8. Le rôle de la maintenance	14
1.9. Les niveaux de la maintenance	14
1.10. Conclusion	15
Chapitre 2 : Lois et caractéristiques de fiabilité	17
2.1.Introduction	17
2.2.Notions générales de défaillance	17
2.3.Notions de sureté de fonctionnement (SDF)	18
2.3.1. Définition de la fiabilité	19
2.3.1.1. Les types de fiabilité	20
2.3.1.2. Les Caractéristiques de la fiabilité	20
2.3.2. La disponibilité	24
2.3.2.1. Les types de disponibilité	24
2.3.2.2. Les facteurs influençant la disponibilité	26
2.3.3. La maintenabilité	26

2.4. Les lois usuelles en fiabilité	27
2.4.1. Lois discrètes	27
2.4.1.1. Loi de Bernoulli	27
2.4.1.1.1. Définition	27
2.4.1.1.2. Remarque	27
2.4.1.1.3. Propriété	28
2.4.2. Lois continues	28
2.4.2.1. Loi exponentielle	28
2.4.2.1.1. Définition	28
2.4.2.1.2. Proposition	28
2.4.2.2. Loi de Weibull	28
2.5. Approche de la fiabilité par les probabilités	30
2.5.1. Définition de la fiabilité (NF X 06-501)	30
2.5.2. Le papier de Weibull	30
2.5.3. Échelles utilisées sur le papier de Weibull	31
2.5.4. Probabilité	31
2.5.5. Fonction requise	32
2.5.6. Conditions d'utilisation	32
2.5.7. Durée de fonctionnement	32
2.6. Conclusion	33
Chapitre 3 : Généralités sur les moyens de transport dans les carrières	35
3.1. Introduction	35
3.2. Définition d'une mine à ciel ouvert	35
3.3. Choix des moyens de transport	36
3.3.1. Transport continu (les convoyeurs à bande)	37
3.3.1.1. Types de convoyeurs miniers	38
3.3.1.1.1. Convoyeur en caoutchouc	38
3.3.1.1.2. Le convoyeur navette	39
3.3.1.1.3. Le convoyeur principal	39
3.3.1.1.4. L'élévateur à godets	40
3.3.1.1.5. Le convoyeur à raclettes	40
3.3.1.1.6. Le convoyeur à rouleaux	40
3.3.1.1.7. Le convoyeur de transfert	40
3.3.2. Transport discontinu	41

3.3.2.1. Le transport par camion	41
3.3.2.2. Transport par train	42
3.4. Mode de transport utilisés à Boukhadra	42
3.5. Domaine d'utilisation du transport par camion	44
3.6. Engins de transport	44
3.7. Choix des moyens de transport	46
3.8. Condition d'emploi des camions dans les mines à ciel ouvert	46
3.9. Défaillances des camions	47
3.9.1. Pannes mécaniques	47
3.9.2. Pannes des systèmes électroniques	47
3.10. Avantages du transport par camion	48
3.11. Conclusion	48
Chapitre 4 : ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G).....	51
4.1. Introduction	51
4.2. Historique De La Mine.....	51
4.3. Les Dates Importantes	52
4.4. Situation Géographique	52
4.5. Gisement primaire.....	53
4.5.1. La Mine A Ciel Ouvert.....	53
4.5.2. La Mine Souterraine	54
4.6. Organigramme De L'entreprise.....	55
4.7. Parc /Carrière	57
4.8. Etude théorique et statistique.....	57
4.8.1. Camion Caterpillar 775 F	57
4.8.1.1. Etude d'heure d'arrêt par nature de panne.....	60
4.8.1.2. Etude du nombre de pannes par nature	61
4.8.2. Camion Caterpillar 775G	62
4.8.2.1. Etude d'heure d'arrêt par nature de panne.....	64
4.8.2.2. Etude nombre de pannes par nature	66
4.9. Étude des deux camions ensemble	67
4.9.1. Application de la loi de Pareto (loi des 20-80)	70
4.10. Application Ishikawa	73
4.10.1. Panne hydraulique.....	73
4.10.2. Panne pneumatique	76

4.11. Application la loi de Weibull	78
4.12. Proposition d'un programme de maintenance préventive	86
4.12.1. Maintenance préventive des systèmes hydrauliques	86
4.12.1.1. Planification des interventions de maintenance.....	86
4.12.1.2. Entretien des fluides hydrauliques.....	86
4.12.1.3. Vérification des composants hydrauliques.....	86
4.12.1.4. Lubrification et étanchéité.....	87
4.12.2. Maintenance préventive des systèmes pneumatiques.....	87
4.12.2.1. Planification des interventions	87
4.12.2.2. Entretien du circuit pneumatique.....	87
4.12.2.3. Vérification des composants pneumatiques	87
4.12.2.4. Entretien des filtres et dessiccateurs.....	87
4.13. Conclusion.....	87
Conclusion générale	90

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Pages
Figure 1.1	Les différentes formes de maintenance normalisées selon FDX60.000	7
Figure 1.2	Maintenance préventive	10
Figure 2.1	Taux de défaillance d'une entité	18
Figure 2.2	Fonction de défaillance	21
Figure 2.3	Fonction de fiabilité	22
Figure 2.4	Durées caractéristiques des indicateurs de Fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité	23
Figure2.5	Influence du paramètre de position γ sur la densité de Weibull	29

Figure 2.6	Papier de Wei bull	31
Figure 3.1	Transport continu	38
Figure 3.2	Convoyeur en caoutchouc	39
Figure 3.3	Types de camions des mines à ciel ouvert	42/41
Figure 3.4	Transport par train	43
Figure 3.5	Camion CATERPILLAR 775F, mine de Boukhadra	44
Figure 3.6	Classification générale des systèmes de transport	45
Figure 3.7	Systèmes de transport continu et par lots	46
Figure 4.1	La mine de Boukhadra	53
Figure 4.2	Le chargement dans la carrière	54
Figure 4.3	L'entrée de la mine souterraine	55
Figure 4.5	Organigramme De L'entreprise	56
Figure 4.6	Camion Caterpillar 775 F	58
Figure 4.7	Evolution du temps d'arrêt de Camion 775F	60
Figure 4.8	Evolution du nombre de pannes de Camion 775F	61
Figure 4.9	Camion Caterpillar 775 G	63
Figure 4.10	Evolution du temps d'arrêt de Camion 775G	64
Figure 4.11	Evolution du nombre de pannes de Camion 775G	66

Figure 4.12	Heures d'arrêt par nature de deux engins ensemble	68
Figure 4.13	Nombre de pannes par nature de pannes de deux engins ensemble	69
Figure 4.14	Diagramme de Pareto des deux engins ensemble	71
Figure 4.15	Diagramme de Pareto des engins	72
Figure 4.16	Diagramme d'Ishikawa (pannes hydraulique)	74
Figure 4.17	Diagramme d'Ishikawa (pannes pneumatiques)	76
Figure 4.18	Application de la loi de Weibull	79
Figure 4.19	Application la loi de Weibull	80
Figure 4.20	Diagramme de la fiabilité des deux engins pendant 05 ans	82
Figure 4.21	Diagramme de la disponibilité des deux engins pendant 05 ans	84

Liste des tableaux

N°	Titre	page
Tableau 4.1	Les engins disponibles au niveau la mine de Boukhadra	57
Tableau 4.2	Historique des pannes Camion 775F	59
Tableau 4.3	Historique du nombre des pannes du Camion 775F	59
Tableau 4.4	Historique des pannes Camion 775G	63

Tableau 4.5	Historique des nombres des pannes Camion 775G	64
Tableau 4.6	Etude d'heures d'arrêt par nature de Deux engins	67
Tableau 4.7	Etude du nombre de pannes par nature de panne des deux engins	68
Tableau 4.8	Statistique d'heures d'arrêt de l'ensemble des deux engins	70
Tableau 4.9	Statistique nombre de panne d'ensemble des engins pendant 05 ans	72
Tableau 4.10	Les paramètres de Weibull de deux engins pendant 5 ans	80/81
Tableau 4.11	La fiabilité des deux engins pendant 5 ans	81
Tableau 4.12	la disponibilité de deux engins pendant 5 ans	83

Liste des abréviations:

Abréviations
AFNOR : Association Française de normalisation
NF : Norme française
GMAO : Gestion de la maintenance assistée par ordinateur
AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité
MTBF : Temps moyen de bon fonctionnement
APR : L'analyse préliminaire des risques
ADD : Arbres de défaillances
AMDE : L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets
SDF : La sûreté de fonctionnement
FDMS : Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et la sécurité
$R(t)$: Fonction fiabilité
$f(t)$: Fonction de répartition
X : Variable aléatoire non négative
μ : le taux de réparation
$M(t)$:la maintenabilité
Do : Disponibilité opérationnelle
MDT : Mean down time
MUT : Mean up time
MTTR : Le temps technique moyen de réparation
MTL : Moyenne des temps logistiques
MTTF: Mean time to [first] failure
APD : Analyse Préliminaire des Dangers.
MAC : Méthode de l'Arbre des Causes.
MDCC : Méthode du Diagramme Causes-Conséquences
λ : Le taux de défaillance
t : le temps
e : est la base de l'exponentielle
β : Paramètre de forme
η : Paramètre d'échelle
$F(t)$: Fonction de densité
σ : l'écart type
n : le nombre total d'individus dans l'échantillon

$n(x)$: le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur x
SONAREM : société nationale de la recherche et de l'exploitation minière
γ : Paramètre de position
A : Valeur sur le tableau de Weibull
D_i : Disponibilité intrinsèque
RMAS : Reliability, Maintainability, Availability, Safety.
HYD : Hydraulique
MEC : Mécanique
ELC : Électrique



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Dans le domaine industriel, la maintenance occupe une place essentielle pour assurer la continuité de la production, améliorer la disponibilité des équipements et réduire les coûts liés aux arrêts imprévus. Avec le développement des technologies et l'augmentation des exigences de productivité, les entreprises minières accordent une importance particulière à la sûreté de fonctionnement des équipements de transport, notamment les camions miniers utilisés dans les exploitations à ciel ouvert.

Les moyens de transport représentent un élément stratégique dans les mines et les carrières, car ils assurent l'acheminement du minerai et des stériles entre les différentes zones d'exploitation. Toute défaillance de ces équipements entraîne des conséquences importantes sur la production, la sécurité et les coûts d'exploitation. Ainsi, l'étude de la fiabilité, de la disponibilité et de la maintenabilité des engins de transport devient indispensable afin d'optimiser leur performance et d'améliorer leur durée de vie.

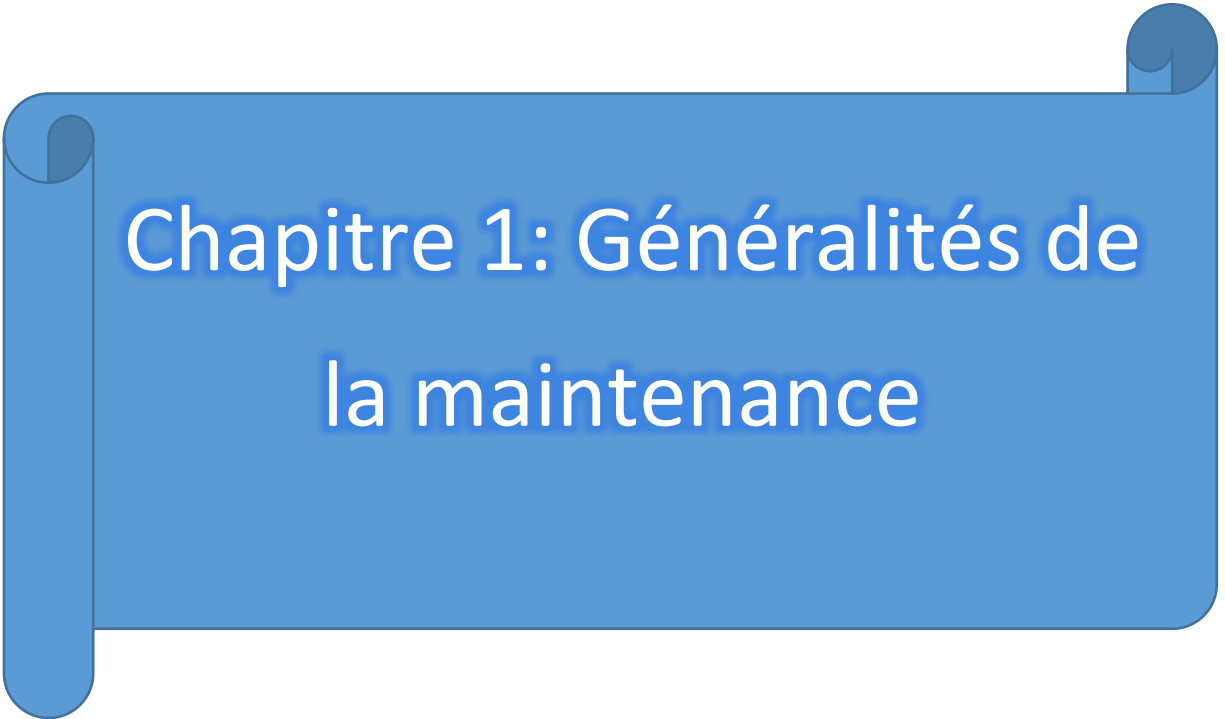
Le présent travail porte sur l'étude des concepts de sûreté de fonctionnement appliqués aux camions miniers Caterpillar 775F et 775G exploités au niveau de la mine de Boukhadra – Tébessa. Cette étude s'appuie sur l'analyse des historiques de pannes, des heures d'arrêt et des différentes défaillances enregistrées durant plusieurs années d'exploitation. Elle vise également à identifier les types de pannes les plus critiques et à proposer des solutions de maintenance adaptées afin d'améliorer la disponibilité et la fiabilité de ces équipements.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente les généralités sur la maintenance, ses types, ses objectifs et son rôle dans l'industrie.
- Le deuxième chapitre est consacré aux notions de fiabilité, de disponibilité et aux principales lois statistiques utilisées dans l'analyse des défaillances, notamment la loi de Weibull.
- Le troisième chapitre traite des généralités sur les moyens de transport dans les mines à ciel ouvert ainsi que des différents systèmes utilisés.

- Enfin, le quatrième chapitre présente l'étude de cas réalisée sur les camions Caterpillar 775F et 775G de la mine de Boukhadra, à travers l'analyse des pannes et l'évaluation des indicateurs de sûreté de fonctionnement.

À travers cette étude, nous cherchons à mettre en évidence l'importance d'une stratégie de maintenance efficace dans l'amélioration des performances des équipements miniers et dans l'optimisation de l'exploitation industrielle.

A blue scroll graphic with a vertical strip on the left and a horizontal strip on the right, both with rounded ends. The text is centered on the horizontal strip.

Chapitre 1: Généralités de la maintenance

1.1. Introduction

La fonction maintenance vise à assurer la disponibilité optimale des installations de production et de leurs équipements annexes, tout en réduisant au minimum les temps d'arrêt d'un point de vue économique. Pendant longtemps, elle a été considérée comme une fonction secondaire générant des pertes financières inévitables, souvent limitée à des opérations de dépannage et de réparation liées à l'usure et au vieillissement des équipements.

Cependant, le rôle réel de la maintenance est bien plus large : il repose sur la recherche permanente d'un équilibre entre les aspects techniques et les contraintes économiques. Il reste encore des efforts à fournir pour que son importance en tant que fonction productive soit pleinement reconnue. Ainsi, une organisation rigoureuse, une planification précise et l'application de méthodes structurées sont indispensables pour gérer efficacement les activités de maintenance.[1]

1.2. Définition de la maintenance

Selon l'AFNOR (FD X 60-000), la maintenance est définie comme l'ensemble des actions techniques, administratives et managériales réalisées tout au long du cycle de vie d'un bien, dans le but de le maintenir ou de le remettre dans un état lui permettant d'assurer la fonction requise.

Au sein d'une entreprise, maintenir signifie donc réaliser différentes opérations telles que le dépannage, la réparation, le graissage ou le contrôle. Ces interventions visent à préserver les performances du matériel afin de garantir une production efficace et de qualité.[2]

1.3. Domaines d'action de la fonction maintenance

Au sein d'une entreprise, on trouve une grande diversité d'équipements, qu'ils soient directement liés à la production ou non. Cette diversité exige des techniciens de maintenance une forte polyvalence ainsi qu'une grande capacité d'adaptation face aux différentes situations rencontrées.

Les missions du service maintenance sont variées et couvrent notamment :

- La maintenance préventive et corrective de l'ensemble des systèmes dont il a la responsabilité, incluant les opérations de révision et de contrôle.

- L'installation et la mise en service de nouveaux équipements.
- Les interventions liées aux conditions de travail telles que la sécurité, l'hygiène, l'environnement et la gestion de la pollution.
- L'amélioration, la modernisation et la reconstruction des installations existantes.
- La gestion des pièces de rechange, des outils ainsi que des moyens de transport et de manutention.
- La fabrication de certaines pièces détachées si nécessaire.
- La réalisation de travaux divers au sein des locaux (agrandissements, réaménagements, déménagements).
- La gestion des différentes sources d'énergie et des réseaux de communication.

À travers l'ensemble de ces activités, l'objectif principal demeure le maintien des équipements dans un état optimal de fonctionnement, avec une priorité accordée à l'outil de production.

Ainsi, le service maintenance doit assurer une maîtrise complète du comportement des équipements en optimisant les ressources disponibles. Cela souligne l'évolution essentielle d'une logique d'entretien traditionnel vers une approche globale et stratégique de la maintenance.[3]

1.4. Les missions de la maintenance

La fonction maintenance ne se limite plus à la simple remise en état des équipements. Elle joue désormais un rôle stratégique au service de la production. À travers ses missions, elle doit:

- Améliorer la performance et la fiabilité des équipements de production ;
- Optimiser l'interface entre la production et la maintenance, en maîtrisant et en appliquant des méthodes et outils adaptés tels que la MPT (Maintenance Productive Totale) et la GMAO ;
- Réduire le coût global des équipements sur l'ensemble de leur cycle de vie ;
- Assurer la conformité avec la réglementation en matière de sécurité ;

- Respecter la législation relative à la protection de l'environnement ;
- Contribuer à l'amélioration de la qualité des produits fabriqués ;
- Participer à la réduction des coûts de fabrication ;
- Renforcer l'image de marque et la compétitivité de l'entreprise.[4]

1.5. Types de maintenance

Malgré la diversité des appellations et des méthodes d'entretien proposées, on peut essentiellement distinguer deux grandes formes de maintenance : la maintenance curative et la maintenance préventive. Ces deux approches permettent de définir les trois types de maintenance reconnus par la norme AFNOR NF X 60-010 :

- la maintenance corrective;
- la maintenance préventive;
- La maintenance prédictive (ou prévisionnelle).

En réalité, la plupart des autres formes de maintenance ne constituent que des déclinaisons ou des sous-catégories de ces trois types fondamentaux.

Avant d'en présenter les définitions détaillées, on peut illustrer ces différentes approches par un exemple simple : l'usure et le remplacement des plaquettes de frein d'un véhicule, qui permettent de comprendre clairement les caractéristiques propres à chaque type de maintenance.[5]

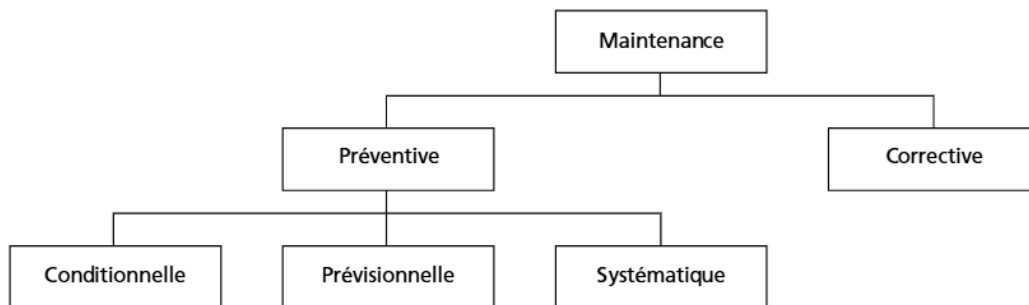


Figure 1.1: Les différentes formes de maintenance normalisées selon FDX60.000[6]

1.5.1. Maintenance préventive

La maintenance préventive consiste à intervenir sur un équipement selon des critères fixés à l'avance afin de réduire les risques de défaillance ou de détérioration des performances. Son objectif principal est d'éviter les pannes pendant l'exploitation du matériel.

Une analyse des coûts doit démontrer que cette approche est économiquement avantageuse, en comparant les dépenses engagées aux pertes et aux dommages qu'elle permet d'éviter.

La maintenance préventive a pour finalités de :

- Prolonger la durée de vie des équipements ;
- Réduire la probabilité de pannes en cours de fonctionnement ;
- Limiter les temps d'immobilisation lors des révisions ou des incidents ;
- Anticiper et planifier les interventions correctives souvent coûteuses ;
- Faciliter la prise de décision concernant la maintenance corrective dans des conditions optimales ;
- Éviter les surconsommations anormales d'énergie, de lubrifiants, etc. ;
- Maîtriser et réduire les coûts globaux de maintenance ;
- Éliminer les causes potentielles d'accidents graves.

1.5.1.1. Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique est réalisée selon un calendrier prédéfini, établi en fonction du temps (jours, mois, heures de fonctionnement) ou du nombre d'unités d'usage. La périodicité des interventions est fixée à partir de la mise en service de l'équipement ou après une révision partielle ou complète.

Cette approche suppose une bonne connaissance du comportement du matériel, notamment ses mécanismes d'usure, ses modes de dégradation ainsi que le temps moyen de bon fonctionnement entre deux pannes (MTBF).

La maintenance systématique est particulièrement adaptée dans les situations suivantes :

- Équipements soumis à une réglementation stricte en matière de sécurité ;
- Installations dont la défaillance peut entraîner des accidents graves ;
- Matériels pour lesquels le coût d'une panne est très élevé ;
- Équipements dont les frais d'exploitation deviennent anormalement importants au fil du temps.

1.5.1.2. Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle est déclenchée en fonction d'un événement prédéterminé révélant l'état de dégradation d'un équipement, tel qu'un autodiagnostic, un signal transmis par un capteur ou la mesure d'un paramètre d'usure. Elle repose donc sur l'exploitation d'informations collectées en temps réel et sur l'expérience acquise.

La surveillance continue de l'état du matériel permet de définir un seuil d'alerte avant d'atteindre le seuil critique d'admissibilité, afin d'intervenir au moment le plus opportun.

L'intérêt majeur de cette stratégie est d'exploiter les équipements au maximum de leurs capacités tout en réduisant le nombre d'interventions correctives imprévues.

La maintenance conditionnelle consiste ainsi à identifier les points sensibles ou critiques des installations, à les placer sous surveillance et à décider d'une intervention dès qu'un seuil déterminé est franchi. Les contrôles effectués restent systématiques et s'appuient généralement sur des méthodes de contrôle non destructif.

Elle se base sur des mesures pertinentes réalisées sur des équipements en fonctionnement, telles que :

- Le niveau et la qualité de l'huile ;
- Les températures et les pressions ;
- La tension et l'intensité des équipements électriques ;
- Les vibrations et les jeux mécaniques.

Parmi l'ensemble des paramètres mentionnés, l'analyse vibratoire se distingue comme la méthode la plus riche en informations. Sa maîtrise permet de prendre des décisions éclairées et pertinentes, essentielles à la mise en œuvre efficace d'une maintenance préventive conditionnelle.

La surveillance vibratoire peut être réalisée de manière périodique, à intervalles réguliers, ou en continu, grâce à des systèmes de suivi permanent de l'état des équipements.

1.5.1.3. La maintenance prédictive

La maintenance prédictive consiste à anticiper les défaillances avant qu'elles ne surviennent, en exploitant et en analysant un historique de données révélatrices de dysfonctionnements potentiels. Elle repose sur l'évaluation d'un niveau de risque à partir d'informations issues de diverses sources telles que les capteurs, les systèmes IoT ou encore la GMAO.

Son objectif principal est de prévenir la réapparition des pannes et de limiter au maximum les interruptions susceptibles de perturber le fonctionnement de l'entreprise. En anticipant les défaillances, la maintenance prédictive permet d'éviter l'apparition de pannes nécessitant des réparations souvent coûteuses.

En effet, certaines défaillances peuvent engendrer des pertes financières importantes et avoir un impact significatif sur la productivité ainsi que sur la rentabilité de l'entreprise à court et moyen terme.

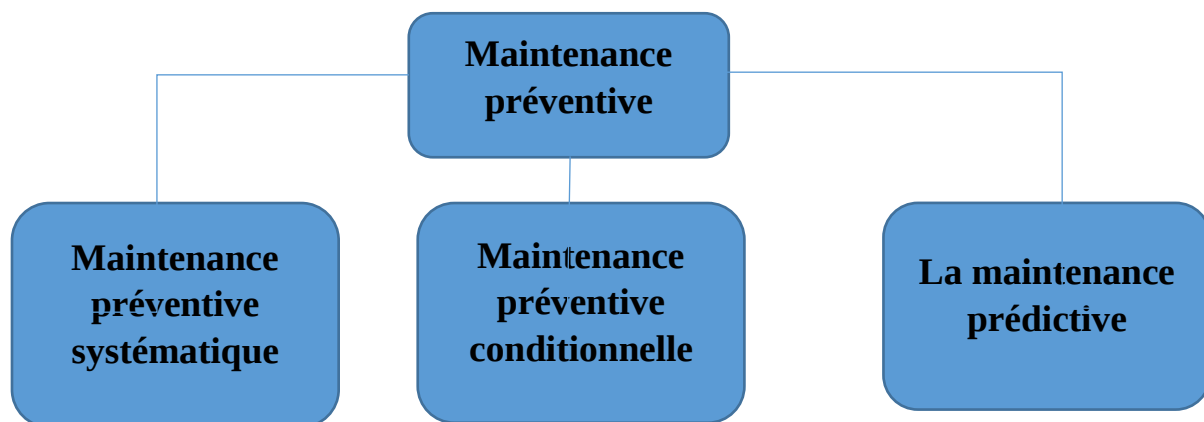


Figure 1.2 : Maintenance préventive

1.5.2. Maintenance corrective

La maintenance corrective correspond à une approche réactive consistant à intervenir après la survenue d'une défaillance, attitude typique de l'entretien traditionnel. Selon la norme AFNOR NF X 60-010, elle est définie comme une « opération de maintenance effectuée après défaillance ».

