

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE  
EL-HARRACH

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة



POLYCOPIE COURS DISPENSE POUR LES CINQUIEMME  
ANNEE MACHINISME ET AGROEQUIPEMENTS  
ENTRETIEN ET REPARATIONS EN MACHINISME AGRICOLE

PRESENTEE PAR Mme GUEDIOURA ILHAM





## Avants propos

Ce polycopié de cours d'entretien et réparation s'adresse aux étudiants de 5eme année ingénieur et master en dans la spécialité machinisme et agroéquipements poursuivant leur cursus à L'école Nationale Supérieure d'Agronomie. les différentes stratégies et techniques qui sont misent en œuvre pour permettre à une utilisation optimale des machines dans une situation bien déterminée en fonction de leur domaine de travail. L'intérêt est porté sur l'analyse des indicateurs de la maintenance tels que la fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD), qui est un concept très important dans l'étude de la sureté fonctionnement des machines. les autres volets mis en œuvre dans ce cours est la connaissance des frottements des pièces et organes avec comme conséquences l'usure et comme remède le graissage.



## Table des matières

Chapitre 1 : La maintenance dans le domaine de l'agriculture.....	5
<u>1 - Introduction</u> .....	2
<u>2-Définition de la maintenance</u> :.....	3
<u>2.1-Selon Larousse</u> :.....	3
2.2-Selon l'association : .....	3
3-Histoire du mot « maintenance » :.....	4
<u>3.1</u> Les notions de la maintenance : .....	4
4- Les domaines de la maintenance.....	4
5- entretien ou maintenance ?.....	5
.....	5
6- Quelques terminologies utilisées dans la maintenance : .....	5
7-Missions et objectifs de la maintenance : .....	7
7.1-Structure générale de la maintenance : .....	8
<u>8</u> -Les différents types de la maintenance : .....	8
8.1- Maintenance corrective : maintenance effectuée après défaillance. ....	9
8.1.1- Maintenance palliative :.....	10
8.1.2- Maintenance curative : .....	10
8.2 Maintenance préventive : .....	10
8.2.1- Objectifs de la maintenance préventive :.....	10
8.2.2.1 Maintenance préventive systématique : .....	10
8.2.2.2 Maintenance préventive conditionnelle :.....	11
<u>9</u> -Les niveaux de la maintenance :.....	11
<u>10</u> -Les différents indicateurs de la maintenance :.....	13
10.1 Fiabilité, maintenabilité et disponibilité (Analyses FMD):.....	13
10.1.1 Fiabilité: .....	13
10.1.2 Maintenabilité: .....	13
10.1.3 Disponibilité: .....	13
<u>10.2</u> - Le calcul des indicateurs de FMD : .....	14
10.2.1 Les indicateurs utilisés au calcul de fiabilité :.....	14
10.2.1.a- MTBF , Mean Time Between Failure .....	14
10.2.2 Les indicateurs utilisés au calcul de la maintenabilité : .....	15
10.2.2.b-MTTR (Mean Time To Repair), .....	15
<u>10.2.3</u> -Les indicateurs utilisés au calcul de la Disponibilité :.....	15
10.2.3.c-.....	15
Chapitre 2 : Exemples de maintenance au niveau du tracteur et matériel agricole.....	17