Une fois la panne constatée, le technicien de maintenance doit suivre une série d'étapes organisées de manière logique :

- Test : comparaison des mesures relevées avec des valeurs de référence ;
- Détection : identification de l'apparition d'une défaillance ;
- Localisation : recherche précise de l'élément ou du composant à l'origine du dysfonctionnement ;
- Diagnostic : analyse et détermination des causes de la défaillance ;
- Dépannage / réparation / remise en état : intervention visant à rétablir le fonctionnement normal, avec ou sans modification ;
- Contrôle : vérification du bon fonctionnement de l'équipement après l'intervention ;
- Amélioration éventuelle : mise en place d'actions pour éviter la réapparition de la panne ;
- Historique : enregistrement de l'intervention afin de constituer une base de données exploitable ultérieurement.

1.5.3. La maintenance améliorative

L'amélioration des biens d'équipement se définit comme « l'ensemble des actions techniques, administratives et organisationnelles visant à accroître la sûreté de fonctionnement d'un bien sans en modifier la fonction requise », conformément à la norme NF EN 13306.

Elle consiste donc à apporter des modifications à la conception initiale afin d'augmenter la durée de vie des composants, de favoriser leur standardisation, de réduire la consommation d'énergie ou encore d'améliorer la maintenabilité. Cette démarche constitue un atout majeur lorsqu'il s'agit de

concevoir ultérieurement un équipement assurant la même fonction avec une technologie plus moderne, en évitant ainsi la reproduction des mêmes dysfonctionnements.

La maintenance améliorative repose sur un esprit d'analyse critique et une approche créative. Tout projet d'amélioration doit s'appuyer sur une étude économique rigoureuse, garantissant sa rentabilité. Elle s'applique à l'ensemble des équipements, à l'exception de ceux en fin de vie ou proches de la réforme.

Les principaux objectifs de la maintenance améliorative sont :

- Accroître les performances de production ;
- Améliorer la fiabilité des équipements ;
- Faciliter la maintenabilité;
- Standardiser certains composants ou sous-ensembles ;
- Renforcer la sécurité des utilisateurs.[5]

1.6. Politique de maintenance

Le service maintenance est chargé d'appliquer la politique de maintenance fixée par la direction. Cette politique a pour objectif d'assurer le niveau de performance attendu des systèmes de production.

Étant donné que tous les équipements ne présentent pas le même degré d'importance dans le processus productif, le service maintenance doit, dans le cadre de la stratégie globale de l'entreprise, définir des méthodes d'intervention adaptées à chaque situation et établir des priorités précises.

Dans ce contexte, la fonction maintenance doit élaborer des prévisions à différents horizons :

1.6.1. Prévisions à long terme

Elles portent sur les investissements majeurs et les projets durables, tels que le renouvellement d'équipements ou les travaux de grande envergure. Ces prévisions sont généralement orientées par la stratégie globale de l'entreprise.

1.6.2. Prévisions à moyen terme

La maintenance doit s'intégrer au planning de production de la manière la plus discrète possible. Elle doit donc planifier et anticiper ses interventions en fonction des programmes de fabrication. De son côté, la production doit également prendre en considération les exigences liées au suivi et à l'entretien des équipements afin d'assurer une bonne coordination.

1.6.3. Prévisions à court terme

Elles concernent des périodes brèves, comme la semaine, la journée ou même quelques heures. Même pour ces interventions rapides, une préparation minimale reste indispensable afin de limiter les perturbations sur la production et d'optimiser l'efficacité des opérations.

1.7. Les objectifs de la maintenance

Les objectifs de la maintenance sont directement liés à la mission globale de l'entreprise. Ils visent à soutenir la performance, la sécurité et la rentabilité des activités de production. Parmi Ces objectives, on put citer:

- Réduire au minimum les interruptions de service et écourter la durée des pannes imprévues
- Maintenir les équipements en bon état de fonctionnement afin de garantir une exploitation sûre ;
- Optimiser le rendement et l'efficacité des installations ;
- Maîtriser et diminuer les coûts d'exploitation ;
- Assurer un niveau élevé de qualité dans les interventions de maintenance, contribuant ainsi à améliorer la qualité des produits et à prolonger la durée de vie des équipements ;
- Garantir la sécurité des personnes et la protection des biens.[7]

1.8. Le rôle de la maintenance

D'une manière générale, les services de maintenance ont pour mission d'optimiser l'outil de production et d'en améliorer la performance. Cette optimisation passe par la garantie de la qualité et de la quantité des produits, ainsi que par l'amélioration des actions de maintenance afin de réduire la fréquence des pannes.

Ils contribuent également à assurer et à maintenir la sécurité au travail, tant pour le personnel que pour les équipements, tout en participant à l'augmentation de la productivité. Cela implique une bonne maîtrise du comportement des matériels et une gestion efficace des moyens mis en œuvre afin d'atteindre les objectifs fixés.[8]

1.9. Les niveaux de la maintenance

Le degré de développement de la maintenance est classé en **cinq niveaux**. Ces niveaux sont définis par une norme à titre indicatif afin de servir de guide. Leur application pratique n'est possible que si les parties concernées s'accordent au préalable sur leur définition précise, en fonction du type d'équipement à maintenir.

1er niveau : Maintenance élémentaire

Il s'agit de réglages simples prévus par le constructeur, réalisés sans démontage ni ouverture de l'équipement. Cela comprend également le remplacement d'éléments consommables accessibles en toute sécurité (voyants, certains fusibles, etc.).

Ces interventions peuvent être effectuées par l'utilisateur sur site, sans outillage spécifique, en suivant simplement les instructions d'utilisation. Le stock de pièces nécessaires est très limité.

2ème niveau : Maintenance courante

Ce niveau concerne le dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ainsi que des opérations simples de maintenance préventive (graissage, contrôle de fonctionnement...).

Les interventions sont réalisées sur place par un technicien habilité de qualification moyenne, à l'aide d'un outillage portable défini dans les instructions de maintenance. Les pièces de rechange nécessaires sont facilement disponibles à proximité.

3ème niveau : Maintenance spécialisée

Ce niveau comprend l'identification et le diagnostic des pannes, le remplacement de composants ou d'ensembles fonctionnels, ainsi que les réparations mécaniques mineures et les opérations courantes de maintenance préventive (réglages généraux, réalignement d'appareils de mesure...). Ces travaux sont réalisés par un technicien spécialisé, sur site ou dans un atelier de maintenance, en utilisant des outils adaptés, des appareils de mesure, des bancs d'essai et l'ensemble de la documentation technique nécessaire.

4ème niveau : Maintenance lourde

Il regroupe les travaux importants de maintenance corrective ou préventive, à l'exception de la rénovation complète ou de la reconstruction.

Ce niveau inclut également le réglage des appareils de mesure et, si nécessaire, la vérification des étalons par des organismes spécialisés. Les interventions sont effectuées dans un atelier spécialisé par une équipe disposant d'un encadrement technique hautement qualifié.

5ème niveau : Rénovation ou reconstruction

Ce dernier niveau concerne la rénovation complète, la reconstruction ou les réparations majeures confiées à un atelier central ou à une entreprise extérieure.

Ces travaux sont généralement réalisés par le constructeur ou un reconstruteur, avec des moyens proches de ceux utilisés en fabrication.[8]

1.10. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les différentes approches de la maintenance. Il est essentiel de maîtriser les paramètres et les mécanismes associés afin de mettre en place un système de maintenance à la fois performant et rentable. Par la suite, nous avons décrit le système de gestion de la maintenance en mettant en évidence ses dimensions préventive et corrective. Enfin, nous avons établi une classification de ce système et précisé sa place au sein du système de production

Chapitre 02

Lois et caractéristiques de la fiabilité

Chapitre 2 : Lois et caractéristiques de la fiabilité

2.1. Introduction

La fiabilité est une notion fondamentale dans l'étude des systèmes techniques et industriels. Elle permet de caractériser la capacité d'un dispositif à fonctionner correctement sans défaillance pendant une durée donnée et dans des conditions d'utilisation spécifiques.

L'analyse de la fiabilité repose sur des outils mathématiques et statistiques qui permettent de modéliser le comportement des systèmes face aux pannes. Elle joue un rôle essentiel dans l'amélioration de la qualité, la sécurité et la performance des équipements industriels.

Ainsi, l'étude de la fiabilité est devenue indispensable dans plusieurs domaines comme l'ingénierie, l'industrie et les systèmes de production afin d'assurer une meilleure disponibilité des installations et de réduire les coûts de maintenance.[9]

2.2. Notions générales de défaillance

Dans le langage courant, plusieurs termes sont utilisés comme synonymes, bien qu'ils ne soient pas normalisés, tels que : *Failure* (en anglais), dysfonctionnement, dommage, anomalie, avarie, incident ou défaut. Lorsqu'une défaillance se produit de manière progressive, on parle alors de dégradation.

Ainsi, la défaillance représente le passage d'un état de fonctionnement normal à un état de panne, tandis que la panne désigne cet état lui-même.

On distingue également plusieurs notions associées :

- **Cause de défaillance** : ensemble des facteurs liés à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation ou à la maintenance ayant provoqué la défaillance.
- **Mécanisme de défaillance** : ensemble des phénomènes physiques, chimiques ou autres qui engendrent la défaillance.
- **Mode de défaillance** : manière dont la défaillance se manifeste ou se traduit.

- **Panne** : situation dans laquelle un équipement ne peut plus assurer la fonction demandée.
- **Dégradation** : détérioration progressive et irréversible des performances d'un bien, généralement liée au temps ou à son utilisation.

Une défaillance peut aussi être définie selon le moment de son apparition dans le cycle de vie d'un système.

- Elle est dite **précoce** lorsqu'elle survient au début, durant la phase de déverminage.
- Elle est **aléatoire** lorsqu'elle apparaît pendant la période normale d'utilisation.
- Elle est liée à l'**usure** lorsqu'elle se manifeste en fin de vie, à cause de phénomènes comme la détérioration, la corrosion ou l'échauffement. [10]

Ces différentes situations sont généralement représentées par un graphique

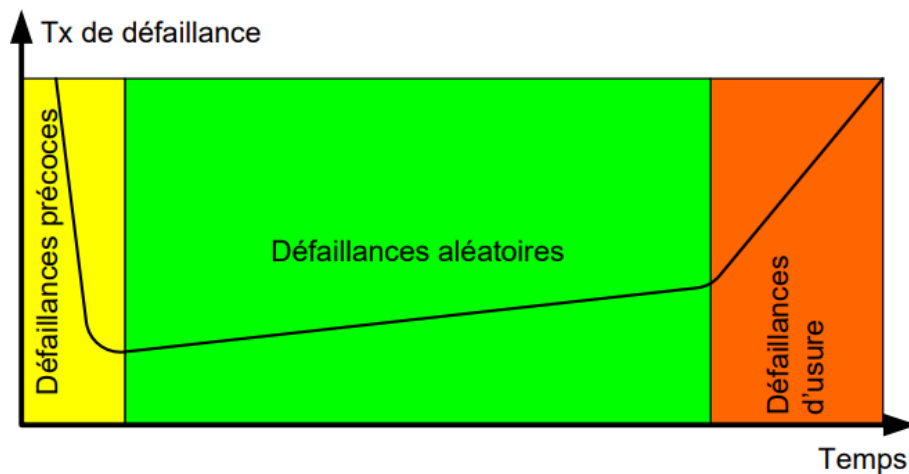


Figure 2.1 : Taux de défaillance d'une entité[11]

2.3. Notions de sûreté de fonctionnement (SDF)

Les attributs de la sûreté de fonctionnement (SDF) sont souvent regroupés sous l'acronyme FDMS : Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité et Sécurité (RAMSS en anglais : Reliability, Availability, Maintainability, Safety & Security).

✓ **Disponibilité (Availability)**

La disponibilité désigne la capacité d'un système à être opérationnel et apte à assurer la fonction demandée, dans des conditions spécifiques, à un moment précis ou sur une période déterminée. Elle correspond donc à l'état de préparation du système à fournir le service attendu.

✓ **Fiabilité (Reliability)**

La fiabilité correspond à la capacité d'un système à assurer la fonction attendue, dans des conditions déterminées, pendant une durée donnée. Elle traduit la continuité de fonctionnement sans défaillance.

✓ **Sécurité / Innocuité (Safety)**

La sécurité, ou innocuité, désigne l'aptitude d'un système à ne pas engendrer d'événements dangereux dans des conditions définies. Elle reflète sa capacité à éviter les accidents graves ou les conséquences catastrophiques.

✓ **Maintenabilité (Maintainability)**

La maintenabilité représente la capacité d'un système à être entretenu, réparé ou remis en état de fonctionnement dans un délai donné, afin de retrouver sa capacité à assurer la fonction requise. Elle exprime la facilité et la rapidité des interventions de maintenance.[12]

2.3.1. Définition de la fiabilité

Selon la norme NF X06-501 de l'AFNOR, la fiabilité est définie comme une caractéristique essentielle d'un dispositif, qui s'exprime par la probabilité que celui-ci soit capable d'accomplir correctement une fonction requise. Cette aptitude doit être assurée dans des conditions d'utilisation bien déterminées, c'est-à-dire dans un environnement et selon des contraintes précises, tout en respectant une durée de fonctionnement donnée. Ainsi, la fiabilité traduit le niveau de confiance que l'on peut accorder à un système pour fonctionner sans défaillance pendant une période spécifiée, en tenant compte des conditions réelles d'exploitation.[13]

2.3.1.1. Les types de fiabilité

- **Fiabilité estimée** : il s'agit de la fiabilité d'un produit évaluée à partir des résultats obtenus lors d'une série d'essais déterminée et réalisée dans des conditions spécifiques.
- **Fiabilité prédite** : il s'agit de la fiabilité estimée à l'aide d'un modèle mathématique basé sur des données réelles (issues d'essais ou d'expériences passées) ou sur des valeurs prévisionnelles calculées.
- **Fiabilité opérationnelle** : elle correspond à la fiabilité observée d'un produit lorsqu'il fonctionne dans des conditions normales d'exploitation et d'utilisation réelle.
- **Fiabilité intrinsèque** : elle dépend des caractéristiques internes du système, notamment de la fiabilité de ses composants, de la qualité de la conception (projet) et du niveau de maîtrise lors de la réalisation technique.[14]

2.3.1.2. Les Caractéristiques de la fiabilité

Ce paragraphe regroupe un ensemble des principaux éléments à caractère probabiliste qui servent à évaluer et à quantifier la fiabilité d'un système ou d'un dispositif. Ces éléments permettent d'analyser, de mesurer et de prévoir le comportement du système face aux défaillances au cours du temps, en s'appuyant sur des outils et des méthodes issus des probabilités et des statistiques.

- **Durée de vie**

La durée de vie désigne l'intervalle de temps compris entre la mise en service d'un dispositif et l'apparition de sa défaillance. Elle est modélisée par une variable aléatoire T , représentant le temps écoulé depuis le démarrage (fixé à $(t = 0)$) jusqu'à la panne. Cette variable est continue, positive, et définie sur $\mathbb{R}^+$. Sa répartition est décrite par une densité de probabilité notée f , qui permet d'analyser le comportement du système au cours du temps.

- **Fonction de défaillance et fonction de fiabilité**

- **Fonction de défaillance**

La fonction de défaillance, appelée également fonction de répartition, exprime la probabilité qu'au moins une panne survienne avant ou au temps t , représentant ainsi la probabilité cumulée de défaillance jusqu'à cet instant. Elle est notée $F(t)$ et définie pour tout ($t \geq 0$) comme la probabilité que le temps de défaillance soit inférieur ou égal à (t). Cette fonction permet donc de décrire l'évolution du risque de panne d'un système au cours du temps. Notée par $F(t)$, définie pour tout $t \geq 0$ par :

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (2-1)$$

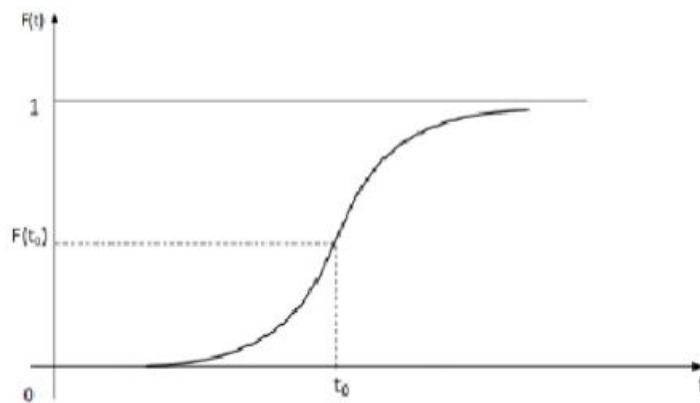


Figure 2.2: Fonction de défaillance [15]

La Figure ci-dessous présente une allure de la fonction de répartition $F(t)$ en fonction du temps.

- **Fonction de fiabilité**

La fonction de fiabilité, notée $R(t)$, représente la probabilité qu'un système ou un équipement fonctionne correctement, sans subir de défaillance, pendant une durée de temps t donnée. Définie pour tout $t \geq 0$ par :

$$R(t) = P(T > t) \quad (2-2)$$

$$= 1 - P(T \leq t)$$

$$= 1 - F(t)$$

On a évidemment :

$$\begin{aligned}
 R'(t) &= [1 - F(t)]' & (2-3) \\
 &= -F'(t) \\
 &= -f(t)
 \end{aligned}$$

Donc $R(t)$ est une fonction monotone décroissante du tell manière que si $t_1 < t_2$ $R(t_1) > R(t_2)$

$$\begin{cases} R(0) = 1 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0 \end{cases} \quad (2-4)$$

Cela reflète le principe naturel selon lequel la performance d'un système à fonctionner correctement s'altère progressivement avec le temps.

De manière générale, la fonction de fiabilité est une fonction décroissante. la forme suivante :

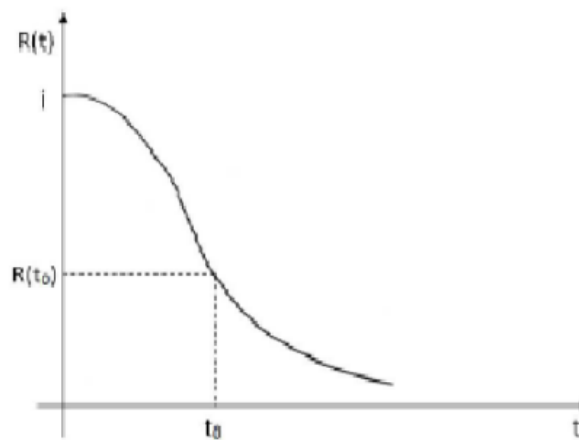


Figure 2.3: Fonction de fiabilité [15]

Remarque

Les fonctions de défaillance $F(t)$ et de fiabilité $R(t)$ peuvent être déterminées à partir de la fonction de densité de probabilité $f(t)$. Elles sont liées à cette dernière par des relations mathématiques qui permettent d'exprimer leur évolution en fonction du temps.

$$F(t) = \int_0^t f(u) du \quad (2-5)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u) du = \int_t^{\infty} f(u) du. \quad [16]$$

- **Les indicateurs de fiabilité**

La fiabilité d'un équipement, notée $R(t)$, est la probabilité qu'il fonctionne correctement sans panne pendant une durée donnée t . Cette valeur est comprise entre 0 et 1.

- **$\lambda(t)$** : Taux de défaillance. Pendant la durée de vie utile, il est généralement constant et noté λ_0 . Son inverse correspond au MTBF.

- **MTBF (Mean Time Between Failures)** : Temps moyen de fonctionnement entre deux pannes (heures). → Temps de disponibilité.

- **MTTR (Mean Time To Repair)** : Durée moyenne de réparation (heures). → Temps d'indisponibilité.

- **MDT (Mean Down Time)** : Temps moyen total d'arrêt ou d'indisponibilité du système.

- **MUT (Mean Up Time)** : Temps moyen de fonctionnement effectif du système.

- **MTTF (Mean Time To Failure)** : Temps moyen avant la première défaillance. Pour un système non réparable : $MTTF = MTBF$.

- **Facteur de disponibilité** : Mesure la capacité d'un équipement à être opérationnel à un instant Donné .[17]

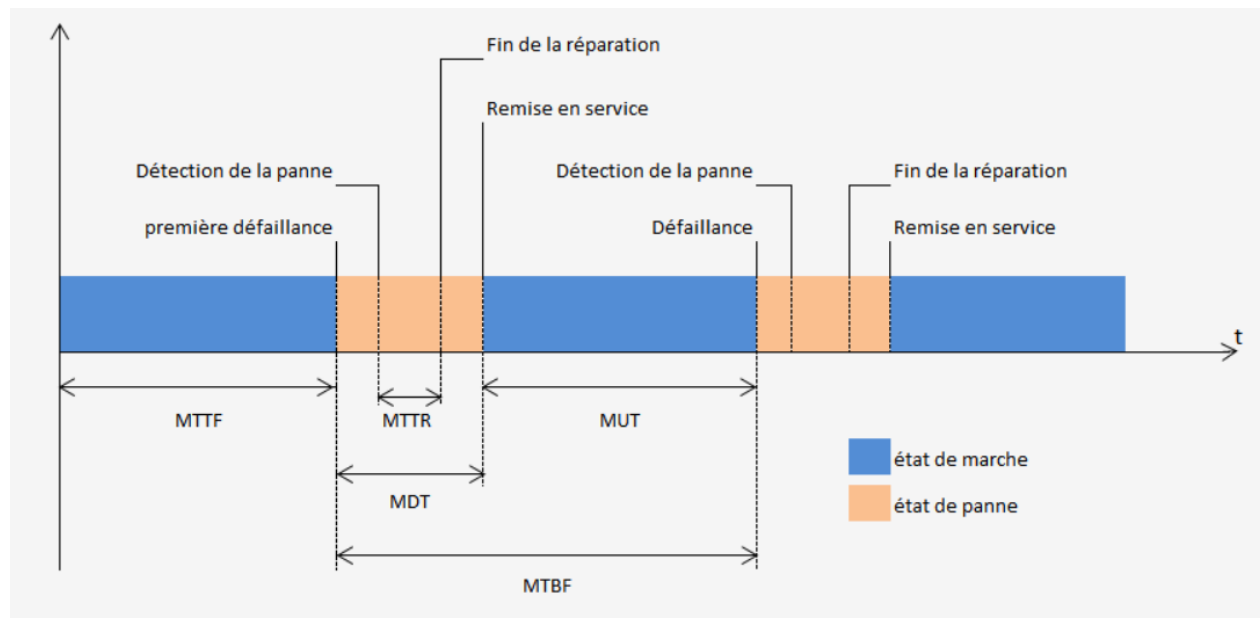


Figure 2.4 : Durées caractéristiques des indicateurs de Fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité[18]

2.3.2. La disponibilité

La disponibilité représente la probabilité qu'un système ou un composant soit en état de fonctionner à un instant donné. Elle reflète sa capacité à assurer la fonction attendue au moment opportun.

Elle s'exprime généralement par la relation :

Disponibilité = MTBF / (MTBF + MTTR),

où le MTBF correspond au temps moyen entre deux pannes et le MTTR au temps moyen de réparation.

Ainsi, plus les pannes sont rares et les réparations rapides, plus la disponibilité est élevée. Ce critère est essentiel pour les systèmes nécessitant un fonctionnement continu, comme les services numériques ou les infrastructures critiques.

2.3.2.1. Les types de disponibilité

✓ Mesure de la disponibilité:

La disponibilité d'un système peut être analysée selon plusieurs approches, en fonction du contexte étudié :

- Lorsqu'on considère une durée déterminée, on parle de disponibilité moyenne, qui donne une vision globale des performances du système.
- Si l'analyse est faite à un instant précis, on obtient la disponibilité instantanée.
- Lorsque le temps devient très grand ($t \rightarrow \infty$), la disponibilité atteint une valeur limite appelée disponibilité asymptotique.

La disponibilité s'exprime par la relation suivante :

$$D_0 = \frac{TCBF}{TCBF + TCI} \quad (2-6)$$

Où :

- TCBF : désigne le temps total de fonctionnement cumulé,
- TCI : représente le temps total d'arrêt cumulé.

Remarque

Le temps d'indisponibilité comprend non seulement les temps de réparation, mais aussi les délais logistiques (approvisionnement, transport, organisation, etc.).

En se basant sur des valeurs moyennes, on peut écrire la disponibilité moyenne sous la forme suivante :

$$D = \frac{TMD}{TMD+TMI} \quad (2-7)$$

Avec :

- TMD : Temps Moyen de Disponibilité (appelé en anglais MUT – Mean Up Time),
- TMI : Temps Moyen d'Indisponibilité (appelé en anglais MDT – Mean Down Time).

✓ Disponibilité intrinsèque D_i

La disponibilité intrinsèque caractérise les performances propres du système. Elle ne prend pas en considération les contraintes externes, notamment le manque de moyens de maintenance ou de ressources.

Elle s'exprime par la relation suivante :

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (2-8)$$

Où :

- **MTBF** : moyenne des temps de bon fonctionnement.
- **MTTR** : moyenne des temps de réparation.

✓ Disponibilité opérationnelle D_0

La disponibilité opérationnelle prend en compte, en plus des temps de fonctionnement et de réparation, les délais d'attente liés à l'organisation de la maintenance (logistique, disponibilité des pièces, intervention, etc.).

Elle est donnée par la relation suivante :

$$D_0 = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR+MTTA} \quad (2-9)$$

Où :

- **MTBF** : moyenne des temps de bon fonctionnement.
- **MTTR** : moyenne des temps de réparation.
- **MTTA** : moyenne des temps d'attente avant intervention .[19]

2.3.2.2. Les facteurs influençant la disponibilité

La disponibilité d'un équipement dépend principalement de plusieurs facteurs, notamment le type d'arrêts et les conditions d'utilisation.

On distingue deux types d'arrêts :

- **Les arrêts planifiés** : ce sont des interruptions programmées pour assurer la maintenance préventive. Ils permettent de réduire les pannes imprévues et d'améliorer la fiabilité du système.
- **Les arrêts non planifiés** : ce sont des arrêts imprévus dus à des défaillances. Ils relèvent de la maintenance corrective et ont un impact négatif direct sur la disponibilité.

En outre, la disponibilité est influencée par les conditions d'exploitation (fréquence et intensité d'utilisation) ainsi que par les conditions environnementales (température, humidité, poussière). Ces facteurs peuvent accélérer l'usure des équipements et augmenter la probabilité de pannes.[11]

2.3.3. La maintenabilité

Dans les conditions d'utilisation données pour lesquelles il a été conçu, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits.[18]

La norme établit trois formes de maintenabilité :

- **La maintenabilité intrinsèque** : elle dépend des choix effectués dès la conception du bien.
- **La maintenabilité extrinsèque** : elle est influencée par l'environnement dans lequel le bien est installé.
- **La maintenabilité opérationnelle** : elle résulte des conditions réelles d'utilisation et de maintenance, incluant notamment les moyens logistiques disponibles.[20]

2.4. Les lois usuelles en fiabilité

2.4.1. Lois discrètes

2.4.1.1. Loi de Bernoulli

2.4.1.1.1. Définition

Soit p un nombre réel tel que $0 < p < 1$, et X une variable aléatoire réelle.

On dit que X suit une loi de Bernoulli de paramètre p (notée $X \rightarrow B(p)$) si elle ne prend que deux valeurs possibles : 0 et 1, avec :

$$P(X=1) = p \quad (2-10)$$

$$P(X=0) = 1 - p \quad (2-11)$$

Remarque

La loi de Bernoulli sert à modéliser une expérience aléatoire ayant uniquement **deux issues** :

- 1 représente le **succès**
- 0 représente l'**échec**

Ainsi, le paramètre p correspond à la **probabilité de succès**.

2.4.1.1.3. Propriété

Si $X \rightarrow B(p)$, alors

- **Fonction de probabilité**

$$P(X = k) = \begin{cases} p^k (1-p)^{1-k} & \text{si } k \in \{0,1\} \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (2-12)$$

- **Caractéristiques**

$$E(X) = p, \text{ Var}(X) = p(1-p) \text{ et } \sigma_x = \sqrt{p(1-p)} \quad (2-13)$$

2.4.2. Lois continues

2.4.2.1. Loi exponentielle

2.4.2.1.1. Définition

Soit $\lambda > 0$. Une variable aléatoire réelle X est dite suivre une loi exponentielle de paramètre λ , notée $X \rightarrow E(\lambda)$, si elle admet pour densité de probabilité :

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{pour } x \in [0, +\infty[$$

$$\text{Et } f(x) = 0 \quad \text{si } x < 0.$$

2.4.2.1.2. Proposition

Si $X \rightarrow E(\lambda)$, alors ses caractéristiques sont données par :

$$E(X) = \frac{1}{\lambda}, \text{ Var}(X) = \frac{1}{\lambda^2} \text{ et } \sigma_x = \frac{1}{\lambda} \quad (2-14)$$

Cette loi est couramment utilisée pour modéliser le temps d'attente avant la survenue d'un événement aléatoire.[21]

2.4.2.2. Loi de Weibull

En fiabilité, de nombreux phénomènes peuvent être modélisés par la **loi de Weibull**.

La fonction de fiabilité s'écrit :

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (2-15)$$

Le taux de défaillance (ou fonction de risque) est donné par :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2-16)$$

La densité de probabilité s'exprime par :

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (2-17)$$

Lorsque :

- $\gamma = 0$
- $\beta = 1$

La loi de Wei bull devient une loi exponentielle, avec :

$$\eta = \frac{1}{\lambda} \quad (2-18)$$

Le paramètre γ représente l'origine des temps :

- $\gamma = 0$: le début de l'essai correspond exactement au début d'utilisation
- $\gamma < 0$: certaines défaillances ont déjà eu lieu avant le début de l'essai
- $\gamma > 0$: aucune défaillance n'a encore eu lieu au début de l'essai

Lorsque $\gamma \neq 0$, on effectue un changement d'origine des temps.[22]

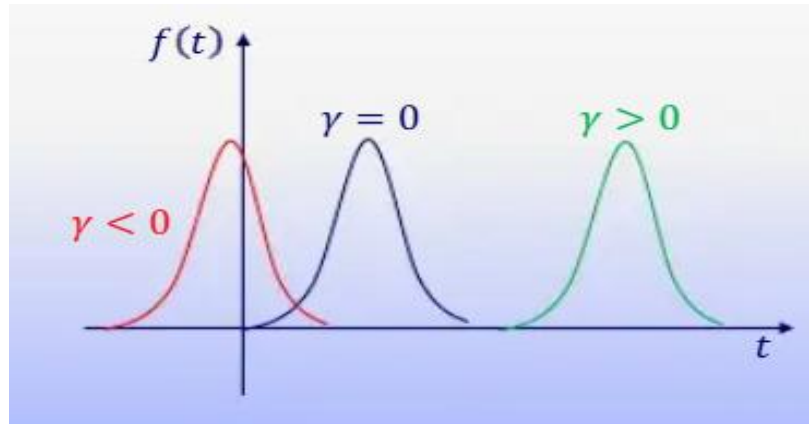


Figure2.5 : Influence du paramètre de position γ sur la densité de Weibull[22]

2.5. Approche de la fiabilité par les probabilités

2.5.1. Définition de la fiabilité (NF X 06-501)

La fiabilité désigne l'aptitude d'un équipement à assurer correctement une fonction donnée, dans des conditions précises d'utilisation, durant un intervalle de temps défini. Cette aptitude est mesurée par une probabilité.

2.5.2. Le papier de Weibull

Permet de déterminer graphiquement les paramètres d'une loi de Weibull lorsque le paramètre γ est nul.

En effet, la fonction de répartition correspondant à une loi de Weibull de paramètres β , $\gamma = 0$ et η est donnée par :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.19)$$

Le paramètre η se lit directement au point d'intersection de la droite obtenue avec l'axe des abscisses, celui-ci étant gradué selon une échelle logarithmique.[23]

2.5.3. Échelles utilisées sur le papier de Weibull

- **Abscisse supérieure** : échelle naturelle de X .
- **Abscisse intermédiaire** : échelle logarithmique, utilisée pour la lecture du paramètre t .
- **Abscisse inférieure** : échelle logarithmique, où à chaque valeur de t correspond son logarithme népérien $\ln t$.
- **Ordonnée gauche** : les valeurs de $F(t)$, exprimées en pourcentage, sont reportées selon l'échelle $[-\ln(1-F(t))]$.
- **Ordonnée sur l'axe $X = -1$** : (utilisée pour la lecture du paramètre) : elle représente les valeurs de $\ln[-\ln(1-F(t))]$. [23]

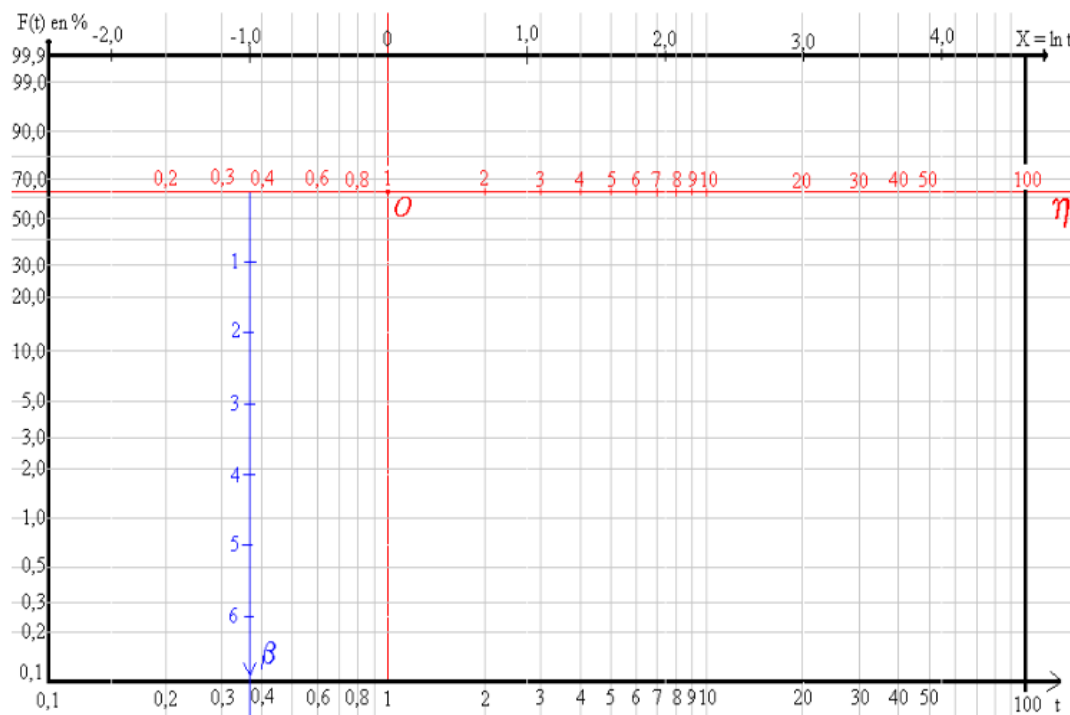


Figure 2.6 : Papier de Weibull [23]

2.5.4. Probabilité

La probabilité représente le rapport entre le nombre de résultats favorables et le nombre total de résultats possibles (valeur comprise entre 0 et 1).

On définit :

- **R(t)** : probabilité que le système fonctionne sans panne à l'instant t .
- **F(t)** : probabilité de défaillance à l'instant t , telle que :

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2-19)$$

Donc :

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2-20)$$

2.5.5. Fonction requise

La fonction requise correspond à la mission que doit accomplir le dispositif.

Elle suppose un niveau minimal de performance en dessous duquel le système est considéré comme défaillant.

2.5.6. Conditions d'utilisation

La fiabilité dépend fortement du contexte d'utilisation, incluant :

- L'environnement (température, humidité...),
- Les contraintes mécaniques,
- Les effets chimiques ou physiques.

Ainsi, un même équipement peut présenter des niveaux de fiabilité différents selon les conditions d'exploitation.

2.5.7. Durée de fonctionnement

La fiabilité est toujours évaluée sur une période donnée appelée durée de mission.

Par exemple, on peut fixer une exigence telle que :

$$R(T_m) \geq 0,9 \text{ pour une durée de } 8000 \text{ heures}$$

Chaque instant de cette période est associé à une valeur de fiabilité $R(t)$. [24]

2.6. Conclusion

La fiabilité constitue un élément essentiel dans l'étude et la conception des systèmes techniques. Elle permet d'évaluer la capacité d'un dispositif à fonctionner correctement pendant une durée donnée, dans des conditions spécifiques. À travers l'analyse des lois de probabilité (comme la loi exponentielle ou la loi de Weibull), il est possible de modéliser le comportement des systèmes face aux défaillances et de prévoir leur durée de vie.

Ainsi, la maîtrise de la fiabilité contribue à améliorer la performance, la sécurité et la disponibilité des équipements, tout en réduisant les coûts de maintenance. Elle représente donc un outil indispensable pour optimiser la qualité et assurer la continuité de service dans les domaines industriels. [25]



Chapitre 3

Généralités sur les moyens de transport dans les carrières

Chapitre 3 : Généralités sur les moyens de transport dans les carrières

3.1. Introduction

Le transport dans une carrière ou une mine à ciel ouvert constitue l'un des processus essentiels de l'exploitation minière, car il a une influence directe sur le coût de revient des substances minérales utiles. Les dépenses liées au transport dépendent principalement des paramètres suivants :

- Le mode d'ouverture du gisement ;
- La méthode d'exploitation adoptée ;
- Le mode de mise en terril.

Le transport assure la liaison entre le point de chargement et le point de déchargement des matériaux extraits, qu'il s'agisse du stérile ou du minerai. Les stériles sont généralement acheminés vers les terrils, tandis que le minerai est transporté vers les stocks de stockage ou vers la trémie de réception de l'usine de traitement.

D'une manière générale, on distingue plusieurs types et modes de transport. Celui-ci peut être réalisé soit par une même voie, appelé transport de type concentré, soit par des voies distinctes, appelé transport de type séparé.

Le mode de transport détermine les caractéristiques de fonctionnement des principaux moyens utilisés. On distingue ainsi:

- **Les transports continus** : tels que les convoyeurs à bande et les transports hydrauliques ;

Les transports discontinus : tels que les locomotives avec wagons, les tombereaux (camions) rigides ou articulés, ainsi que les grues à câble.[26]

3.2. Définition d'une mine à ciel ouvert :

Au cours de la réalisation des travaux miniers dans l'écorce terrestre, il se forme des excavations ouvertes présentant des contours en communication directe avec la surface du sol.

L'ensemble de ces excavations, aménagées pour l'extraction d'un gisement minéral, est désigné sous le terme de **mine à ciel ouvert**.

Remarque :

- **Mine à ciel ouvert** : espace ouvert destiné à l'exploitation de gisements miniers tels que le minerai de fer, le phosphate, ou d'autres minerais métalliques.

Carrière : excavation à ciel ouvert utilisée pour l'extraction de substances utiles comme le sable, le gypse, le calcaire, l'argile ou le marbre .[27]

3.3. Choix des moyens de transport :

Afin d'assurer le déplacement des matériaux d'un point à un autre dans les meilleures conditions économiques et avec l'équipement le plus approprié, il est indispensable de bien connaître les capacités des différents moyens de transport ainsi que leurs domaines d'utilisation les plus rentables.

Ce choix nécessite également la prise en compte de plusieurs éléments essentiels, notamment :

- La méthode ou la technologie d'exploitation adoptée ;
- Les quantités de matériaux à extraire ainsi que les distances de transport ;
- Les conditions économiques de l'exploitation, telles que le taux de découverte ;
- Les contraintes liées à l'environnement ;
- La valeur commerciale des substances minérales exploitées.

Le choix du système de transport repose principalement sur plusieurs facteurs, parmi lesquels :

- Le niveau de production de la carrière ;
- La distance entre les points de chargement et de déchargement ;
- Le type d'équipement utilisé pour le chargement ;
- Les propriétés physiques des matériaux à transporter ;

- Les conditions géologiques du gisement ;
- les dimensions et la configuration de la carrière.[28]

3.3.1. Transport continu (les convoyeurs à bande) :

Le convoyeur à bande est un moyen de transport continu largement utilisé dans les carrières et les mines à ciel ouvert. La bande en caoutchouc assure à la fois le support et la traction des matériaux, tout en se déplaçant sur des tambours et des rouleaux spéciaux. Ces convoyeurs peuvent être fixes ou mobiles selon les conditions d'exploitation.

Le fonctionnement du convoyeur repose sur un tambour moteur qui transmet le mouvement à la bande, tandis qu'un dispositif de tension assure son bon réglage. La bande peut être plate ou incurvée afin d'augmenter la quantité de matériaux transportés.

Les convoyeurs à bande se distinguent par leur grande capacité de transport sur de longues distances et par leur rendement élevé, qui peut atteindre 16 000 tonnes par heure. Ils permettent également de travailler sur des pentes pouvant atteindre 18°, voire davantage pour certains modèles spéciaux.

Principaux avantages:

- fonctionnement continu;
- productivité élevée;
- Réduction du coût de transport à long terme.

Principaux inconvénients:

- coût initial d'installation élevé;
- Nécessité d'un tracé presque rectiligne ;
- Usure progressive de la bande et des rouleaux.

Ce système est principalement utilisé pour le transport du charbon, du calcaire et des roches abattues dans les mines à ciel ouvert et souterraines.[29]



Figure 3.1: Transport continu[30]

3.3.1.1. Types de convoyeurs miniers :

3.3.1.1.1. Convoyeur en caoutchouc :

Les convoyeurs en caoutchouc sont largement utilisés dans l'industrie minière pour le transport des minerais sur de longues distances. Ils se caractérisent par leur résistance à l'usure, aux chocs et aux conditions difficiles comme la chaleur et la corrosion. Leur élasticité permet également de réduire le bruit et de limiter la dégradation du minerai pendant le transport.

Ils offrent aussi une meilleure efficacité énergétique grâce à la réduction des frottements et facilitent les opérations de maintenance. Toutefois, leur principal inconvénient reste leur coût initial relativement élevé, surtout pour les installations de grande dimension.[30]



Figure 3.2: Convoyeur en caoutchouc[30]

3.3.1.1.2. Le convoyeur navette :

Le convoyeur navette est un système mobile fonctionnant dans les deux sens, utilisé dans les mines pour desservir plusieurs points de déchargement. Il offre une grande flexibilité et facilite la distribution des matériaux sur des terrains complexes.

Cependant, son coût d'installation est élevé et son usure mécanique est plus importante, ce qui augmente les besoins de maintenance.[30]

3.3.1.1.3. Le convoyeur principal :

Le convoyeur principal assure le transport du minerai entre la mine et l'usine de traitement sur de longues distances. Il se distingue par sa grande capacité, sa stabilité et son fonctionnement continu.

Cependant, son exposition prolongée aux conditions difficiles provoque une usure importante, et sa maintenance reste coûteuse en raison de sa structure complexe.[30]

3.3.1.1.4. L'élévateur à godets :

L'élévateur à godets est un équipement de transport vertical utilisé dans les mines pour déplacer le minerai vers des niveaux supérieurs. Il permet de mieux utiliser l'espace disponible et de réduire le travail manuel.

Cependant, il ne convient pas au transport horizontal et nécessite un entretien fréquent à cause de l'usure des godets.[30]

3.3.1.1.5. Le convoyeur à raclettes :

Le convoyeur à raclettes est utilisé dans les mines souterraines pour transporter le minerai dans des espaces étroits. Il se caractérise par sa robustesse, sa capacité de charge élevée et son fonctionnement continu.

Cependant, il est surtout adapté aux espaces réduits et aux courtes distances, tout en restant essentiel pour assurer la continuité de la production[30]

3.3.1.1.6. Le convoyeur à rouleaux :

Le convoyeur à rouleaux sert au transport de minerais légers sur de courtes distances. Il est simple, économique et adapté aux opérations de tri.

Cependant, sa faible capacité de charge limite son utilisation pour les minerais lourds.[30]

3.3.1.1.7. Le convoyeur de transfert :

Le convoyeur de transfert sert à relier différents systèmes de convoyage et à assurer un flux continu du minerai dans les mines, améliorant ainsi l'efficacité de la production.

Cependant, il est coûteux et nécessite une maintenance fréquente en raison de l'usure rapide de ses composants.[30]

3.3.2. Transport discontinu :

3.3.2.1. Le transport par camion :

Le transport par camion constitue aujourd'hui le moyen de transport le plus utilisé dans les carrières modernes. Son emploi est particulièrement adapté aux exploitations minières où les conditions géologiques sont complexes et où les zones de travail évoluent régulièrement. Grâce à sa grande souplesse d'utilisation, il permet d'assurer le déplacement des matériaux entre les fronts d'abattage, les zones de stockage et les installations de traitement.

Ce mode de transport est considéré comme rationnel lors de l'exploitation de gisements à structure irrégulière, car il s'adapte facilement aux changements de configuration du chantier. Il est également très utilisé pendant les phases de construction et d'approfondissement des carrières, où les distances de transport et les niveaux d'exploitation varient continuellement.

Par ailleurs, le camion joue un rôle important dans l'exploitation sélective, puisqu'il permet de séparer différentes catégories de matériaux, comme le minerai et les stériles, afin de les acheminer vers des destinations distinctes. Cette flexibilité fait du transport par camion une solution efficace pour répondre aux exigences techniques et économiques des carrières contemporaines[31]



Figure 3.3: Types de camions des mines à ciel ouvert[26]

3.3.2.2. Transport par train :

Le transport par train est un moyen de déplacement utilisé pour acheminer le minerai depuis les stocks de la fabrique ainsi que depuis les installations ferroviaires jusqu'au port minier de Conakry. Ce mode de transport joue un rôle essentiel dans la chaîne logistique minière, notamment pour l'exportation des produits extraits.

Le système ferroviaire utilisé est composé de 3 locomotives assurant la traction et de 44 wagons destinés au chargement du minerai. Chaque wagon possède une capacité de transport d'environ 71 tonnes, ce qui permet d'assurer un volume important de transport à chaque rotation.

Grâce à cette organisation, le transport par train permet une évacuation efficace et continue du minerai sur de longues distances, tout en réduisant les coûts et en augmentant la productivité globale de l'exploitation minière.[32]



Figure 3.4. Transport par train[33]

3.4. Mode de transport utilisés à Boukhadra :

Le transport par camion constitue l'un des moyens les plus utilisés dans l'exploitation des carrières à faible et moyenne productivité. En Algérie, ce mode de transport est largement répandu en raison de sa flexibilité et de sa capacité à s'adapter aux conditions complexes des gisements, notamment lors de l'approfondissement des exploitations ou dans le cas de l'extraction sélective.

La capacité de chargement des camions varie généralement entre 5 et 120 tonnes. Toutefois, dans les pays industrialisés, des efforts de recherche et de développement sont en cours afin

d'augmenter cette capacité jusqu'à 200 tonnes, dans le but d'améliorer le rendement et de réduire les coûts d'exploitation.

En termes de performance, les camions chargés peuvent franchir des pentes atteignant 10 % tout en maintenant une vitesse relativement élevée. Lorsqu'ils sont à vide, ils peuvent gravir des pentes allant jusqu'à 15 %. Le rayon de braquage des camions se situe généralement entre 12 et 22 mètres, ce qui leur permet une bonne manœuvrabilité dans les zones d'exploitation.

Enfin, le rendement de l'excavateur dépend en grande partie du type de camion utilisé ainsi que de la régularité de sa rotation (cycle de chargement et de transport), ce qui influence directement l'efficacité globale des opérations minières.[33]



Figure 3.5 : Camion Caterpillar 775F, mine de Boukhadra[33]

3.5. Domaine d'utilisation du transport par camion :

Le transport par camion est largement utilisé pour le déplacement des matériaux dans les carrières, en raison de sa flexibilité et de sa facilité d'adaptation aux différentes conditions d'exploitation. Son utilisation est particulièrement recommandée dans les cas suivants:

- Dans les carrières à faible ou moyenne production, généralement comprise entre $(2 \text{ à } 10) \times 10^6$ tonnes par an de masse rocheuse.
- Lorsque les distances de transport sont relativement courtes, ne dépassant pas 7 km, et pouvant atteindre 15 km dans certains cas particuliers.
- Lors des phases de construction des carrières ou des mines, car il permet de réduire la durée des travaux et d'atteindre plus rapidement la capacité de production prévue.
- Dans les carrières où la vitesse d'avancement du front de taille est élevée, nécessitant un moyen de transport flexible et réactif.
- Dans les exploitations profondes, pour acheminer les roches vers les skips (grandes bennes mobiles) ou vers les convoyeurs à bande.
- Dans les cas d'exploitation sélective, où il est nécessaire de trier et transporter différents types de matériaux séparément.
- Pour les gisements situés dans des zones à relief montagneux, où les autres moyens de transport sont difficiles à mettre en œuvre.
- Dans les carrières à courte durée de vie, où l'installation de systèmes fixes de transport n'est pas économiquement rentable. [34]

3.6. Engins de transport :

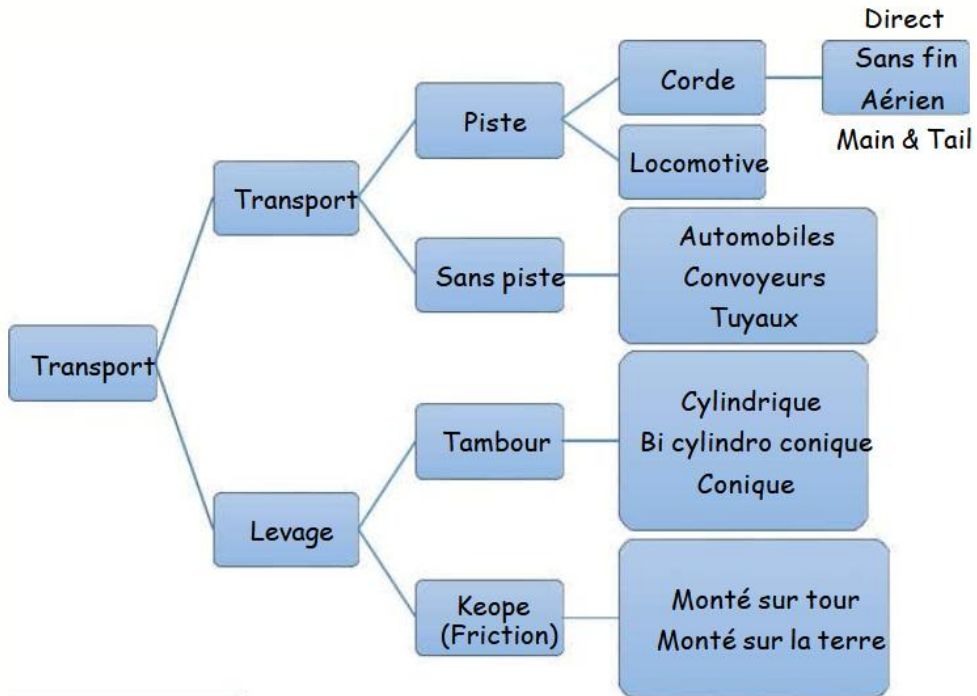


Figure 3.6 : Classification générale des systèmes de transport[35]

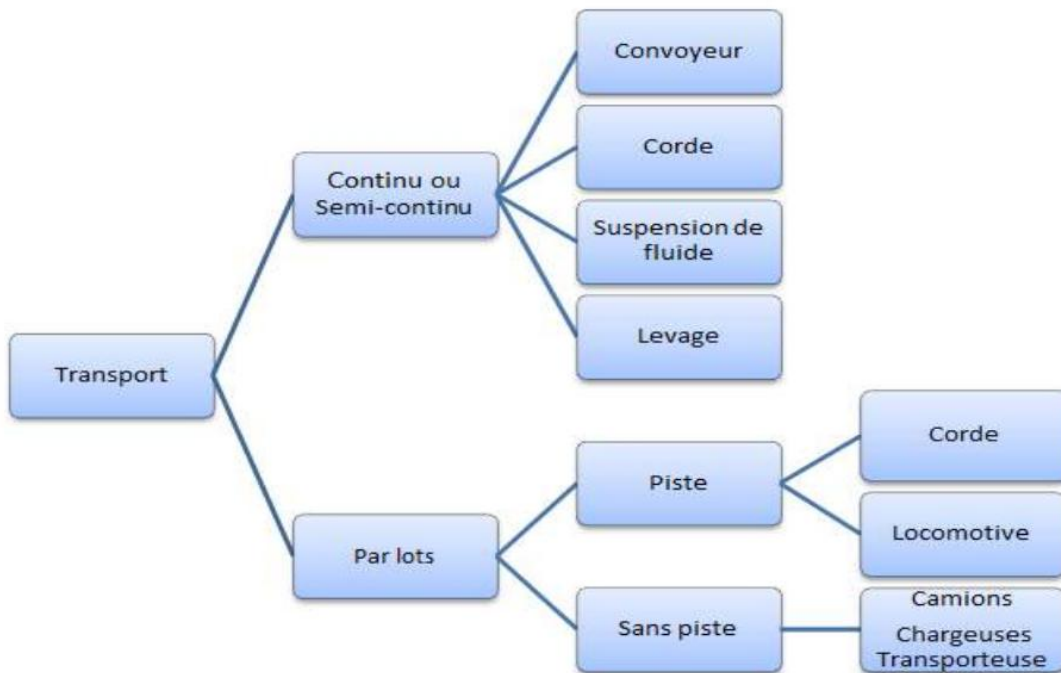


Figure 3.7 :Systèmes de transport continu et par lots[35]

3.7. Choix des moyens de transport :

Afin d'assurer le transport des matériaux d'un point à un autre dans les meilleures conditions économiques et techniques, il est indispensable de bien connaître les performances des différents moyens de transport ainsi que leurs domaines d'utilisation les plus rentables. Cette analyse préalable permet de choisir l'équipement le plus adapté aux exigences de l'exploitation.