<b>1-tracteur</b> .....	<b>18</b>
1.1.1 - Entretien journalier .....	18
1.1.2 - Entretien périodique .....	18
<b>2 Le moteur :</b> .....	<b>20</b>
2.1.1 Le système d'alimentation en carburant: .....	20
2.1.2 Le système de refroidissement : .....	20
<b>3 -Exemples de maintenance au niveau du matériel agricole</b> .....	<b>22</b>
3.1 Entretien de la moissonneuse batteuse .....	22
<b>3.1.1-Contrôle des courroies et des chaînes</b> .....	<b>23</b>
3.1.2-Contrôle des lames et des couteaux .....	23
3.2 Entretien du pulvérisateur .....	24
<b>4. Les outils d'aide à la décision de la maintenance</b> .....	<b>24</b>
4.1- Outils mathématiques : .....	24
4.2- Outils organisationnels .....	24
4.2.1-La méthode AMDEC .....	25
4.3- Outils informatiques .....	25
4.3.1- Exemple de logiciel de GMAO : .....	25
4.3.1.1 Twimm .....	25
4.3.1.2-UpKeep .....	25
<b>4.3.1.3-Fiix</b> .....	<b>26</b>
<b>Chapitre 3: Tribologie</b> .....	<b>27</b>
1-Introduction .....	28
2. Historique de la tribologie : .....	28
3- Les trois fondamentaux de la tribologie : .....	29
4. Les frottements (causes des usures) .....	30
4.1 Définition des frottements .....	30
4.1.1 Définition d'une surface : .....	31
4.1.2 Types de contact : .....	32
4.1.2.a- conséquences du contact proprement dit : .....	33
4.1.2.b- Impact de l'environnement (atmosphère, lubrifiant...) : .....	33
4.2- Les deux types de frottements .....	34
4.2.1. - frottement statique .....	34
4.2.2 - frottement dynamique .....	34
4.3.3 Appareil de mesure du frottement .....	35
<b>Chapitre 4 : Etude des usures</b> .....	<b>37</b>
1-Introduction .....	38



2-Usures des pièces et organes : .....	38
3- Classification des types d'usures : .....	40
4- Les nombreuses formes d'usures sont classées en plusieurs groupes :.....	40
Conséquences.....	41
5.1 -Usures abrasives :.....	41
5.1.1 -L'abrasion à deux corps :.....	42
5.1.2- L'abrasion à trois corps : .....	42
5.1.3-L'érosion, .....	43
5.2- Usures adhésives : .....	43
5.3 Usures corrosives (usure chimique) : .....	44
5.4 Usures par fatigue :.....	45
6- L'usure des pneumatiques .....	46
6.1-Introduction .....	46
6.2-Diagnostic des pneus usés ou endommagés : .....	46
6.2.1-Coupure profonde au niveau de l'épaule du pneu.....	47
6.2.2-Témoins d'usure .....	47
Chapitre 5 : La lubrification et graissage .....	49
1-L'origine les huiles des moteurs : .....	50
1.1 <i>Le processus d'obtention de ces huiles n'est pas parfait</i> :.....	51
1.2-Types de lubrification : .....	53
1.2.1-Hydrodynamique :.....	53
1.2.2-Hydrostatique :.....	53
1.2.3-Elastohydrodynamique : .....	53
1.3Principaux organes à lubrifié:.....	53
1.4-Types de graissage:.....	53
1.4.1-Le graissage ordinaire sous pression.....	53
1.5 Les caractéristiques et classification des huiles : .....	54
1.5.1 Classification selon la viscosité : .....	54
1.5.1.2 Indice de viscosité (IV) :.....	54
1.5.2. La classification SAE : .....	54
1.5.2.1 Comment lire le bidon d'huile moteur .....	56
1.5.3 La classification selon les performances :.....	57
1.5.3.A La classification GL : Transmissions mécaniques.....	57
1.5.3.B La classification API.....	58
1.5.3.C Classification CCMC.....	58
6.1 Comment appliquer la graisse ?.....	60

Référence : .....





## Chapitre 1

### La maintenance dans le domaine de l'agriculture



## 1 - Introduction

La maintenance des installations industrielles est devenue un point clé lors de la planification et de l'exploitation, tant du point de vue sécurité et de fiabilité que des questions économiques. Par exemple, l'arrêt de la production pour des travaux de maintenance sur une chaîne de montage Peugeot peut coûter jusqu'à 1 million de francs par jour. Même un entretien insuffisant de l'installation peut conduire à des situations critiques dangereuses non seulement pour les personnes, mais aussi pour l'installation et l'environnement.