Dans ce cadre, plusieurs paramètres doivent être définis avec précision, notamment la technologie d'exploitation adoptée, les tonnages à extraire, ainsi que les distances de transport à parcourir. Il convient également de prendre en considération les conditions économiques du chantier, telles que le taux de découverte, les contraintes environnementales et la valeur marchande des substances minérales exploitées.

Par ailleurs, le choix du mode de transport repose sur un ensemble de facteurs déterminants. Parmi les plus importants figurent le niveau de production de la carrière, la distance entre les zones de chargement et de déchargement, ainsi que le type d'engins utilisés pour le chargement. À cela s'ajoutent les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux à transporter, les conditions géologiques du gisement, ainsi que les dimensions globales de la carrière.

Ainsi, une évaluation rigoureuse de ces différents éléments permet d'optimiser le choix du système de transport et d'assurer une exploitation efficace et rentable.[28]

3.8. Condition d'emploi des camions dans les mines à ciel ouvert :

À l'heure actuelle, le transport par camion constitue le mode le plus utilisé dans les exploitations minières et les carrières, en raison de la simplicité de son organisation et de sa grande flexibilité opérationnelle. Ce mode de transport se distingue par sa capacité à s'adapter facilement aux différentes conditions de travail, ce qui le rend particulièrement efficace dans des environnements variés.

Le choix du type de camion à utiliser dépend de plusieurs facteurs essentiels, notamment la nature et les caractéristiques des matériaux à transporter (densité, granulométrie, abrasivité), la distance de transport entre les points de chargement et de déchargement, ainsi que le type d'équipement de chargement, en particulier les excavateurs. Dans les carrières à forte productivité,

il est recommandé d'opter pour des camions à grande capacité de charge afin d'optimiser le rendement et de réduire les coûts d'exploitation liés au transport.

Dans ce contexte, afin de répondre à ses objectifs de production annuelle, la société minière de BAKWANGA a investi dans une flotte de camions bennes, notamment des tombereaux rigides. Une partie de ces équipements est actuellement en service, tandis qu'une autre est immobilisée en raison de pannes mécaniques, en attendant la disponibilité des pièces de rechange nécessaires à leur remise en état de fonctionnement.

Dans le cadre de notre étude, le transport représente un axe central d'analyse. Il sera abordé de manière détaillée dans les différentes parties de ce travail, en mettant l'accent sur son rôle déterminant dans l'amélioration de la productivité et de l'efficacité globale des opérations minières.[28]

3.9. Défaillances des camions :

3.9.1. Pannes mécaniques :

Les pannes mécaniques affectent fortement les performances des camions et sont souvent liées aux conditions de travail difficiles et au manque d'entretien.

- **Système de refroidissement** : assure la régulation de la température du moteur ; ses défaillances sont fréquentes, surtout en cas de forte chaleur.
- **Pompe à eau** : garantit la circulation du liquide de refroidissement ; une panne peut provoquer une surchauffe du moteur.
- **Pneumatiques** : leur usure est courante et peut être aggravée par des problèmes du système de freinage.
- **Courroie de distribution** : élément essentiel pour la synchronisation du moteur ; sa rupture peut causer des dommages graves, d'où l'importance d'un entretien préventif.[36]

3.9.2. Pannes des systèmes électroniques :

Les systèmes électroniques des véhicules sont essentiels pour la sécurité et le confort, mais ils peuvent subir plusieurs types de pannes.

- **ABS** : peut tomber en panne à cause de capteurs défectueux ou encrassés, ce qui perturbe le freinage.
- **Module de confort** : concerne la climatisation et la radio, qui peuvent cesser de fonctionner à cause de problèmes mécaniques ou d'interférences électroniques.
- **EBS** : un défaut entraîne une mauvaise transmission du freinage et nécessite souvent le remplacement du modulateur.
- **ACC** : panne liée au capteur radar, empêchant le maintien automatique de la distance de sécurité.

La plupart de ces problèmes peuvent être réduits grâce à un entretien régulier et à l'utilisation d'outils de diagnostic et de maintenance préventive.[36]

3.10. Avantages du transport par camion :

Le transport par camion présente de nombreux atouts qui expliquent son utilisation fréquente dans les carrières et les exploitations minières. Parmi ces avantages :

1. Il offre une grande manœuvrabilité ainsi qu'une bonne mobilité grâce à un rayon de braquage réduit, généralement inférieur ou égal à 15 m.
2. Il permet de franchir des pentes importantes à des vitesses élevées, pouvant atteindre des valeurs élevées selon les conditions du terrain.
3. Il dispose d'une autonomie énergétique, ce qui le rend indépendant des installations fixes.
4. Il contribue à l'augmentation du rendement des excavateurs, estimée entre 15 % et 20 %, grâce à la circulation régulière des camions sur la zone de travail.
5. Il facilite également les opérations de mise en terril lors du transport des matériaux stériles, en simplifiant l'organisation des travaux.[37]

3.11. Conclusion :

Le transport dans les mines à ciel ouvert constitue un élément essentiel pour assurer l'efficacité des opérations et optimiser la rentabilité de l'exploitation. Le choix du mode de

transport le plus approprié repose sur plusieurs critères techniques et économiques, notamment la distance de transport, la nature du matériau ainsi que les coûts d'exploitation.

Les camions se distinguent par leur grande flexibilité et leur capacité à s'adapter aux variations du chantier, tandis que les convoyeurs sont particulièrement adaptés au transport continu de grandes quantités de matériaux.

Par conséquent, une organisation efficace du système de transport nécessite l'évaluation des performances globales des équipements de transport et de chargement, ainsi que la détermination précise des heures de fonctionnement des machines. C'est ce qui fera l'objet d'étude dans le chapitre suivant.

Chapitre 04

ETUDE DE CAS

(Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

Chapitre 4 : ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

4.1. Introduction

Ce chapitre vise à présenter une vision globale de l'entreprise à travers l'étude de ses principales composantes, notamment ses activités, son organisation interne et son environnement de travail. Il met en évidence son parcours historique, sa mission ainsi que les valeurs qui guident son fonctionnement, en plus de décrire ses produits et services. Cette analyse permet de mieux comprendre la structure et le mode de gestion de l'entreprise, tout en constituant une base théorique essentielle pour une étude approfondie et précise de sa réalité. L'objectif de cette étude pratique est d'analyser les pannes enregistrées sur les camions Caterpillar 775F et 775G au niveau de la mine de Boukhadra, afin d'évaluer leur impact sur la fiabilité, la disponibilité et les performances des équipements, puis de proposer des actions de maintenance préventive adaptées pour réduire les arrêts et améliorer la productivité

4.2. Historique De La Mine

L'exploitation de la mine de BOUKHADRA a débuté à l'époque Romaine pour extraire le cuivre dans la région du pic; par la suite, l'extraction a concerné le zinc et d'autres poly métaux par la concession de BOUKHADRA (M. TADRO). De 1903 à 1926, la concession de MOKTA EL HADID a réalisé des recherches systématiques à travers des galeries entre les niveaux 845-1225. De 1926 à 1966, moment de la nationalisation des mines, c'était la société de OUENZA qui exploitait le gisement de BOUKHADRA. Cette société a effectué des recherches systématiques par des travaux miniers et des sondages sur le gisement de BOUKHADRA. Pendant la période de 1967 à 1984, la SONAREM était responsable de l'exploitation et des recherches sur les gisements ferrifères d'OUENZA et BOUKHADRA. Après la restructuration des entreprises (1983 - 1984), c'était FERPHOS qui gérât, exploitait et développait ces recherches sur tous les gisements ferrifères existants sur le territoire national. Depuis le 18/10/2001, dans le cadre d'un partenariat avec l'étranger, le holding L. N. M. N. V. a signé un accord de partenariat avec HADID OUENZA BOUKHADRA, filiale de FERPHOS, avec 70 % pour le premier.

4.3. Les Dates Importantes

1896: le premier permis pour des recherches (Mont Ouenza).

1901: Mont Ouenza subvention pour Pascal, préparation pour l'exploitation minière de Boukhadra.

1903: attribué à une organisation de fer à repasser à Boukhadra.

1923: création d'une entreprise à Ouenza.

1925: La société a acquis la propriété de Boukhadra.

1930: Commencement de l'exploitation de la mine de Boukhadra.

1939: L'électrification des lignes de chemin de fer.

1940: Exploitation du chemin de fer par la Société algérienne des chemins de fer.

1945: Intensification du processus Almkcunninh.

06/05/1966: Nationalisation des mines.

07/06/1983: Restructuration de la compagnie minière.

- Création de la Fondation nationale pour le fer et le phosphate de Tébessa.

1990: Application de l'autonomie institutionnelle, qui incluait en vertu ferphos du présent décret.

2001: Privatisation et cession de 70 % des parts Ouenza Boukhadra au partenaire étranger (LNMI spat), maintenant (Métal) et 30 % au profit de ferphos.

4.4. Situation Géographique

Le Djebel de BOUKHADRA est dans l'Atlas saharien, à l'Est de l'Algérie. L'unité de BOUKHADRA est à une altitude de 850 m, le sommet du Djebel atteint 1463 mètres. La ville de BOUKHADRA fait partie de la WILAYA de TEBESSA.

Elle est située à 45 km au Nord-Est de TEBESSA, à 200 km au sud de la ville côtière de ANNABA, et à 18 km de la frontière avec la Tunisie.

Elle est connectée à ANNABA par un chemin de fer qui transporte le minerai de fer vers le complexe d'ELHADJAR.

Le climat est continental et sec, les températures varient de 40° C en été à 0° C en hiver, les précipitations sont faibles avec parfois de légères chutes de neige.



Figure 4.1 : la mine de Boukhadra

4.5. Gisement primaire

Deux méthodes d'exploitation sont utilisées :

La terre est bleue dans des cônes volcaniques. Deux méthodes d'exploitation existent, la mine à ciel ouvert et la mine souterraine.

4.5.1. La Mine A Ciel Ouvert

Ce type d'exploitation est le plus courant, surtout en Afrique. On utilise de gros engins de terrassement pour extraire le minerai de la pipe. Des explosifs sont employés lorsque la roche est trop dure. On creuse ainsi la pipe, laissant apparaître des gradins par lesquels les matériaux à traiter et les stériles sont remontés par camions.

*** Quelques chiffres**

Organisation du travail du Ciel Ouvert :

Nombre de jours ouvrables par an : 255 j/an

Nombre de jours ouvrables par semaine : 5 j/s

Nombre de postes par jour : 3 postes

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

Durée d'un poste : 7. 5 heures

Le chargement dans la carrière se fait par des chargeuses sur pneus et des pelles sur chenille.



Figure 4.2 : Le chargement dans la carrière

4.5.2. La Mine Souterraine

L'exploitation minière souterraine peut actuellement atteindre des profondeurs dépassant les 1000 mètres sous terre. La concentration de diamants diminue à mesure que l'on creuse plus profondément. Deux méthodes d'extraction sont employées :

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

*** Organisations du travail du souterrain :**

Nombre de jours travaillés chaque année : 220 j/an

Nombre de jours travaillés chaque semaine : 5 j/s

Nombre de postes à pourvoir par journée : 2p

Durée d'un poste : 7 h de travail



Figure 4.3 : l'entrée de la mine souterraine

4.6. Organigramme De L'entreprise

L'affichage visuel de la structure d'une organisation aide à voir les différents départements, leurs fonctions, leurs responsabilités, mais également les liens entre ces départements.

L'organigramme ci-dessus illustre les divers services et divisions des mines de Boukhadra

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

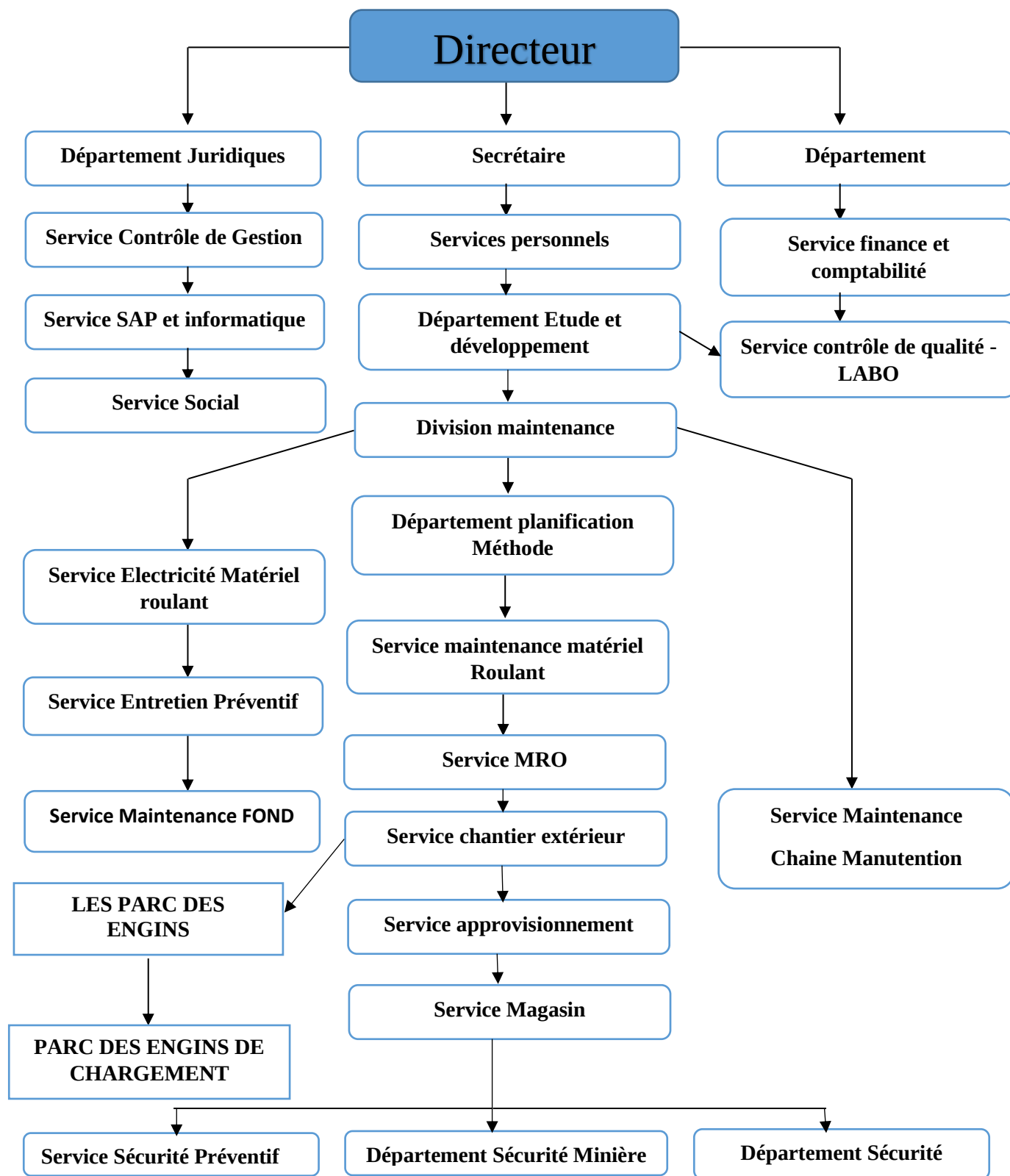


Figure 4.5 : Organigramme De L'entreprise

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

Dans le cadre de notre investigation, nous dirigeons notre analyse vers le secteur de la maintenance.

➤ **Département Maintenance**

- **Objectif** : Ce secteur est chargé de l'intégralité des actions de maintenance et de réparation au sein de l'organisation, assurant ainsi le bon état de fonctionnement des équipements.

4.7. Parc /Carrière :

Tableau 4.1 : Les engins disponibles au niveau la mine de Boukhadra

Engin	Nombre
Camions de carrière	07
Chargeuse	05
Bull	05
Niveleuse	01
Plles de rechargement	06
Sondeuses d'abattage	05

4.8. Etude théorique et statistique

4.8.1. Camion Caterpillar 775 F

Ce camion se distingue par sa grande capacité de manutention, avec une charge utile d'environ 64 tonnes et une benne d'un volume de près de 41,9 m³, ce qui le rend idéal pour le transport de grandes quantités de roches et de terre dans des conditions de travail difficiles. Il est équipé d'un moteur robuste C27 ACERT. Il offre des performances et une efficacité énergétique élevées, et est conçu avec une structure robuste qui résiste aux chocs et aux conditions difficiles, en plus d'un système de freinage et de contrôle avancé qui assure la sécurité pendant son

fonctionnement.



Figure 4.6 : Camion Caterpillar 775 F

Dans notre étude nous avons choisi deux camions (Camion CAT 775 F et Camion CAT 775 G) parmi les camions situés dans la mine de Boukhadra.

L'historique des pannes du 1^{er} engin est représenté dans le tableau N°02

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

Tableau 4.2 : Historique des pannes Camion 775F

Historique des Pannes									
Engin	Année	Heure de Marche	Heure d'arrêt	Nombre Panne	Nature de panne				
					HYD	PNEU	MEC	ELC	Autres
Cam CAT 775F	2021	555	4905	31	1397	1889.5	760.5	167	691
	2022	573.5	1884	14	632.5	743	461.5	47	0
	2023	365.5	57.5	6	38.5	0	14	0	5
	2024	2083	3675.5	27	1175	1314.5	735	176	272
	2025	1216.5	3676.5	22	1210.5	1409.5	585	128	346.5
Total	5	4793.5	14198.5	91	4453.5	5356.5	2556	518	1317.5

Tableau 4.3 : Historique du nombre des pannes du Camion 775F

Année	HYD	PNEU	MEC	ELC	AUTRE
2021	10	14	5	2	3
2022	3	5	1	0	1
2023	2	0	1	0	1
2024	6	8	4	3	2
2025	5	9	2	1	3

NB : Nous avons identifié, au niveau de la mine de Boukhadra, la présence de défaillances supplémentaires en dehors de celles répertoriées dans le tableau précédent. À des fins d'illustration, ces pannes sont regroupées dans la rubrique « Autres », incluant notamment celles affectant les chenilles, les convertisseurs, le châssis, entre autres.

4.8.1.1. Etude d'heure d'arrêt par nature de panne

En se basant sur les heures d'arrêt et la nature de pannes de camion 775F durant les 05 dernières années, le présent graphe a été tracé :

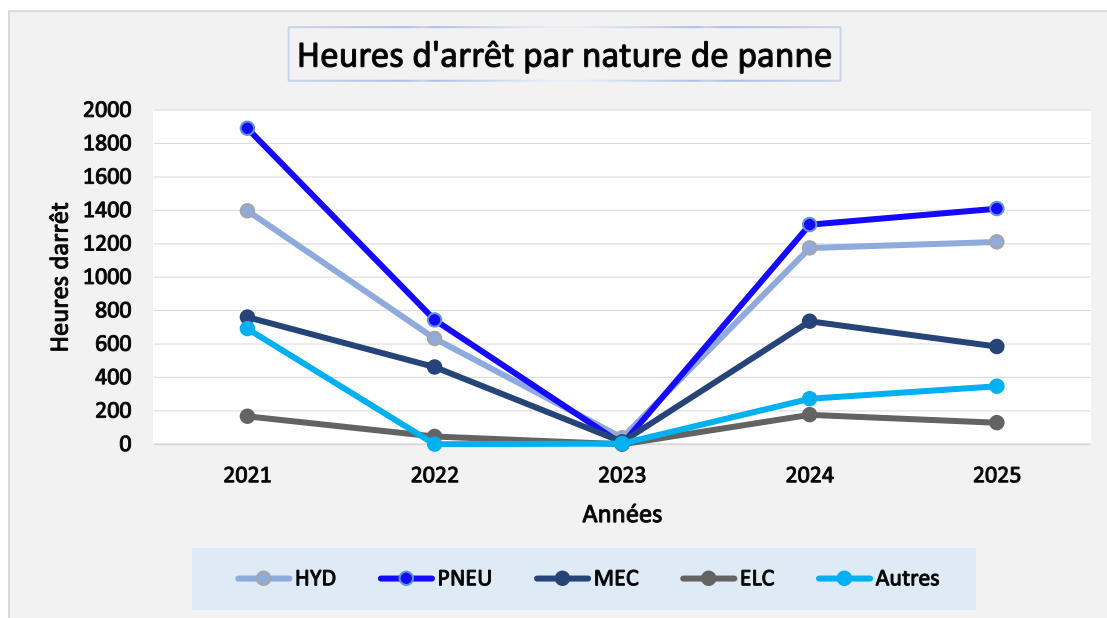


Figure 4.7 : Evolution du temps d'arrêt de Camion 775F

➤ Analyse

Le graphe (figure 4.7) représente l'évolution des heures d'arrêt du Camion 775F selon la nature des pannes durant la période 2021–2025. D'après ce graphe, on constate que:

- **Les pannes pneumatiques** enregistrent les valeurs les plus élevées. Elles débutent avec un pic important en 2021 (1900 h), puis chutent fortement en 2022 (750 h) jusqu'à atteindre une valeur quasi nulle en 2023. Par la suite, elles connaissent une forte reprise en 2024 (1300 h) et continuent d'augmenter légèrement en 2025 (1400 h), ce qui montre leur impact majeur sur les arrêts.
- **Les pannes hydrauliques** suivent une tendance similaire. Après un niveau élevé en 2021 (1400 h), elles diminuent progressivement en 2022 (600 h) pour atteindre un minimum en 2023. Ensuite, elles augmentent fortement en 2024 (1150 h) et se stabilisent légèrement en 2025 (1200 h).

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

- **Les pannes mécaniques** présentent une évolution fluctuante. Elles passent de (750 h) en 2021 à environ 450 h en 2022, chutent à zéro en 2023, puis augmentent de nouveau en 2024 (730 h) avant de diminuer légèrement en 2025 (580 h).
- **Les pannes électriques** restent globalement faibles comparées aux autres types. Elles passent d'environ (150 h) en 2021 à une valeur très faible en 2022 et nulle en 2023, puis remontent légèrement en 2024 (160 h) avant de rediminuer en 2025 (120 h).
- **Les autres pannes** montrent également une variation irrégulière. Après une valeur relativement élevée en 2021 (680 h), elles chutent fortement en 2022 et disparaissent en 2023, puis augmentent progressivement en 2024 (280 h) et 2025 (350 h).

4.8.1.2. Etude du nombre de pannes par nature :

En se basant sur le nombre et la nature de panne de Camion 775 F durant les 05 dernières années, le présent graphe a été tracé

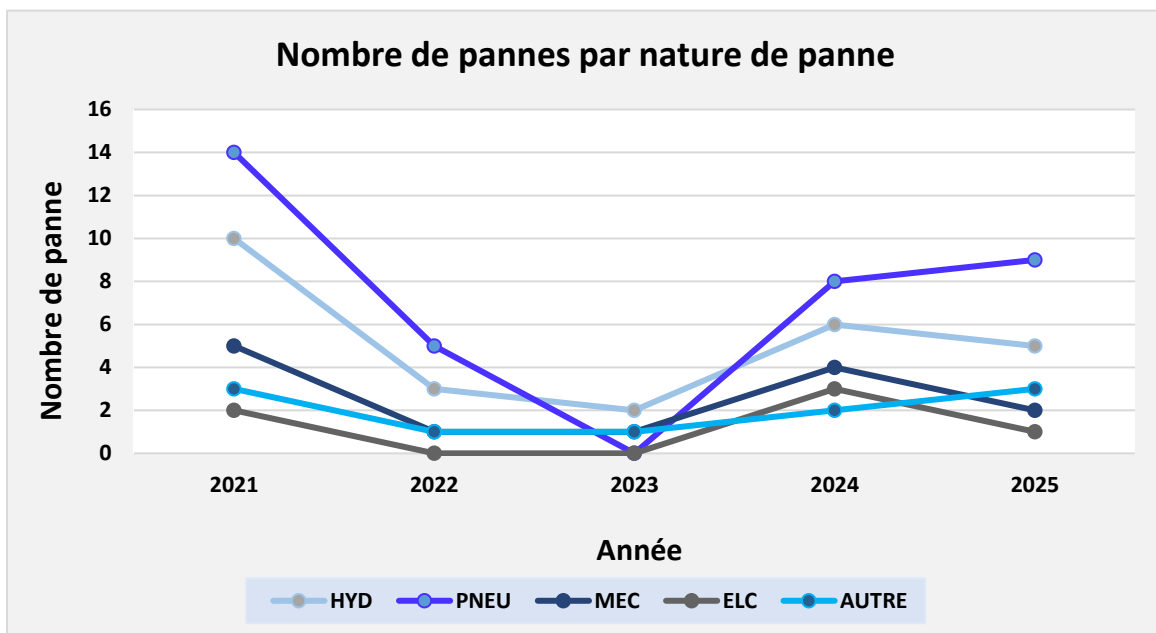


Figure 4.8 : Evolution du nombre de pannes de Camion 775F

➤ Analyse

Le graphe (figure 4.8) représente le nombre de pannes par nature du Camion 775F durant une période de 5 ans (2021–2025). D'après ce graphe, on constate que:

- **Les pannes pneumatiques** sont les plus dominantes. Elles enregistrent une valeur très élevée en 2021 (14 pannes), suivie d'une chute importante en 2022 (5 pannes) jusqu'à

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

atteindre une absence totale en 2023. Par la suite, elles augmentent de nouveau en 2024 (8 pannes) et continuent légèrement à la hausse en 2025 (9 pannes).

- **Les pannes hydrauliques** montrent une tendance globalement décroissante entre 2021 (10 pannes) et 2023 (2 pannes), avant de connaître une reprise en 2024 (6 pannes), puis une légère diminution en 2025 (5 pannes).
- **Les pannes mécaniques** restent relativement faibles et fluctuent légèrement au cours des années, passant de 5 pannes en 2021 à 1 panne en 2022 et 2023, puis augmentant à 4 pannes en 2024 avant de redescendre à 2 pannes en 2025.
- **Les pannes électriques** sont les moins fréquentes. Elles sont nulles en 2022 et 2023, avec une légère apparition en 2021 (2 pannes) et une augmentation temporaire en 2024 (3 pannes), suivie d'une baisse en 2025 avec seulement 1 panne.
- **Les autres pannes** présentent un comportement relativement stable, avec de faibles variations entre 1 et 3 pannes sur toute la période, ce qui indique une occurrence limitée et maîtrisée.

4.8.2. Camion Caterpillar 775G

Ce camion minier rigide de grande capacité, spécialement conçu pour le transport de matériaux dans des environnements exigeants. Il est largement utilisé dans les mines, les carrières et les grands chantiers de terrassement. Grâce à sa structure robuste et à sa puissance élevée, il peut transporter de lourdes charges sur des terrains difficiles tout en garantissant une bonne stabilité et une productivité élevée.

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)



Figure 4.9 : Camion Caterpillar 775 G

Tableau 4.4 : Historique des pannes Camion 775G

Historique des Pannes									
Engin	Année	Heure de Marche	Heure d'arrêt	Nombre Panne	Nature de panne				
					HYD	PNEU	MEC	ELC	Autres
Cam CAT 540 775G	2021	2474.5	319.5	28	105.5	90	25	62	24
	2022	1985.5	123.5	15	38.5	34	14	26	11
	2023	82	618.5	57	210	175.5	70	120	43
	2024	2668	2965.5	94	1085.5	920	247	523	190
	2025	1088.5	4965.5	122	1820.5	1550	404	896	295
Total	5	8298.5	8992.5	316	3263	2769.5	760	1627	563

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

Tableau 4.5 : Historique des nombres des pannes Camion 775G

Année	HYD	PNEU	MEC	ELC	AUTRE
2021	8	9	3	6	2
2022	4	3	2	4	2
2023	16	14	8	11	8
2024	27	25	13	19	10
2025	34	33	17	23	15

4.8.2.1. Etude d'heure d'arrêt par nature de panne

En se basant sur les heures d'arrêt et la nature de pannes de camion 775G durant les 05 dernières années, le présent graphe a été tracé :

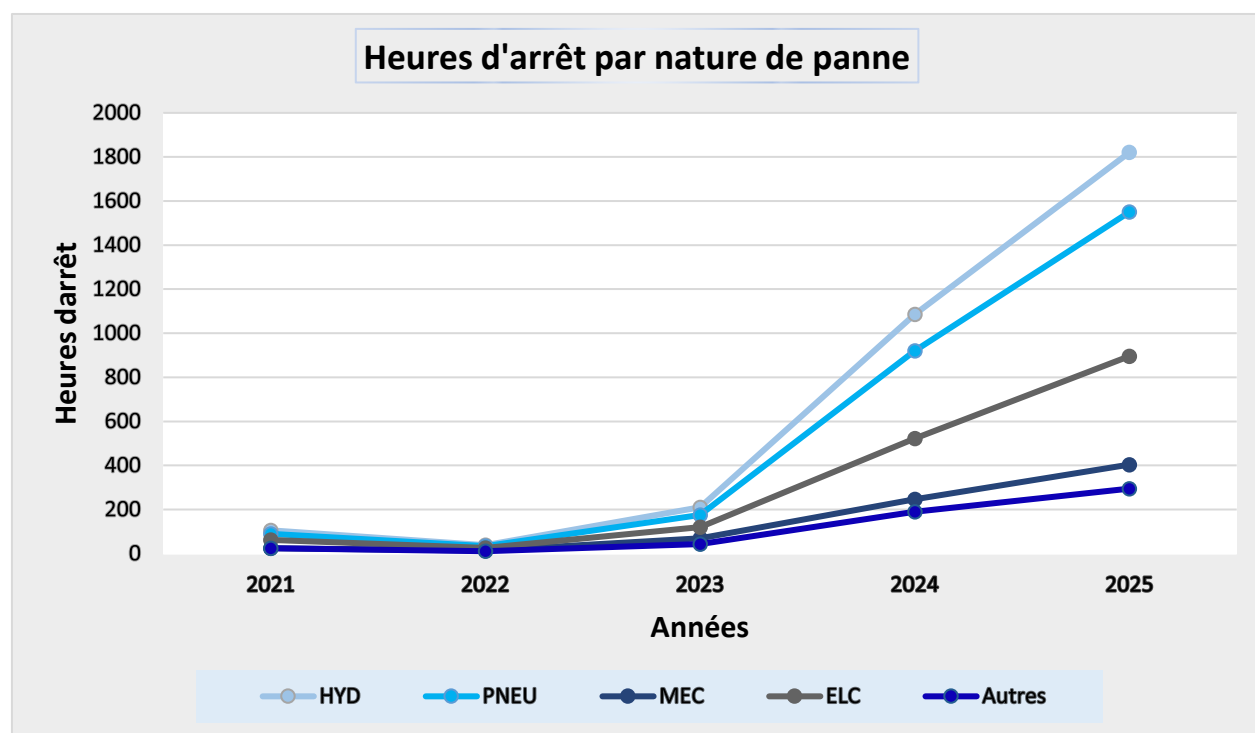


Figure 4.10 : Evolution du temps d'arrêt de Camion 775G

➤ Analyse

Le graphe (figure 4.10) représente l'évolution des heures d'arrêt du **Camion 775G** selon la nature des pannes durant la période 2021–2025. D'après ce graphe, on constate que :

- **Les pannes hydrauliques** enregistrent les valeurs les plus élevées sur la fin de la période. Elles débutent avec une valeur modérée en 2021 (100 h), diminuent légèrement en 2022 (40 h), puis augmentent progressivement en 2023 (200 h). Ensuite, elles connaissent une forte hausse en 2024 (1100 h) et atteignent un pic très important en 2025 (1800 h), ce qui montre leur impact dominant sur les arrêts.
- **Les pannes pneumatiques** suivent une tendance similaire. Après une légère baisse entre 2021 (80 h) et 2022 (40 h), elles augmentent en 2023 (180 h), puis connaissent une forte progression en 2024 (900 h) et continuent d'augmenter en 2025 (1550 h), occupant ainsi la deuxième position en termes d'importance.
- **Les pannes électriques** présentent une évolution croissante marquée. Elles passent d'un niveau faible en 2021 (60 h) à une valeur encore plus faible en 2022 (20 h), puis augmentent progressivement en 2023 (120 h). Par la suite, elles enregistrent une forte hausse en 2024 (520 h) et continuent d'augmenter en 2025 (900 h).
- **Les pannes mécaniques** montrent une évolution progressive mais moins importante. Elles diminuent légèrement entre 2021 (40 h) et 2022 (20 h), puis augmentent graduellement en 2023 (80 h), 2024 (250 h) et 2025 (400 h).
- **Les autres pannes** restent les moins significatives durant toute la période. Elles passent de valeurs faibles en 2021 (20 h) et 2022 (10 h), puis augmentent légèrement en 2023 (50 h), avant de croître progressivement en 2024 (180 h) et 2025 (300 h).

4.8.2.2. Etude nombre de pannes par nature

En se basant sur le nombre et la nature de pannes de Camion Caterpillar 775G pendant les 05 dernières années, le présent graphe a été tracer :

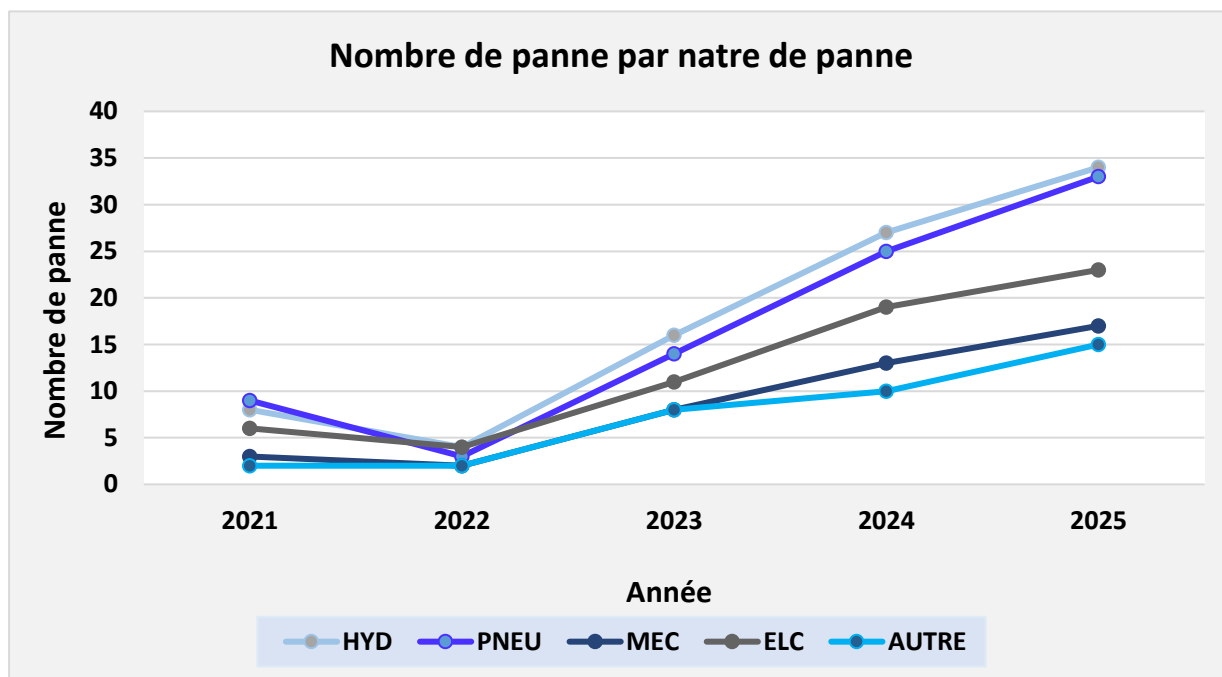


Figure 4.11: Evolution du nombre de pannes de Camion 775G

➤ Analyse

Le graphe (figure 4.11) représente le nombre de pannes par nature du **Camion 775G** durant une période de 5 ans (2021–2025). D’après ce graphe, on constate que :

- **Les pannes hydrauliques** sont parmi les plus importantes durant toute la période. Elles passent de 8 pannes en 2021 à une baisse notable en 2022 (3 pannes), puis connaissent une forte augmentation continue pour atteindre 16 pannes en 2023, 27 pannes en 2024 et culminer à 34 pannes en 2025.
- **Les pannes pneumatiques** suivent une évolution similaire aux pannes hydrauliques. Elles débutent avec 9 pannes en 2021, diminuent à 3 pannes en 2022, avant d’augmenter progressivement à 14 pannes en 2023, 25 pannes en 2024 et 33 pannes en 2025. Cela traduit une fréquence élevée des défaillances pneumatiques en fin de période.

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

- **Les pannes mécaniques** restent modérées au début de la période, avec 3 pannes en 2021 et 2 pannes en 2022, puis enregistrent une hausse progressive à partir de 2023 (8 pannes), atteignant 13 pannes en 2024 et 17 pannes en 2025.
- **Les pannes électriques** présentent également une tendance haussière. Elles passent de 6 pannes en 2021 à 4 pannes en 2022, puis augmentent régulièrement à 11 pannes en 2023, 19 pannes en 2024 et 23 pannes en 2025.
- **Les autres pannes** sont les moins fréquentes au début de la période, avec 2 pannes en 2021 et 2022, avant une augmentation progressive à partir de 2023 (8 pannes), puis 10 pannes en 2024 et 15 pannes en 2025.
- **D'une manière générale**, le camion **775G** enregistre une augmentation significative du nombre total de pannes à partir de 2023, particulièrement au niveau des systèmes hydrauliques et pneumatiques, ce qui peut indiquer un vieillissement progressif de l'équipement et un besoin accru en maintenance préventive.

4.9. Étude des deux camions ensemble

En se basant sur les heures d'arrêt et la nature des pannes des deux camions de production durant les cinq dernières années, le présent tableau a été réalisé.

Tableau 4.6 : Etude d'heures d'arrêt par nature de Deux engins

Engin	HYD	PNEU	MEC	ELC	Autres
Camion775F	4453.5	5356.5	2556	518	1317.5
Camion775G	3263	2769.5	760	1627	563
Total	7716.5	8126	3316	2145	1880.5

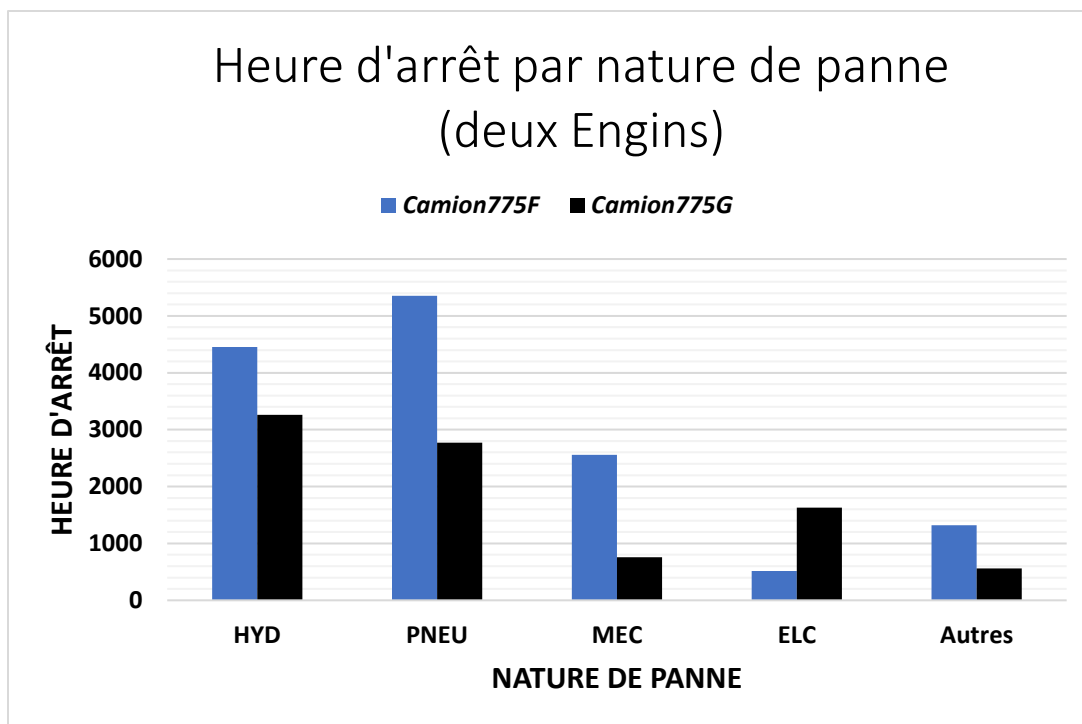


Figure 4.12 : Heures d'arrêt par nature de deux engins ensemble

Tableau 4.7: Etude du nombre de pannes par nature de panne des deux engins

Engin	HYD	PNEU	MEC	ELC	Autres
Camion775F	26	36	13	6	5
Camion775G	89	84	43	63	37
Totale	115	120	56	69	42

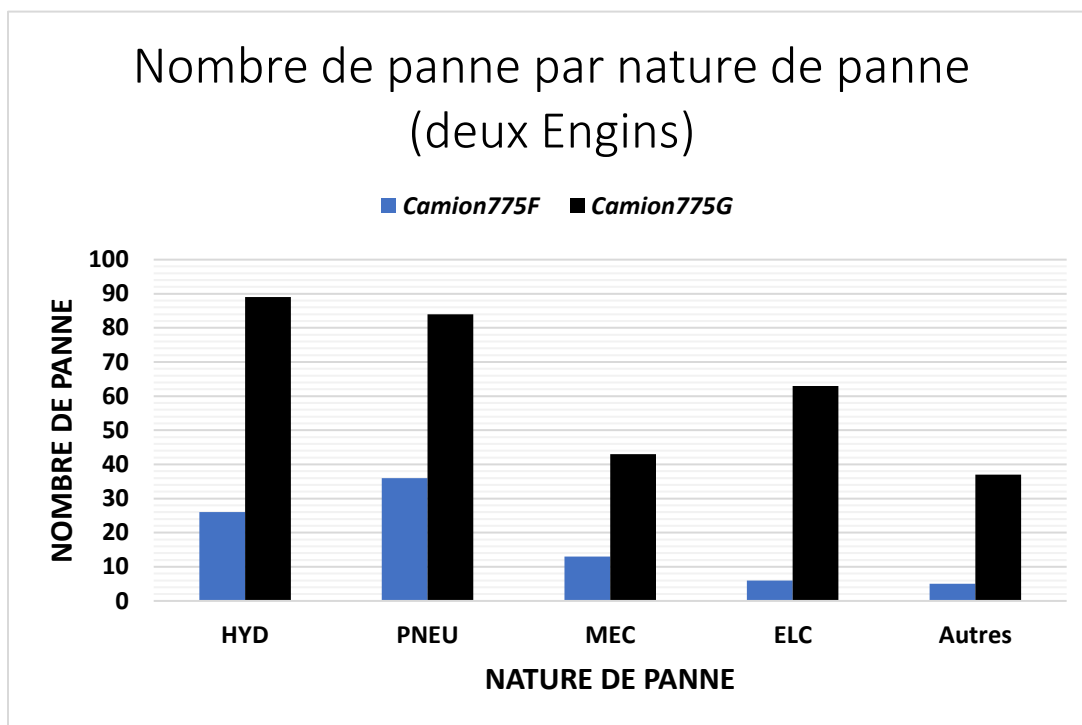


Figure 4.13 : Nombre de pannes par nature de pannes de deux engins ensemble

➤ Analyse

Le graphe (fig.13) représente le nombre et la nature des pannes des deux camions **775F** et **775G** durant une période de 05 ans. D'après ce graphe, on constate :

- Une différence notable au niveau des pannes hydrauliques, où le Camion 775G enregistre le nombre le plus élevé (environ 90 pannes), contre seulement 25 pannes pour le Camion 775F. Cela montre que le système hydraulique du 775G est plus exposé aux défaillances.
- Concernant les pannes pneumatiques, le Camion 775G présente également un nombre très important (environ 85 pannes), comparé à 35 pannes pour le Camion 775F. Cette différence indique une fragilité plus marquée du système pneumatique du 775G.
- Pour les pannes mécaniques, les deux camions montrent une certaine différence, avec environ 42 pannes pour le 775G contre 12 pannes pour le 775F, ce qui révèle une fréquence plus élevée des défaillances mécaniques pour le 775G.

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

- En ce qui concerne les pannes électriques, le Camion 775G enregistre environ 62 pannes, tandis que le 775F reste à un niveau très faible (environ 5 pannes). Cela met en évidence une différence importante dans la fiabilité des systèmes électriques entre les deux engins.
- Pour les autres pannes, le Camion 775G présente également un nombre élevé (environ 37 pannes), contre seulement 5 pannes pour le Camion 775F, ce qui indique que le 775G est globalement plus affecté par divers types de défaillances.
- Globalement, le Camion 775G présente un nombre de pannes nettement supérieur par rapport au Camion 775F pour toutes les catégories, ce qui indique une fiabilité plus faible du 775G durant la période étudiée.

Nous utilisons le diagramme de Pareto pour déterminer les pannes les plus fréquentes et les plus influentes sur l'arrêt des équipements, afin de se concentrer sur leur traitement et d'améliorer la maintenance.

4.9.1. Application de la loi de Pareto (loi des 20-80)

A partir des heures d'arrêt de l'ensemble des deux engins durant les 05 dernières années, on a réalisé le tableau suivant.

Tableau 4.8 : Statistique d'heures d'arrêt de l'ensemble des deux engins

Nature de panne	Heures d'arrêt	Classement Nature de panne	Classement Heures d'arrêt	Cumul	%Cumul
HYD	7716.5	PNEU	8126	8126	35.05%
PNEU	8126	HYD	7716.5	15842.5	68.33%
MEC	3316	MEC	3316	19158.5	82.64%
ELC	2145	ELC	2145	21303.5	91.89%
Autres	1880.5	Autres	1880.5	23184	100%

En se basant sur ce qui précède, le présent graphe a été obtenu

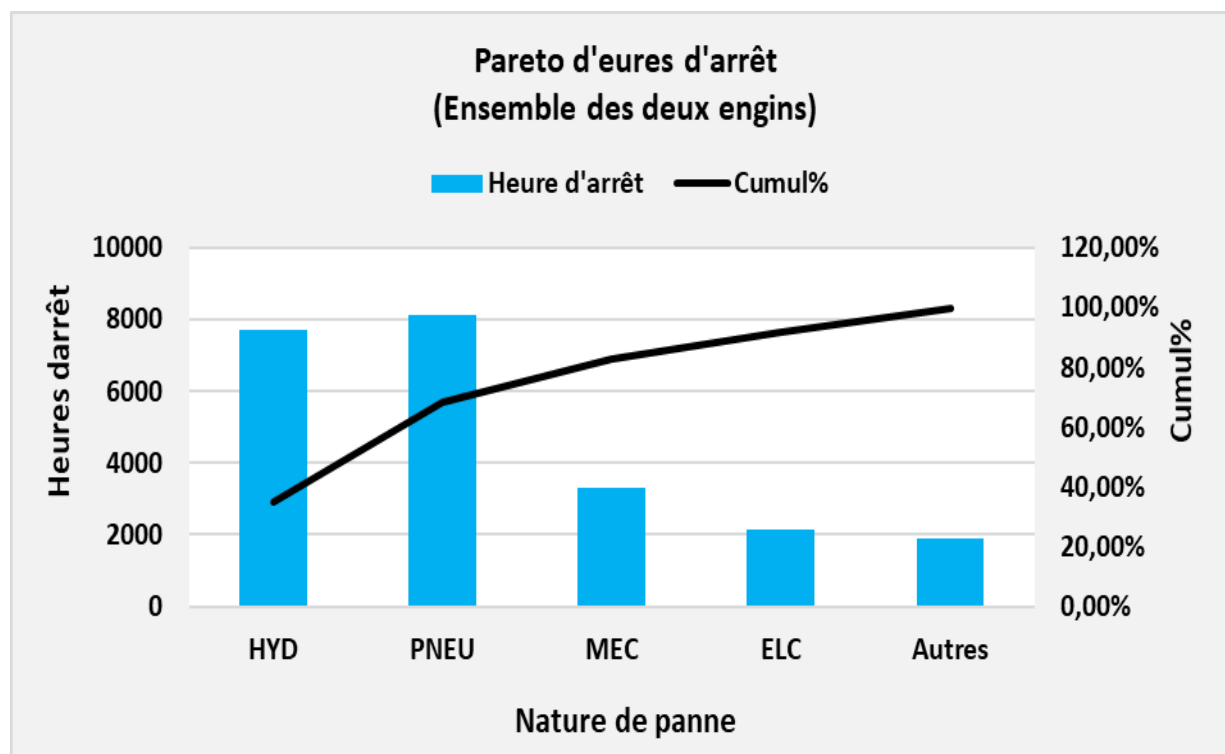


Figure 4.14 : Diagramme de Pareto des deux engins ensemble

➤ Analyse

En consultant le diagramme de Pareto (courbe ABC) des heures d'arrêt de l'ensemble des deux engins (figure 4.14) :

Zone A : Cela représente environ 80 % des heures d'arrêt dues principalement aux pannes hydrauliques et pneumatiques, qui constituent les causes majeures nécessitant une intervention prioritaire.

Zone B : Cela représente environ 15 % des heures d'arrêt dues aux pannes mécaniques et électriques.

Zone C : Cela représente environ 5 % des heures d'arrêt dues aux autres pannes, qui ont un impact relativement faible sur la disponibilité des engins.