Dans le système agricole, la machine travaillant dans des milieux bien spécifiques et réglée correctement doit assurer des exigences agro techniques pour une bonne gestion de la campagne agricole. Elle doit assurer aussi, une fiabilité, une longévité et surtout une sécurité du travail. Ainsi elle sera considérée comme une bonne machine utilisable.

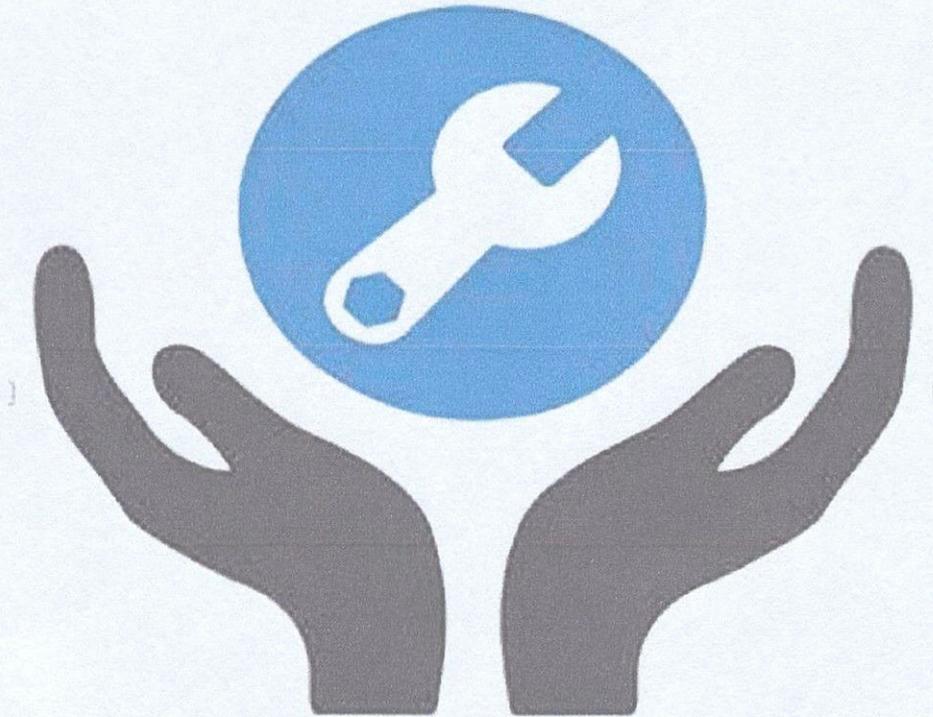
En même temps, une machine défectueuse est une machine dont l'état ne lui permet pas de satisfaire une seule de ses exigences requises qui sont établis par les normes techniques. Aussi, pour l'amélioration de la productivité dans le domaine de l'agriculture, il est indispensable que les machines qui assurent des travaux soient disponible et en bonne état de fonctionnement, cette disponibilité nécessite une maintenance, donc des entretiens et des inspections minutieux. Le maintien des équipements de production en état de marche est un enjeu clé pour la productivité et pour la qualité des produits. C'est un défi industriel impliquant la remise en cause des structures figées actuelles et la promotion de méthodes adaptées à la nature nouvelle du matériel.

Les tracteurs agricoles sont impliqués dans la plupart des exécutions de travaux d'une façon comme moyen de traction et/ou d'entraînement via des arbres de prise de force, des arbres à cardan, des poulies, des courroies, des moteurs hydrauliques, des vérins, etc. Pour prolonger sa durée de vie, assurer sa viabilité économique et assurer une sécurité d'utilisation maximale, il est nécessaire de respecter des règles élémentaires tout au long de sa vie. Entretien préventif quotidien et régulier, entretien précis, ponctuel et rapide des tracteurs agricoles.