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

Pour le 2-ème indice, c'est à dire, le nombre de pannes de l'ensemble des engins de production durant les 05 dernières années, on a réalisé le tableau suivant

Tableau 4.9 : Statistique nombre de panne d'ensemble des engins pendant 05 ans

Nature de panne	Nombre de panne	Classement Nature de panne	Classement Nombre de panne	Cumul	%Cumul
HYD	115	HYD	115	115	28.6%
PNEU	120	PNEU	120	235	58.5%
MEC	56	ELC	69	304	75.6%
ELC	69	MEC	56	360	89.6%
Autres	42	Autres	42	402	100%

En se basant sur ce qui précède, le présent graphe a été tracé

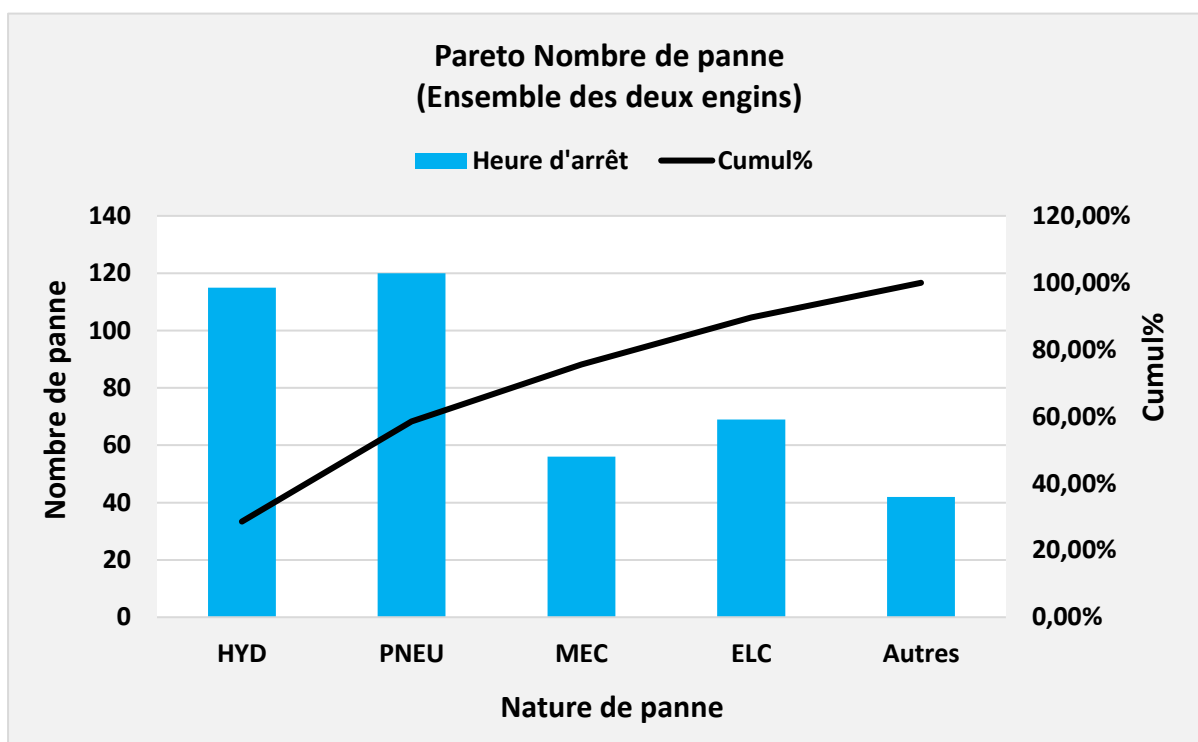


Figure 4.15 : Diagramme de Pareto des engins

➤ Analyse

En consultant le diagramme de Pareto (courbe ABC) du nombre de pannes de l'ensemble des deux engins (fig.15) :

Zone A : Cela représente environ **80 %** du nombre total de pannes dues principalement aux pannes **hydrauliques, pneumatiques et électriques**, qui constituent les causes majeures des défaillances enregistrées.

Zone B : Cela représente environ **15 %** du nombre de pannes dues aux pannes **mécaniques (MEC)**.

Zone C : Cela représente environ **5 %** du nombre de pannes dues aux **autres pannes**, qui restent les moins fréquentes.

Dans l'étape suivante et pour plus de précision, nous allons élaborer le diagramme d'Ishikawa afin de déterminer les causes réelles des pannes hydrauliques en les répartissant selon la méthode des 5M. Cette démarche va nous permettre d'analyser en détail les origines des défaillances observées et de proposer des actions correctives adaptées à chaque catégorie, dans le but de réduire les arrêts, améliorer la fiabilité des camions et augmenter la productivité globale.

4.10. Application Ishikawa

4.10.1. Panne hydraulique

Les pannes hydrauliques apparaissent comme les défaillances les plus critiques parmi l'ensemble des catégories étudiées sur les camions Caterpillar 775G et Caterpillar 775F. Elles occupent une place importante aussi bien en termes de nombre de pannes qu'en durée totale d'arrêt, ce qui influence directement la disponibilité des équipements et la continuité de la production. Ces défaillances entraînent souvent des immobilisations prolongées ainsi que des coûts élevés liés aux réparations et au remplacement des composants.

Dans le cadre de cette étude, l'application du diagramme d'Ishikawa a permis d'identifier et de classer les causes potentielles des pannes hydrauliques selon les principales catégories d'analyse, à savoir : la main-d'œuvre, la méthode, le matériel, le milieu et la matière (5M). Cette approche facilite la compréhension globale des facteurs responsables des défaillances et permet de mettre en évidence les points faibles du système de maintenance et d'exploitation.

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

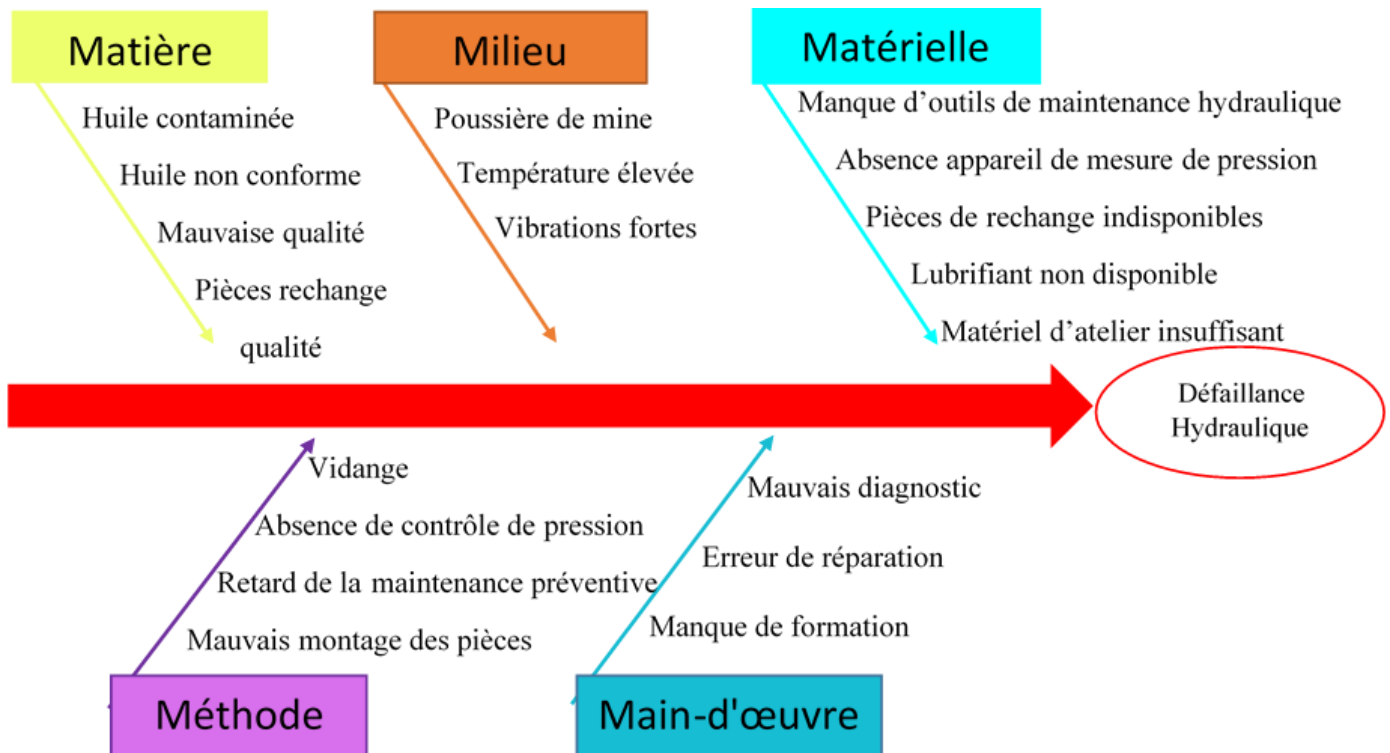


Figure 4.16 : Diagramme d'Ishikawa (pannes hydraulique)

- **Méthode**

- Vidange : Le non-remplacement périodique de l'huile hydraulique favorise l'accumulation d'impuretés qui détériorent les composants.
- Absence de contrôle pression : L'absence de contrôle périodique empêche la détection précoce des anomalies.
- Retard maintenance préventive : Un montage incorrect des flexibles, joints ou pompes provoque rapidement des fuites ou des pannes répétitives.
- Mauvais montage des pièces : Continuer l'exploitation malgré des signes de faiblesse hydraulique aggrave la panne initiale.

- **Main-d'œuvre**

- Mauvaise manipulation : Un technicien non formé peut mal interpréter les symptômes ou utiliser de mauvaises procédures.
- Oubli de contrôle : Le serrage excessif, le mauvais réglage ou le remplacement incorrect des pièces réduisent la fiabilité du système.

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

- Faible expérience : Des manœuvres brutales ou une surcharge fréquente sollicitent fortement le circuit hydraulique.
- **Matière**
 - Huile contaminée : La présence de poussière, eau ou particules métalliques use rapidement les pompes et distributeurs.
 - Huile non conforme : Une viscosité inadaptée diminue les performances, surtout en forte chaleur ou en hiver.
 - Pièces de rechange de mauvaise qualité : Les joints ou flexibles non conformes ont une durée de vie réduite.
- **Milieu**
 - Poussière de mine : La poussière pénètre dans les circuits et accélère l'usure des composants.
 - Température élevée : La chaleur excessive dégrade l'huile et diminue ses propriétés lubrifiantes.
 - Vibrations fortes : Les secousses constantes fragilisent les raccords et provoquent des fissures.
- **Matérielle**
 - Manque d'outils de maintenance hydraulique : L'absence d'outils spécifiques destinés à la maintenance hydraulique, tels que les clés adaptées, extracteurs ou kits de réparation, rend les interventions difficiles et prolonge la durée des réparations.
 - Absence appareil de mesure de pression : Le manque d'un manomètre ou d'un appareil de contrôle de pression empêche de détecter les anomalies du circuit hydraulique, comme les pertes de pression ou les défaillances de la pompe.
 - Pièces de rechange indisponibles : L'indisponibilité des composants hydrauliques (joints, flexibles, pompes, vérins, filtres) entraîne l'arrêt prolongé du camion en attendant leur remplacement.
 - Lubrifiant non disponible : L'absence d'huile hydraulique ou de lubrifiant adapté perturbe le fonctionnement normal du système et accélère l'usure des composants internes.
 - Matériel d'atelier insuffisant : Le manque d'équipements dans l'atelier, tels que les outils de levage, établis de travail ou appareils de diagnostic, limite l'efficacité des opérations de maintenance.

4.10.2. Panne pneumatique

Les pannes pneumatiques figurent parmi les défaillances importantes relevées durant la période étudiée sur les deux types de camions Caterpillar 775G et Caterpillar 775F. Elles occupent une place notable aussi bien en nombre de pannes qu'en temps d'arrêt, ce qui affecte directement la disponibilité des équipements et le bon déroulement des opérations minières. Ces défaillances peuvent engendrer des immobilisations répétitives ainsi que des coûts supplémentaires liés aux interventions de maintenance et au remplacement des composants défectueux, dans le but de mieux cerner les causes possibles engendrant ce type de défaillances nous appliquons aussi le diagramme d'Ishikawa pour cette catégorie de pannes (Figure 4.17).

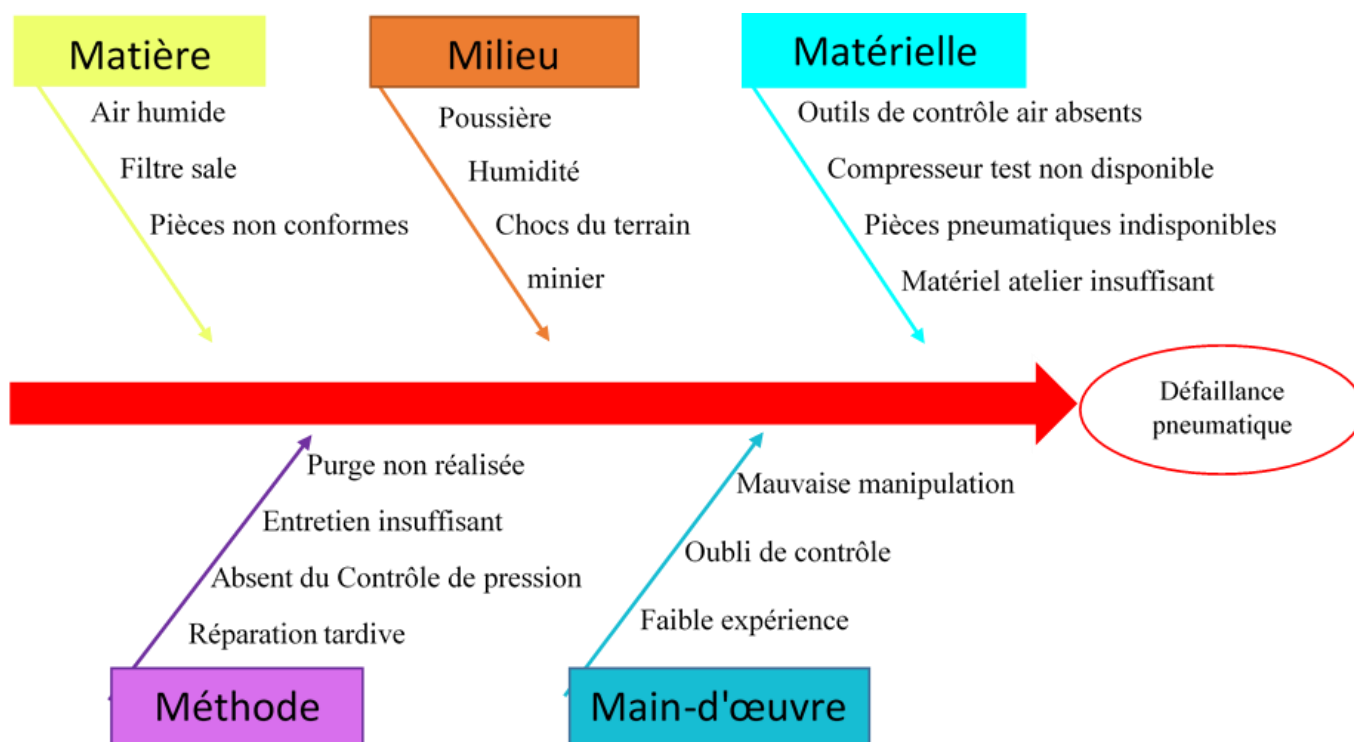


Figure 4.17 : Diagramme d'Ishikawa (pannes pneumatiques)

- **Méthode**
 - Purge non réalisée : L'eau condensée dans le circuit provoque corrosion et dysfonctionnements.
 - Entretien insuffisant : Le manque de nettoyage des filtres ou de contrôle des fuites augmente les risques de panne.
 - Réparation tardive : Une petite fuite négligée devient souvent une panne majeure.

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

- **Main-d'œuvre**

- Mauvaise manipulation : Un conducteur ou technicien peut mal utiliser le système de freinage.
- Oubli de contrôle : Ne pas vérifier la pression avant démarrage augmente les risques d'incident.
- Faible expérience : Le personnel inexpérimenté détecte moins rapidement les anomalies.

- **Matière**

- Air humide : L'humidité interne provoque corrosion et gel dans certaines conditions.
- Filtre sale : Un filtre encrassé gêne l'alimentation en air.
- Pièces non conformes : Les clapets ou flexibles de mauvaise qualité fuient rapidement.

- **Milieu**

- Poussière : Elle encrasse les filtres et réduit la qualité de l'air comprimé.
- Humidité : Elle favorise la corrosion interne du circuit.
- Chocs terrain minier : Ils fragilisent les raccords et conduites.

- **Matérielle**

- Outils de contrôle air absents : L'absence d'outils de contrôle, comme les manomètres ou détecteurs de fuite, ne permet pas de vérifier correctement la pression d'air ni de localiser les anomalies du circuit pneumatique.
- Compresseur test non disponible : Le manque d'un compresseur de test empêche d'effectuer les essais nécessaires sur le circuit pneumatique après réparation ou lors du diagnostic.
- Pièces pneumatiques indisponibles : L'absence de pièces de rechange pneumatiques (valves, flexibles, raccords, filtres, membranes) prolonge les temps d'arrêt et retarde la remise en service du camion.
- Matériel atelier insuffisant : Un atelier mal équipé ne permet pas d'assurer des interventions rapides et efficaces sur les systèmes pneumatiques.

L'un des objectifs de cette étude est le calcul de la fiabilité représentant le concept le plus important de la sûreté de fonctionnement nécessitant l'application d'un des modèles probabilistes. Nous faisons appel au modèle de Weibull qui reste le plus souvent utilisée pour modéliser les données de fiabilité.

4.11. Application la loi de Weibull

❖ Exemple 1 :

Calcul pour Camion Caterpillar 775F en 2023 :

2023		
Ordre i	TBF	Fi
1	72	0,067
2	81	0,163
3	89	0,260
4	94	0,356
5	97	0,452
6	106	0,548
7	117	0,644
8	124	0,740
9	128	0,837
10	135	0,933

Vu le nombre d'échantillons $N = 10$

On applique la loi du rang médian pour connaître la probabilité de l'ordre :

$$Fi = \frac{i-0,3}{N+0,4} \quad (4.1)$$

Donc :

$$Fi = \frac{1 - 0,3}{10 + 0,4} = 0.067$$

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

En se basant sur les calculs de la probabilité de répartition F_i on trace la droite la droite de Weibull et on détermine les paramètres β , η et Υ (fig.16)

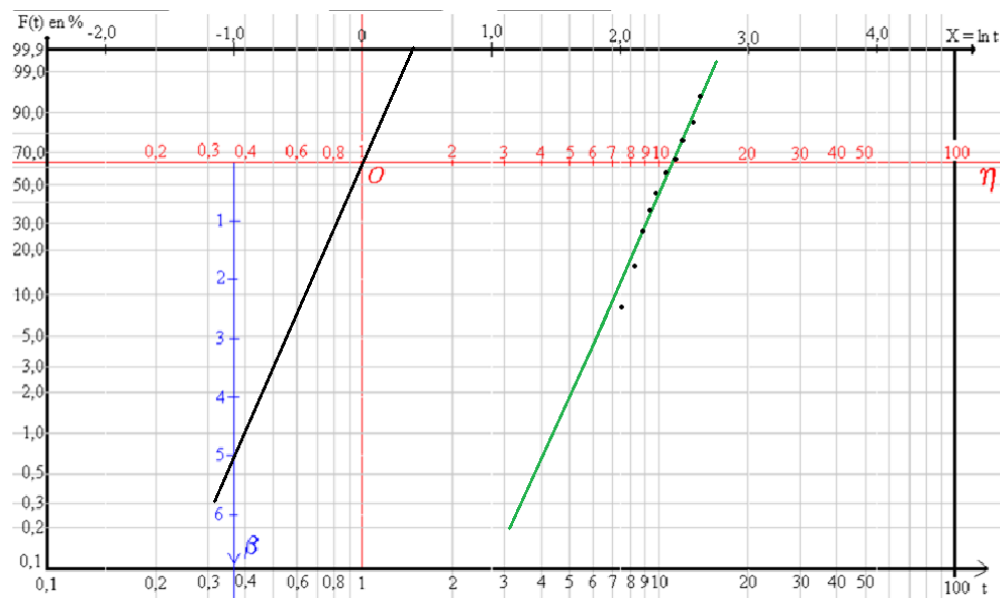


Figure 4.18 : Application de la loi de Weibull

❖ Exemple 2 :

Calcul pour Camion Caterpillar 775G en 2022 :

2022		
Ordre i	TBF	Fi
1	67	0,045
2	74	0,110
3	82	0,175
4	93	0,240
5	96	0,305
6	110	0,370
7	118	0,435
8	125	0,500
9	142	0,565
10	156	0,630
11	171	0,695

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

12	178	0,760
13	188	0,825
14	201	0,890
15	224	0,955

Vu le nombre d'échantillons $N = 15$, On procède de la même façon que pour le 1^{er} engin et on trace la droite de Weibull en déterminant les différents paramètres de la loi sur le papier de Weibull figure (4.19)

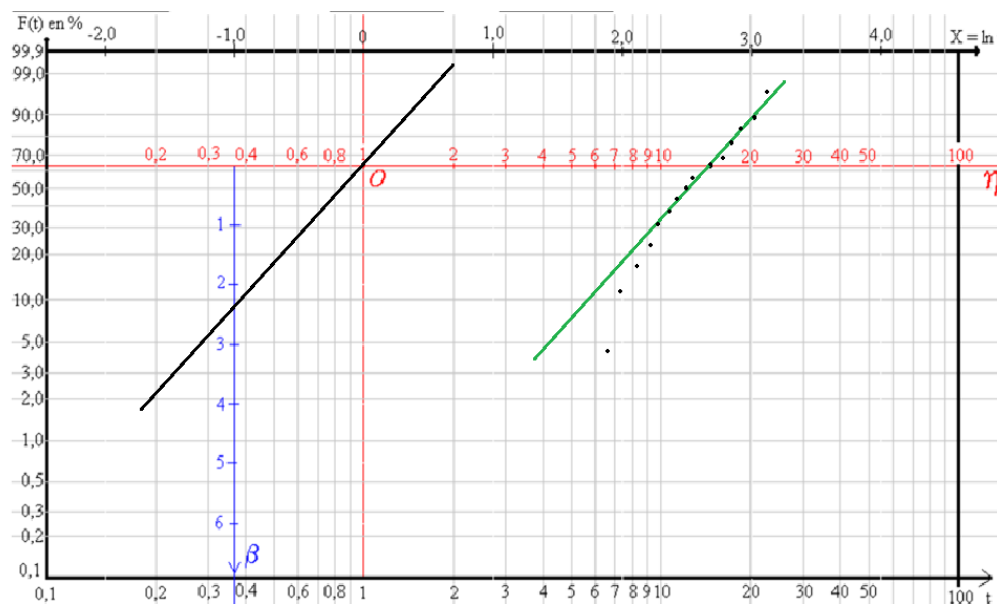


Figure 4.19 : Application la loi de Weibull

Tableau 4.10 : Les paramètres de Weibull de deux engins pendant 5 ans

Année		β	η	γ	MTBF	Fiabilité
Camion Caterpillar 775F	2021	2.6	1400	0	1243.48	65%
	2022	2.2	1650	0	1461.24	71%
	2023	5	1200	0	1101.84	66%
	2024	3.5	1350	0	1214.59	70%
	2025	2.9	1700	0	1515.89	80%

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

Année		β	η	γ	MTBF	Fiabilité
Camion Caterpillar 775G	2021	2.2	1700	0	1505.52	73%
	2022	2.3	1570	0	1390.86	70%
	2023	2	1650	0	1462.23	69%
	2024	2.6	5400	0	4796.28	98%
	2025	2.4	6700	0	5939.55	98%

Une fois les paramètres de Weibull (de forme β , d'échelle η et de position γ) sont déterminés, on passe au calcul de la moyenne des temps de bon fonctionnement le MTBF et de la fiabilité $R(t)$.

Remarque :

$$MTBF = A * \eta + \gamma \quad (4.2)$$

(A : valeur sur le tableau de Weibull)

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (4.3)$$

Tableau 4.11 : La fiabilité des deux engins pendant 5 ans

Années	Camion 775F	Camion 775G
2021	65%	73%
2022	71%	70%
2023	66%	69%
2024	70%	98%
2025	80%	98%

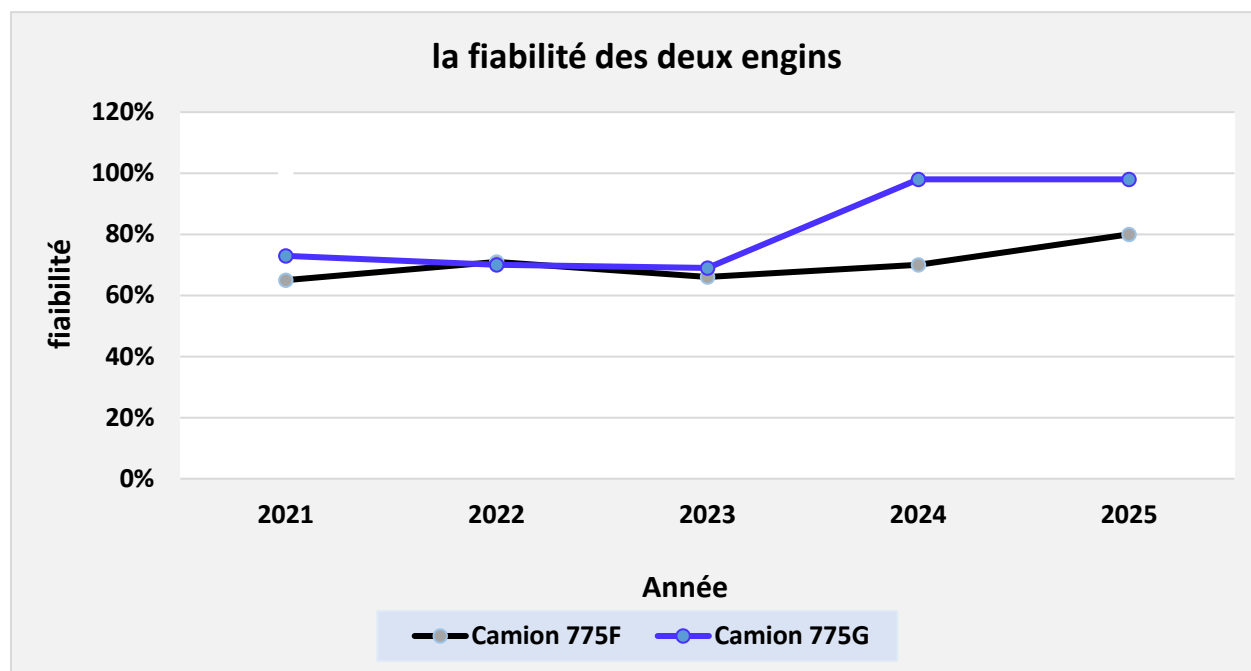


Figure 4.20 : Diagramme de la fiabilité des deux engins pendant 05 ans

➤ Analyse

Le graphique (Figure 4.20) montre l'évolution de la fiabilité des deux camions Caterpillar 775F et 775G durant la période 2021–2025, calculée à partir des paramètres de la loi de Weibull et des données de défaillances issues de l'historique des pannes de la mine de Boukhadra.

Pour le camion 775F, la fiabilité présente une évolution relativement stable avec une tendance générale à l'amélioration. En 2021, elle est estimée à environ 65 %, traduisant un niveau de performance moyen. En 2022, une légère amélioration est observée avec une fiabilité proche de 70 %, indiquant une réduction des défaillances et une meilleure disponibilité de l'équipement. En 2023, la fiabilité diminue légèrement pour atteindre environ 66 %, ce qui peut être lié à une augmentation temporaire des pannes ou à des conditions d'exploitation plus exigeantes. Par la suite, une reprise progressive est constatée avec une fiabilité d'environ 70 % en 2024, puis une augmentation plus marquée en 2025 où elle atteint près de 80 %, représentant la meilleure valeur enregistrée durant la période étudiée.

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

Concernant le camion 775G, la fiabilité est globalement supérieure à celle du camion 775F durant la majeure partie de la période analysée. Elle débute à environ 73 % en 2021, puis diminue légèrement à près de 70 % en 2022. En 2023, la fiabilité reste relativement stable autour de 69 %, traduisant un comportement opérationnel constant. À partir de 2024, une amélioration très importante est observée avec une fiabilité atteignant environ 98 %, indiquant une forte réduction des défaillances et une amélioration notable de la performance technique du camion. Cette valeur se maintient en 2025, témoignant d'une excellente stabilité de fonctionnement et d'une efficacité élevée des actions de maintenance mises en œuvre.

Globalement, la comparaison entre les deux engins montre que le camion 775G présente une fiabilité supérieure à celle du camion 775F durant l'ensemble de la période étudiée, à l'exception de l'année 2022 où les deux camions affichent pratiquement le même niveau de fiabilité. Le 775G se distingue particulièrement à partir de 2024 grâce à une amélioration significative de ses performances et à un très faible taux de défaillances. En revanche, le 775F présente une évolution plus modérée, bien qu'il enregistre une amélioration progressive en fin de période. Ainsi, le camion 775G apparaît comme l'engin le plus fiable, tandis que le camion 775F nécessite un renforcement des actions de maintenance préventive et une meilleure gestion des interventions techniques afin d'améliorer davantage sa fiabilité opérationnelle.

Après avoir déterminé la fiabilité, nous passons au calcul de la disponibilité, le 2^{ème} paramètre de la sureté de fonctionnement par la formule suivante :

$$A = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (4.4)$$

MTBF : Temps moyen de bon fonctionnement.

MTTR : Le temps technique moyen de réparation.

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

Tableau 4.12 : la disponibilité de deux engins pendant 5 ans

Années	Camion 775F	Camion 775G
2021	88.7%	99.25%
2022	91.6%	99.41%
2023	99.1%	99.26%
2024	89.9%	99.35%
2025	90.1%	99.32%

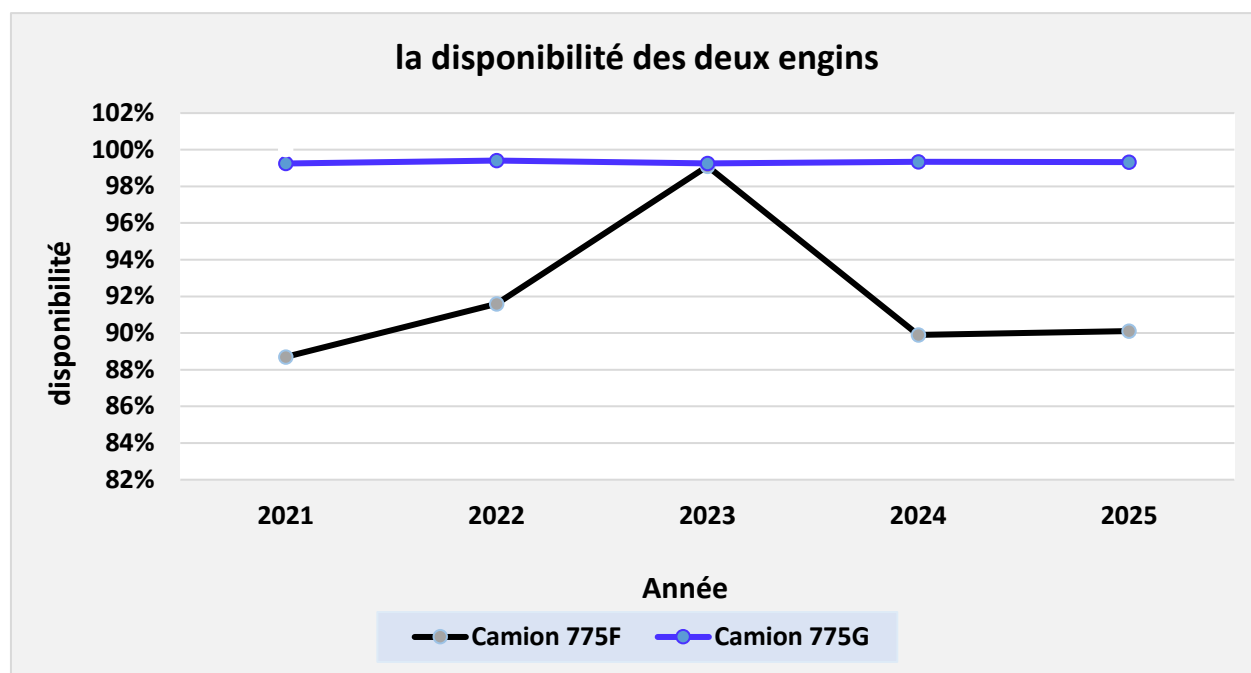


Figure 4.21 : Diagramme de la disponibilité des deux engins pendant 05 ans

➤ Analyse

Le graphique (Figure 4.22) présente l'évolution de la disponibilité des deux camions Caterpillar 775F et 775G durant la période 2021–2025 à partir des données d'exploitation et des temps d'arrêt enregistrés dans la mine de Boukhadra. La disponibilité constitue un indicateur essentiel de performance, puisqu'elle traduit la capacité d'un équipement à être opérationnel et apte à assurer sa fonction dans les conditions d'exploitation requises. L'analyse de cet indicateur permet

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

d'évaluer l'efficacité des actions de maintenance mises en œuvre ainsi que leur impact sur la continuité de service des engins. Les résultats obtenus mettent en évidence l'évolution de la disponibilité des deux camions et permettent d'identifier les périodes d'amélioration ou de dégradation de leurs performances opérationnelles.

Pour le camion Caterpillar 775F, la disponibilité présente des variations modérées au cours de la période étudiée. En 2021, elle est de 88,7 %, traduisant une bonne capacité opérationnelle malgré la présence de certains temps d'arrêt. En 2022, une amélioration est observée puisque la disponibilité atteint 91,6 %, indiquant une réduction des interruptions de service et une meilleure efficacité des opérations de maintenance. En 2023, le camion enregistre sa meilleure performance avec une disponibilité de 99,1 %, ce qui reflète un excellent niveau de fonctionnement et une maîtrise efficace des défaillances techniques.

En 2024, une baisse notable est constatée, la disponibilité diminuant à 89,9 %, ce qui peut être expliqué par une augmentation des arrêts techniques ou par l'apparition de certaines défaillances nécessitant des interventions de maintenance plus fréquentes. En 2025, la disponibilité augmente légèrement pour atteindre 90,1 %, traduisant une stabilisation des performances sans toutefois retrouver le niveau exceptionnel observé en 2023.

Concernant le camion Caterpillar 775G, la disponibilité reste très élevée et remarquablement stable durant toute la période étudiée. En 2021, elle est de 99,25 %, reflétant une excellente performance opérationnelle et une très faible fréquence des arrêts. En 2022, une légère amélioration est observée avec une disponibilité de 99,41 %, représentant la meilleure valeur enregistrée durant la période étudiée. En 2023, la disponibilité diminue légèrement à 99,26 %, mais demeure à un niveau très élevé, témoignant de la fiabilité importante de l'équipement.

En 2024, la disponibilité atteint 99,35 %, traduisant une amélioration des performances opérationnelles. En 2025, elle enregistre une très légère diminution pour s'établir à 99,32 %. Malgré ces faibles variations, le camion conserve un niveau de disponibilité exceptionnel tout au long de la période étudiée.

Globalement, la comparaison entre les deux engins montre que le Caterpillar 775G présente les meilleures performances de disponibilité sur l'ensemble de la période 2021–2025, avec des valeurs constamment supérieures à 99 %. Le Caterpillar 775F affiche également une disponibilité satisfaisante, mais avec des fluctuations plus marquées, notamment une amélioration importante en 2023 suivie d'une diminution en 2024 et d'une légère reprise en 2025. Ces résultats mettent en

évidence l'efficacité globale des opérations de maintenance appliquées aux deux équipements, tout en soulignant la supériorité opérationnelle du camion 775G, qui assure une continuité de service plus élevée et une meilleure contribution aux activités d'exploitation de la mine de Boukhadra.

La fiabilité et la disponibilité demeurent des indicateurs essentiels de la performance opérationnelle. Elles influencent directement la productivité, la sécurité du personnel ainsi que la durabilité des équipements. Une gestion efficace de la maintenance est donc indispensable pour garantir un niveau de disponibilité stable et optimal.

4.12. Proposition d'un programme de maintenance préventive

4.12.1. Maintenance préventive des systèmes hydrauliques

4.12.1.1. Planification des interventions de maintenance

- Établir un programme d'entretien basé sur les recommandations du constructeur.
- Définir des intervalles réguliers pour les inspections, les vidanges et le contrôle des composants hydrauliques.
- Adapter la planification selon les conditions d'exploitation de la mine.

4.12.1.2. Entretien des fluides hydrauliques

- Vérification régulière du niveau de fluide hydraulique afin d'éviter l'entrée d'air dans le système.
- Contrôle de la viscosité et de la propreté du fluide pour garantir une bonne performance.
- Remplacement du fluide en cas de contamination ou de dégradation.
- Surveillance de la température du fluide à l'aide de capteurs afin d'éviter la surchauffe du système.

4.12.1.3. Vérification des composants hydrauliques

- Inspection des pompes hydrauliques pour détecter les bruits anormaux ou pertes de pression.
- Contrôle des vérins, valves et distributeurs afin de détecter les fuites ou dysfonctionnements.
- Vérification de l'état des flexibles et raccords hydrauliques.

4.12.1.4. Lubrification et étanchéité

- Lubrification régulière des articulations et pièces mobiles.
- Contrôle et remplacement des joints d'étanchéité pour prévenir les fuites.
- Vérification de l'usure des axes et composants mécaniques associés.

4.12.2. Maintenance préventive des systèmes pneumatiques

4.12.2.1. Planification des interventions

- Mise en place d'un calendrier de maintenance basé sur les heures de fonctionnement.
- Inspection périodique des circuits d'air, compresseurs et réservoirs.
- Contrôle systématique du système de freinage pneumatique.

4.12.2.2. Entretien du circuit pneumatique

- Vérification régulière de la pression d'air dans le système.
- Purge des réservoirs afin d'éliminer l'eau et les impuretés.
- Contrôle de la qualité de l'air pour éviter la corrosion interne.
- Surveillance du compresseur pour détecter toute anomalie de fonctionnement.

4.12.2.3. Vérification des composants pneumatiques

- Inspection des compresseurs d'air et détection des bruits anormaux.
- Contrôle des flexibles, conduites et valves pour identifier les fuites.
- Test du système de freinage pneumatique afin de garantir son efficacité.
- Vérification des actionneurs et cylindres pneumatiques.

4.12.2.4. Entretien des filtres et dessiccateurs

- Nettoyage ou remplacement des filtres à air régulièrement.
- Contrôle des dessiccateurs pour limiter l'humidité dans le circuit.
- Maintenance du système de filtration pour assurer une bonne qualité d'air comprimé.

4.13. Conclusion

Ce chapitre présente une étude appliquée sur les camions miniers 775G et 775F de la mine de Boukhadra (Tébessa), basée sur l'analyse des pannes et leur impact sur la performance des équipements. Dans cette étude nous avons appliqué des méthodes de sûreté de fonctionnement,

ETUDE DE CAS (Camion Caterpillar 775F, Camion Caterpillar 775G)

notamment la loi de Pareto et la loi de Weibull, afin de mieux comprendre la répartition et le comportement des défaillances.

Les résultats montrent que les pannes hydrauliques sont les plus dominantes en termes de fréquence et de durée d'arrêt, suivies des pannes électriques, tandis que les pannes mécaniques sont moins importantes. Une similarité des défaillances entre les deux types de camions a également été observée, liée aux mêmes conditions d'exploitation et au contexte minier.

L'analyse de la fiabilité et de la disponibilité a révélé des variations importantes au fil des années, dues principalement à l'insuffisance de la maintenance préventive et aux conditions d'exploitation difficiles.

Ainsi, un programme de maintenance préventive a été proposé, basé sur la planification, le suivi régulier et l'amélioration du contrôle des systèmes hydrauliques, ainsi que sur le renforcement de la formation du personnel et l'utilisation de la GMAO.

En conclusion, l'amélioration des performances des camions 775G et 775F nécessite une approche globale basée sur l'analyse des données, la maintenance préventive et l'optimisation des ressources humaines et techniques afin de réduire les arrêts et assurer la continuité de production.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale

Au terme de ce travail, une étude approfondie des concepts de sûreté de fonctionnement appliqués aux camions miniers Caterpillar 775F et Caterpillar 775G exploités au niveau de la mine de Boukhadra a été réalisée. Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance de la maintenance et de l'analyse de la fiabilité dans l'amélioration des performances des équipements de transport utilisés dans les exploitations minières.

Dans un premier temps, nous avons présenté les notions générales relatives à la maintenance ainsi que ses différentes formes, notamment la maintenance corrective, préventive et prédictive. Nous avons également étudié les concepts fondamentaux de la fiabilité, de la disponibilité et de la maintenabilité, tout en mettant l'accent sur les lois statistiques utilisées dans l'analyse des défaillances, en particulier la loi de Weibull.

Par ailleurs, l'étude des moyens de transport dans les mines à ciel ouvert a montré le rôle essentiel des camions miniers dans le processus d'exploitation. Grâce à leur flexibilité et à leur grande capacité de transport, ces équipements constituent un élément clé dans l'amélioration de la productivité des carrières et des mines. Cependant, les conditions de travail difficiles rendent ces équipements vulnérables à de nombreuses défaillances qui influencent directement le rendement de l'exploitation.

L'étude pratique réalisée sur les camions Caterpillar 775F et 775G a permis d'analyser l'historique des pannes, les heures d'arrêt ainsi que les différentes natures de défaillances enregistrées. Les résultats obtenus ont montré que les pannes hydrauliques et pneumatiques représentent les proportions les plus importantes des défaillances et des arrêts enregistrés. Pour le camion 775F, les pannes pneumatiques représentent environ 31 % du total des pannes, tandis que les pannes hydrauliques atteignent environ 28 %, suivies des pannes mécaniques avec près de 18 %. Concernant le camion 775G, les résultats ont également révélé la domination des pannes hydrauliques et pneumatiques par rapport aux autres types de défaillances, ce qui confirme leur impact direct sur la productivité et la continuité du travail.

L'étude a également montré que les indicateurs de disponibilité et de fiabilité varient d'une année à une autre selon les conditions d'exploitation, les heures de fonctionnement et la nature des

interventions réalisées. L'application des outils d'analyse tels que le diagramme de Pareto, le diagramme d'Ishikawa et la loi de Weibull a permis d'identifier les défaillances critiques et de mieux comprendre le comportement des équipements au cours du temps, ce qui a contribué à proposer des solutions pratiques visant à améliorer les performances des camions et à réduire les temps d'arrêt.

Enfin, cette étude a confirmé que la mise en œuvre d'une politique de maintenance préventive efficace, associée à une bonne gestion des interventions et des pièces de rechange, contribue considérablement à l'amélioration de la disponibilité et de la fiabilité des camions miniers. Elle permet également de réduire les coûts de maintenance, d'augmenter la durée de vie des équipements et d'assurer une meilleure continuité de la production.

Ainsi, la sûreté de fonctionnement constitue aujourd'hui un outil indispensable pour optimiser les performances industrielles et garantir une exploitation minière plus efficace, plus économique et plus sécurisée.

- [1] « 3-Generalites-de-la-maintenance.pdf ». Consulté le : 25 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.technologuepro.com/Mecanique/Etude-des-systemes-hydrauliques/3-Generalites-de-la-maintenance.pdf>
- [2] J. Hég, *Pratique de la maintenance préventive : mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, froid*, 4e éd. In Collection Technique & ingénierie. Malakoff : Dunod, 2017.
- [3] « Introduction à la Maintenance conditionnelle.pdf ». Consulté le : 26 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/Introduction%20%C3%A0%20la%20Maintenance%20conditionnelle.pdf>
- [4] « maintenance_surete_de_fonctionnement-decouverte-dr-salima-drid.pdf ». Consulté le: 25 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur : https://elt.univ-batna2.dz/sites/default/files/elct/files/maintenance_surete_de_fonctionnement-decouverte-dr-salima-drid.pdf
- [5] « 2108832017125371.pdf ». Consulté le : 29 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://bucket.theses-algerie.com/files/repositories-dz/2108832017125371.pdf>
- [6] « Chapitre I Généralité sur la maintenance ».
- [7] « Nebba-Walid.pdf ». Consulté le : 15 février 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/05/Nebba-Walid.pdf>
- [8] « maintenance_surete_de_fonctionnement-decouverte-dr-salima-drid.pdf ». Consulté le : 12 février 2026. [En ligne]. Disponible sur : https://elt.univ-batna2.dz/sites/default/files/elct/files/maintenance_surete_de_fonctionnement-decouverte-dr-salima-drid.pdf
- [9] « Surveillance vibratoire et maintenance prédictive », Techniques de l'Ingénieur. Consulté le: 23 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesures-acoustiques-et-vibratoires-42420210/surveillance-vibratoire-et-maintenance-predictive-r6100/>
- [10] « Cours 1MIMST M1.pdf ». Consulté le: 18 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/Cours%201MIMST%20M1.pdf>
- [11] « Analyse des Défaillances Mécaniques | PDF | Ingénierie mécanique », Scribd. Consulté le: 18 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/document/875853447/CM-3-Analyse-Quantitative-Des-Defaillances-M3202-AE2-DGC>
- [12] « Concepts de la Sûreté de Fonctionnement | PDF | Sécurité | Ingénierie des systèmes », Scribd. Consulté le: 18 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/document/628017369/Chpitre-1-Concepts-de-La-SdF>

- [13] « Chapitre I ». Consulté le: 13 février 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/djebabra_mebarek/files/chapitre_i_01.pdf
- [14] « Chapitre I : Fiabilité, Maintenabilité et la Disponibilité ».
- [15] « REGHIS- KENZA.pdf ». Consulté le: 19 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/11581/1/REGHIS-%20KENZA.pdf>
- [16] « Les temps de fiabilité - بحث Google ». Consulté le: 13 février 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?q=Les+temps+de+fiabilit%C3%A9&oq=Les+temps+de+fiabilit%C3%A9&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIICAQABgWGB4yBwgCEAAAY7wUyBwgDEAAAY7wUyBwgEEAAAY7wUyCggFEAAAYogQYiQUyCggGEAAAYogQYiQXSAAQoyNjk5NmowajE1qAllsAIB8QXF2rK6OogySw&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- [17] « Écoconception 3 ». Consulté le: 20 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://jackadit.com/index.php?p=indus3>
- [18] B. Abdelhk, « Spécialité : Maintenance Industrielle ».
- [19] « Comment calculer et optimiser la disponibilité en maintenance ? », <https://www.gmao.com/>. Consulté le: 20 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gmao.com/gestion-maintenance/la-disponibilite-en-maintenance/>
- [20] H. Kaffel, « LA MAINTENANCE DISTRIBUÉE : CONCEPT, ÉVALUATION ET MISE EN ŒUVRE ».
- [21] « chapitre_02_-_lois_usuelles_1.pdf ». Consulté le: 23 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/serrar_mohamededdine/files/chapitre_02_-_lois_usuelles_1.pdf
- [22] « Loi de Weibull et fiabilité des systèmes | PDF | Analyse statistique | Enseignement des mathématiques », Scribd. Consulté le: 23 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/document/694551211/MCO-S8>
- [23] « République Algérienne Démocratique et Populaire ».
- [24] « Approche Probabiliste de la Fiabilité | PDF | Variable aléatoire | Loi de probabilité », Scribd. Consulté le: 23 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/document/440358212/03-La-Fiabilite>
- [25] « I – STRUCTURE GENERALE D'UN SYSTEME AUTOMATISE : » Consulté le: 23 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.univ-oeb.dz/fssa/wp-content/uploads/2020/03/Chapitre-1-2-3-La-Fiabilit%C3%A9.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [26] « Chapitre 4 partie 1.pdf ». Consulté le: 17 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : https://elearning-deprecated.univ-annaba.dz/pluginfile.php/43452/mod_resource/content/1/Chapitre%204%20partie%201.pdf
- [27] « Chapitre N° 2.pdf ». Consulté le : 17 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://elearning-deprecated.univ-annaba.dz/pluginfile.php/65732/mod_resource/content/1/Chapitre%20N%C2%B0%202.pdf

- [28] « Optimisation du transport minier à MIBA | PDF | Exploitation minière | Carrière (géologie) », Scribd. Consulté le : 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/514444674/TFC-Blaise-Optimisation-des-moyens-de-transport-2>
- [29] « Transport par Convoyeur à Bande | PDF », Scribd. Consulté le : 17 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/849578542/Transport-par-convoyeur-a-bande>
- [30] « Convoyeur à bande pour mines : guide de sélection complet ». Consulté le : 17 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : [https://conveyorbeltchn.com/fr/mining-conveyor-belt-systems/?utm_source=chatgpt.comnationale-des-transports-ferroviaires-%20\(3\).pdf](https://conveyorbeltchn.com/fr/mining-conveyor-belt-systems/?utm_source=chatgpt.comnationale-des-transports-ferroviaires-%20(3).pdf)
- [31] « Transport Minier : Introduction | PDF | Piston | Moteur diesel », Scribd. Consulté le : 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/1007574537/T-M-1>
- [32] « Choix d'engins de transport minier à Débélé | PDF | Exploitation minière », Scribd. Consulté le : 17 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/849288562/BAH-RAPPORT-repare>
- [33] I. K. Bakhti, « Noms et prdnoms des dtudiants » :
- [34] « Transport et chargement minier efficace | PDF | Exploitation minière | Transport », Scribd. Consulté le : 17 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/697421452/T-M>
- [35] « Chargement et Transport Minier | PDF | Exploitation minière | Chargeur sur pneus », Scribd. Consulté le : 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/813634972/Cours-Transport-Minier-1>
- [36] « COJALI | Composants pour véhicules industriels ». Consulté le : 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.cojaliparts.com/fr/nouveaut%C3%A9s-%C3%A9v%C3%A9nements/176/les-pannes-les-plus-frequentes-dans-les-camions-tout-ce-que-vous-devez-savoir/>
- [37] « Transport par Camion en Géotechnique | PDF | Exploitation minière | Transport », Scribd. Consulté le : 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/692665239/Geotechnique-Et-Techniques-Minieres-2023-Master-i-Geotechnique-Transport-Discontinu-Par-Camion-Okdms-1>

ANNEXE TABLEAUX

Tableau 01 : fiche technique Camion 775F

Caractéristiques	Valeurs
Poids	45.1 t
Largeur en transport	5.30 m
Largeur pneus	24.00 R35
Type de moteur	C27 ACERT
Cylindrée	27 L
Longueur en transport	9.22 m
Hauteur en transport	4.11 m
Fabricant du moteur	Caterpillar
Puissance moteur	544 kW

Tableau 02 : fiche technique Camion 775G

Caractéristiques	Valeurs
Poids	50.2 t
Largeur en transport	5.01 m
Largeur pneus	24.00 R35
Type de moteur	C27 ACERT
Cylindrée	27 L
Longueur en transport	10.07 m
Hauteur en transport	4.46 m
Fabricant du moteur	Caterpillar
Puissance moteur	578 kW

Tableau 03 : Heures d'arrêts en fonction d'années Camion 775F

Année	HYD	PNEU	MEC	ELC	Autres
2021	1397	1889.5	760.5	167	691
2022	632.5	743	461.5	47	0
2023	38.5	0	14	0	5
2024	1175	1314.5	735	176	272
2025	1210.5	1409.5	585	128	346.5

Tableau 04 : Nombre de pannes en fonction d'années Camion 775F

Année	HYD	PNEU	MEC	ELC	AUTRE
2021	10	14	5	2	3
2022	3	5	1	0	1
2023	2	0	1	0	1
2024	6	8	4	3	2
2025	5	9	2	1	3

Tableau 05 : Heures d'arrêts en fonction d'années Camion 775G

Année	HYD	PNEU	MEC	ELC	Autres
2021	105.5	90	25	62	24
2022	38.5	34	14	26	11
2023	210	175.5	70	120	43
2024	1085.5	920	247	523	190
2025	1820.5	1550	404	896	295

Tableau 06 : Nombre de pannes en fonction d'année Camion 775G

Année	HYD	PNEU	MEC	ELC	AUTRE
2021	8	9	3	6	2
2022	4	3	2	4	2
2023	16	14	8	11	8
2024	27	25	13	19	10
2025	34	33	17	23	15

Tableau 07 : table 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	5,0291	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	6,46	1,75	0,8906	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
0,80	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	0,9603	0,934	2,7	0,8893	0,355	5,7	0,9251	0,188
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	0,9318	0,168
			3,6	0,9011	0,278	6,6	0,9325	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	0,160

Tableau 08 : TBF 775F (2021)

2021		
Ordre i	TBF	Fi
1	52	0,028
2	58	0,067
3	61	0,106
4	65	0,146
5	69	0,185
6	73	0,224
7	77	0,264
8	81	0,303
9	86	0,343
10	91	0,382
11	96	0,421
12	101	0,461
13	107	0,500
14	113	0,539
15	119	0,579
16	126	0,618
17	133	0,657
18	141	0,697
19	149	0,736
20	158	0,776
21	168	0,815
22	179	0,854
23	191	0,894
24	204	0,933
25	218	0,972

Tableau 09 : TBF 775F (2022)

2022		
Ordre i	TBF	Fi
1	76	0,049
2	82	0,118
3	89	0,188
4	97	0,257
5	118	0,326
6	134	0,396
7	141	0,465
8	152	0,535
9	165	0,604
10	173	0,674
11	185	0,743
12	206	0,813
13	211	0,882
14	243	0,951

Tableau 10 : TBF 775F (2023)

2023		
Ordre i	TBF	Fi
1	72	0,067
2	81	0,163
3	89	0,260
4	94	0,356
5	97	0,452
6	106	0,548
7	117	0,644
8	124	0,740
9	128	0,837
10	135	0,933

Tableau 11 : TBF 775F (2024)

2024		
order i	TBF	F i
1	73	0,034
2	78	0,083
3	82	0,132
4	84	0,181
5	87	0,230
6	91	0,279
7	95	0,328
8	99	0,377
9	104	0,426
10	109	0,475
11	118	0,525
12	121	0,574
13	126	0,623
14	132	0,672
15	137	0,721
16	137	0,770
17	143	0,819
18	147	0,868
19	156	0,917
20	164	0,966

Tableau 12 : TBF 775F (2025)

2025		
order i	TBF	F i
1	72	0,031
2	81	0,076
3	89	0,121
4	94	0,165
5	97	0,210
6	106	0,254
7	117	0,299
8	124	0,344
9	128	0,388
10	135	0,433
11	142	0,478
12	153	0,522
13	163	0,567
14	168	0,612
15	176	0,656
16	185	0,701
17	197	0,746
18	201	0,790
19	214	0,835
20	224	0,879
21	231	0,924
22	243	0,969

Tableau 13 : TBF G (2021)

2021		
order i	TBF	F i
1	64	0,034
2	76	0,083
3	81	0,132
4	89	0,181
5	92	0,230
6	98	0,279
7	103	0,328
8	119	0,377
9	127	0,426
10	132	0,475
11	145	0,525
12	156	0,574
13	164	0,623
14	173	0,672
15	187	0,721
16	195	0,770
17	210	0,819
18	225	0,868
19	241	0,917
20	251	0,966

Tableau 14 : TBF G (2022)

2022		
order i	TBF	F i
1	67	0,045
2	74	0,110
3	82	0,175
4	93	0,240
5	96	0,305
6	110	0,370
7	118	0,435
8	125	0,500
9	142	0,565
10	156	0,630
11	171	0,695
12	178	0,760
13	188	0,825
14	201	0,890
15	224	0,955

Tableau 15 : TBF G (2023)

2023		
order i	TBF	F i
1	98	0,028
2	101	0,067
3	119	0,106
4	132	0,146
5	145	0,185
6	148	0,224
7	165	0,264
8	171	0,303
9	176	0,343
10	187	0,382
11	224	0,421
12	240	0,461
13	255	0,500
14	278	0,539
15	284	0,579
16	298	0,618
17	312	0,657
18	329	0,697
19	340	0,736
20	356	0,776
21	371	0,815
22	390	0,854
23	402	0,894
24	427	0,933
25	443	0,972

Tableau 16 : TBF G (2024)

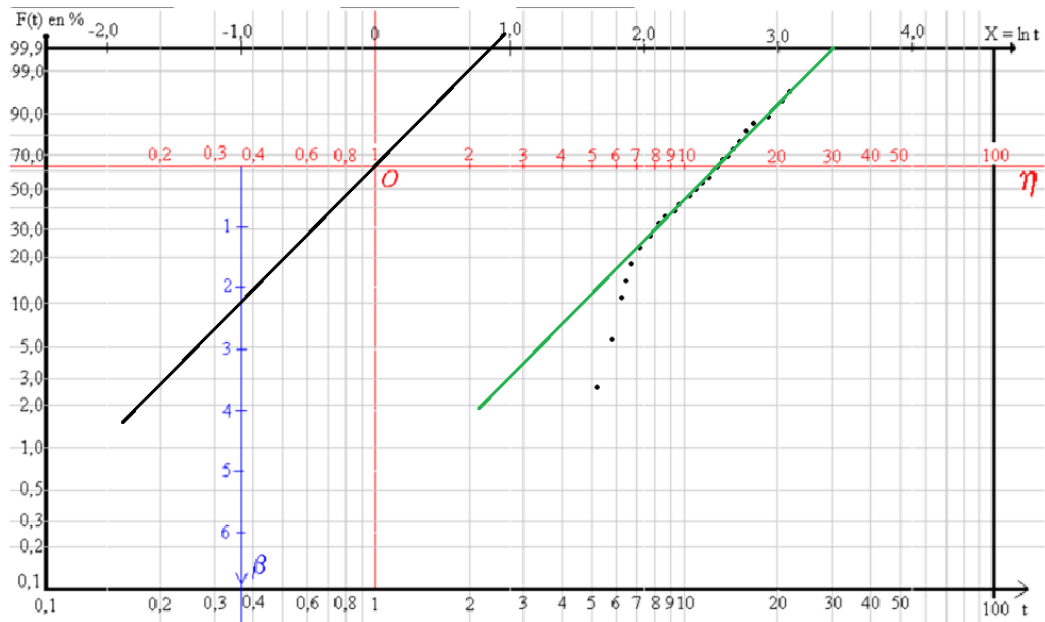
2024		
order i	TBF	F i
1	192	0,023
2	225	0,056
3	237	0,089
4	259	0,122
5	271	0,155
6	285	0,188
7	304	0,220
8	321	0,253
9	333	0,286
10	347	0,319
11	358	0,352
12	392	0,385
13	418	0,418
14	418	0,451
15	441	0,484
16	451	0,516
17	489	0,549
18	504	0,582
19	528	0,615
20	547	0,648
21	576	0,681
22	592	0,714
23	613	0,747
24	631	0,780
25	662	0,813
26	685	0,845
27	706	0,878
28	710	0,911
29	749	0,944
30	781	0,977

Tableau 17 : TBF G (2025)

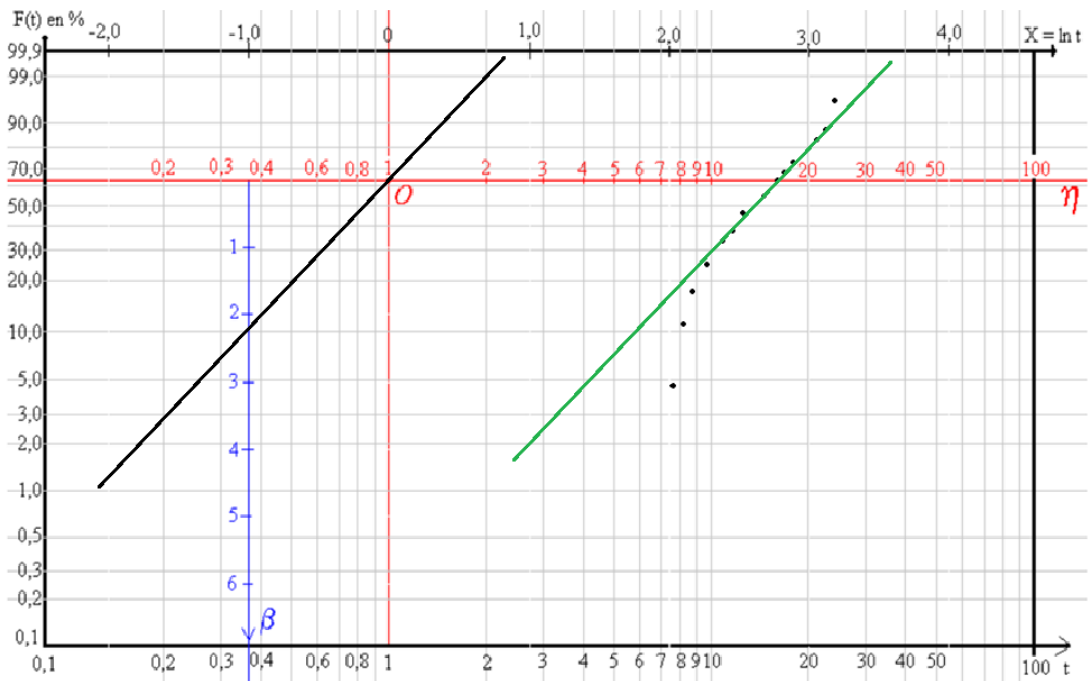
2025		
order i	TBF	F i
1	267	0,023
2	284	0,056
3	296	0,089
4	312	0,122
5	338	0,155
6	359	0,188
7	381	0,220
8	405	0,253
9	417	0,286
10	433	0,319
11	472	0,352
12	501	0,385
13	522	0,418
14	529	0,451
15	548	0,484
16	613	0,516
17	648	0,549
18	671	0,582
19	714	0,615
20	756	0,648
21	786	0,681
22	823	0,714
23	862	0,747
24	892	0,780
25	914	0,813
26	935	0,845
27	1048	0,878
28	1085	0,911
29	1174	0,944
30	1203	0,977

ANNEXE FIGURES

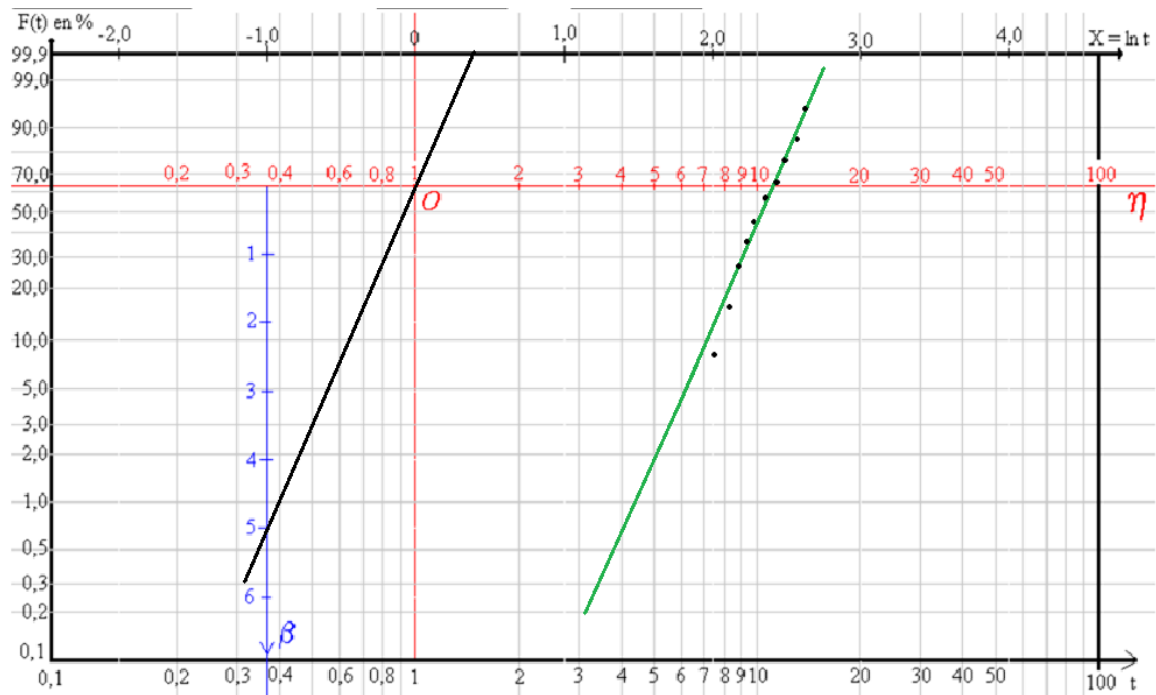
Annexe 01 : Camion 775F 2021



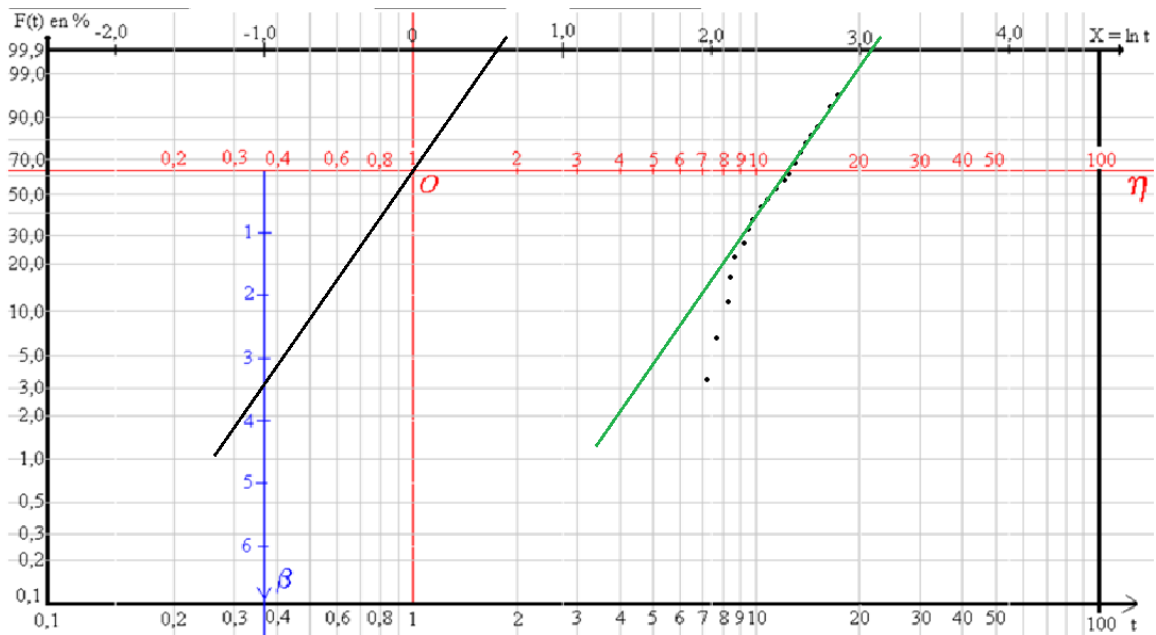
Annexe 02 : Camion 775F 2022



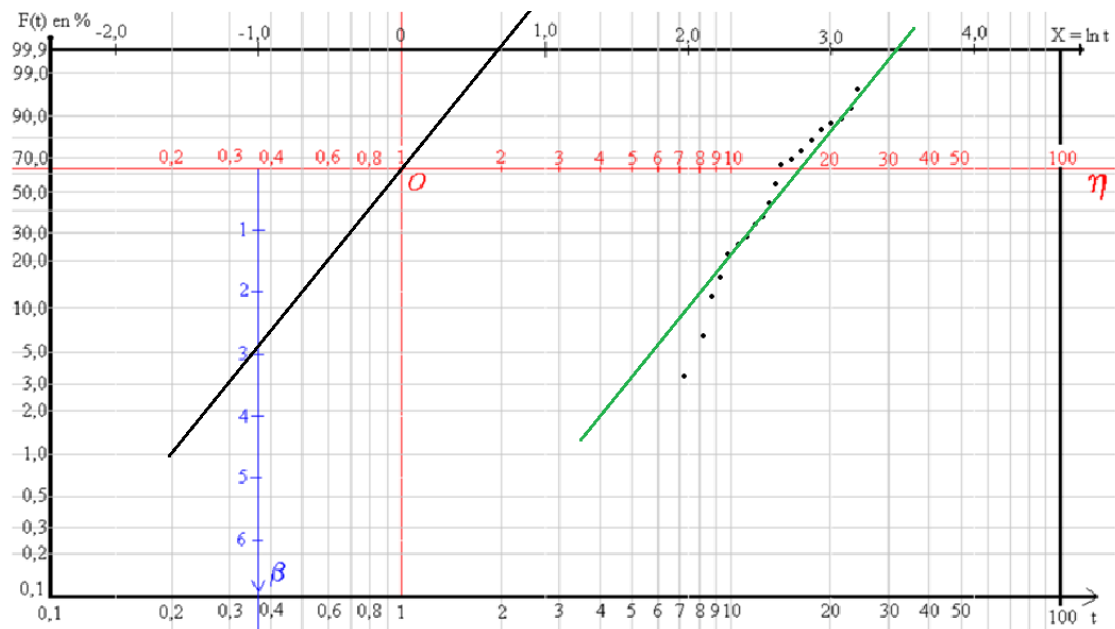
Annexe 03 : Camion 775F 2023



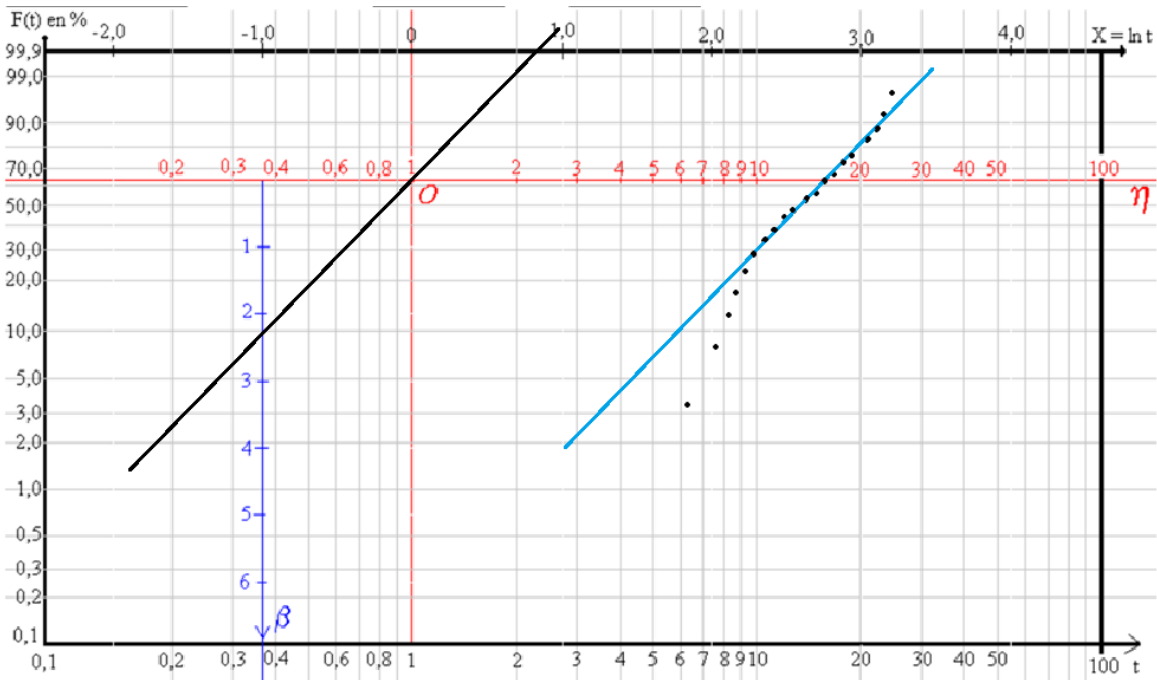
Annexe 04 : Camion 775F 2024



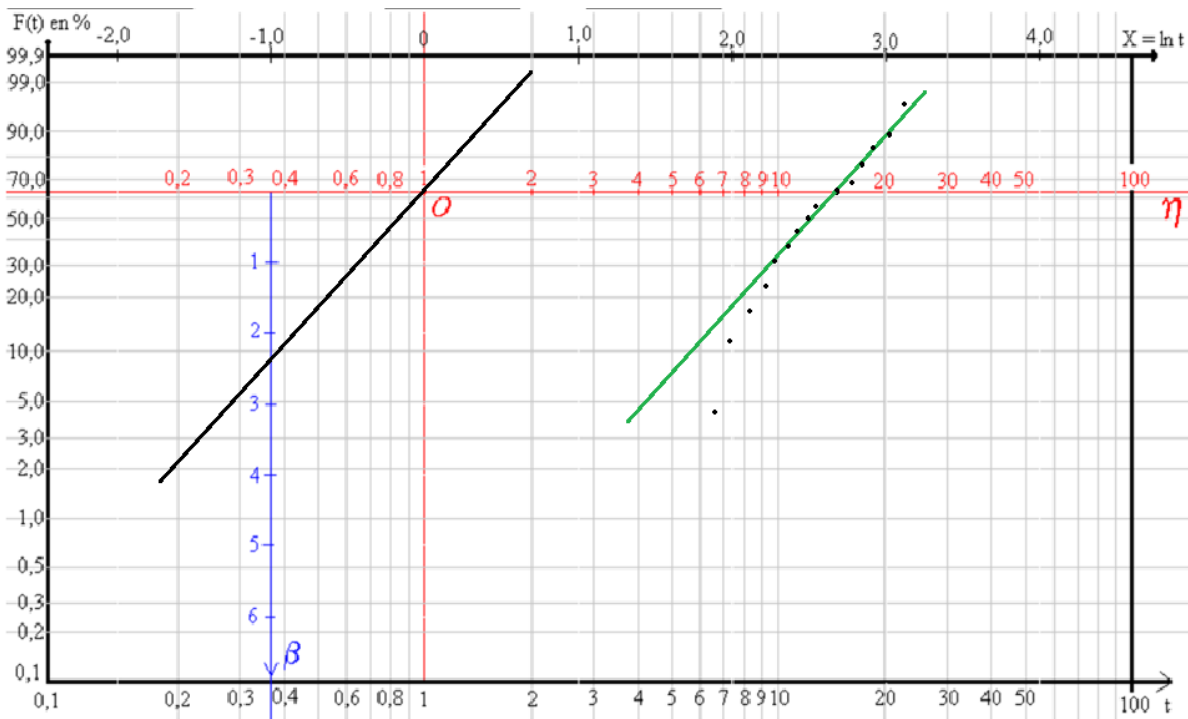
Annexe 05 : Camion 775F 2025



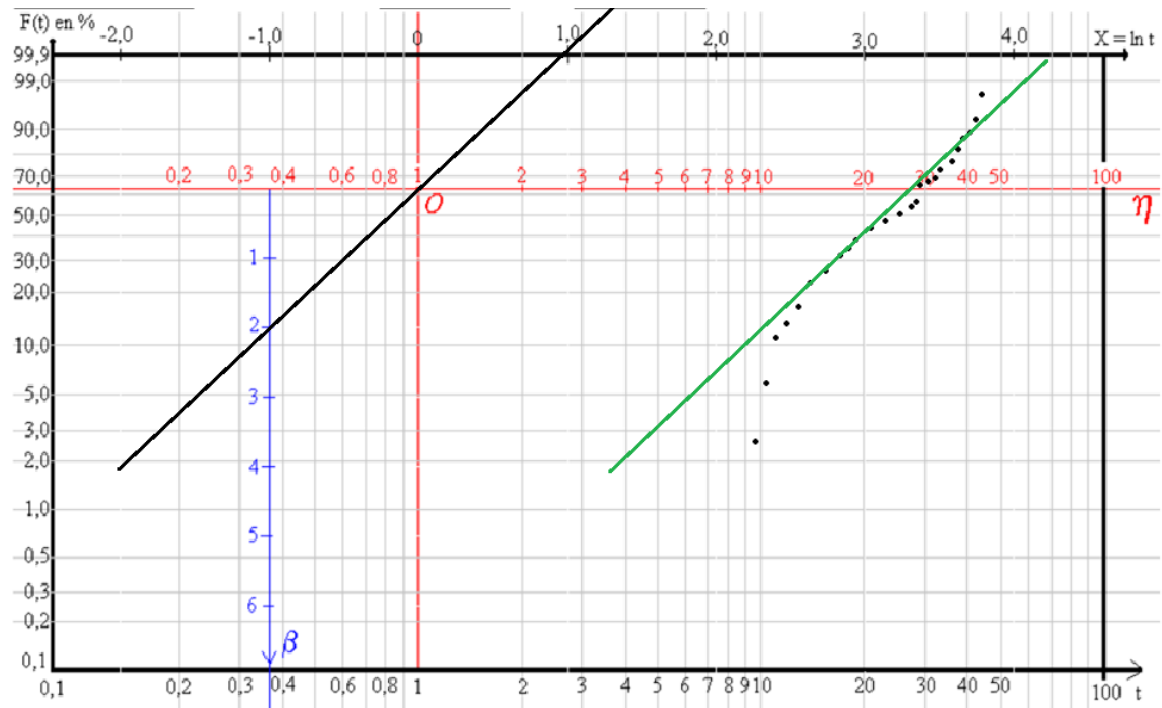
Annexe 06 : Camion 775G 2021



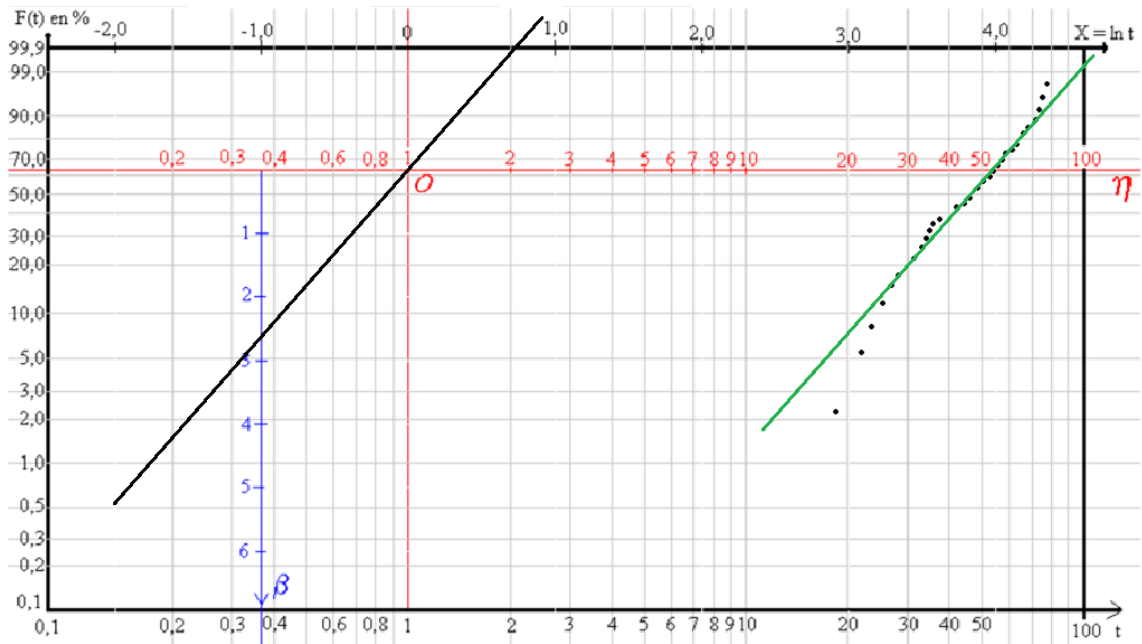
Annexe 07 : Camion 775G 2022



Annexe 08 : Camion 775G 2023



Annexe 09 : Camion 775G 2024



Annexe 10 : Camion 775G 2025