L'une des priorités lors de l'utilisation d'un tracteur agricole est l'entretien quotidien régulier. Étant donné que cette tâche est essentielle à son bon fonctionnement, ce polycopie est destiné pour informer les utilisateurs des problèmes possibles si cette tâche est ignorée. Il est destiné aux utilisateurs, opérateurs, industriels, techniciens et consultants dont le métier est d'encadrer



les agriculteurs. (Conduite, réglages, sécurité, etc.). Une maintenance courte ou insuffisante augmente la fréquence des pannes et par conséquent le coût de réalisation des travaux (longs temps d'attente et de réparation, consommation importante de pièces de rechange, pouvant souvent entraîner une détérioration ou une perte de production ou de qualité, qui peut être coûteuse et indisponible).



## 2- Définition de la maintenance :

Ensemble des moyens nécessaires déployés afin de permettre à un système d'être maintenue dans un état de fonctionnement.

### 2.1 Selon Larousse :

La maintenance est l'ensemble de tous ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement.

### 2.2 Selon L'Association française de Normalisation (AFNORX60-010-1994) :

c'est l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction



requis. Ces activités sont une combinaison d'activités technique, administratives et de management.

➤ **Bien maintenir, c'est assurer ces actions au coût optimal.**

**3-Histoire du mot « maintenance » :**

Maintenance est un mot qui sort ses racines des mots latins MANUS et TENERE et c'est qu'au XII siècle qu'il rentre dans la langue française. Le mot utilisait uniquement dans le vocabulaire militaire maintien des unités de combat, repris par l'industrie appliqué aux unités de reproduction défectueuse.

**3.1- Les notions de la maintenance :**

Dans le mot maintenance d'où on fait ressortir le verbe « **Maintenir** », nous rencontrons la notion de « **prévention** » sur un système en fonctionnement, et « **Rétablir** » qui contient la notion de « **correction** » consécutive à une perte de fonction, ainsi que l'état spécifié ou service déterminé : implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques, étymologiquement, il signifiait au Moyen Âge : *protéger, gouverner* et, déjà ! *Entretenir*. Il avait donné naissance à deux dérivés : maintenance et maintenant, qui avaient fort logiquement le sens de : *protection, pouvoir et préservation*.

**4- Les domaines de la maintenance**

- ▶ -L'aéronautique et espace,
- ▶ -L'industrie agroalimentaire, automobile, - chimie et pharmacie,
- ▶ -Fabrication de matériels ferroviaires et navals,
- ▶ -Fabrication de machines et équipements,
- ▶ -Fabrication d'équipements électriques et électroniques
- ▶ -Fabrication d'équipements de télécommunications,
- ▶ -Fabrication de matériel informatique,
- ▶ -Métallurgie
- ▶ - Nucléaire,
- ▶ -Pétrole.
- ▶ - Ingénierie, études techniques et maintenance
- ▶ -Construction bâtiments industriels



- L'importance de la maintenance diffère selon le secteur d'activité :

- ▶ La maintenance sera inévitable et lourde dans les secteurs où la sécurité est capitale.
- ▶ Inversement, les industries manufacturières à faible valeur ajoutée pourront se satisfaire d'un entretien traditionnel et limité.

5- entretien ou maintenance ?

Le terme maintenance est apparu en 1950 aux états unis mais en France le vocable entretenir se maintenait parfaitement, progressivement et en fonction de l'apparition des défaillances maintenir devient entretien mais « maintenance corrective ». Entretenir c'est subir le matériel.

La figure ci-dessous montre la transition entre entretien et maintenance

Entretien	Maintenance
Subir les défaillances	Maîtriser les temps de fonctionnement et de maintenance
Statique : aucune amélioration et aucune optimisation	Dynamique : amélioration continue pour des objectifs toujours plus ambitieux
Cloisonnement par rapport aux autres fonctions	Coopération avec les autres fonctions : partage des objectifs et des actions
Entretien sans se soucier de son coût	Recherche du coût minimal de maintenance
Entretien dépendant de la production	Maintenance au même niveau hiérarchique que production

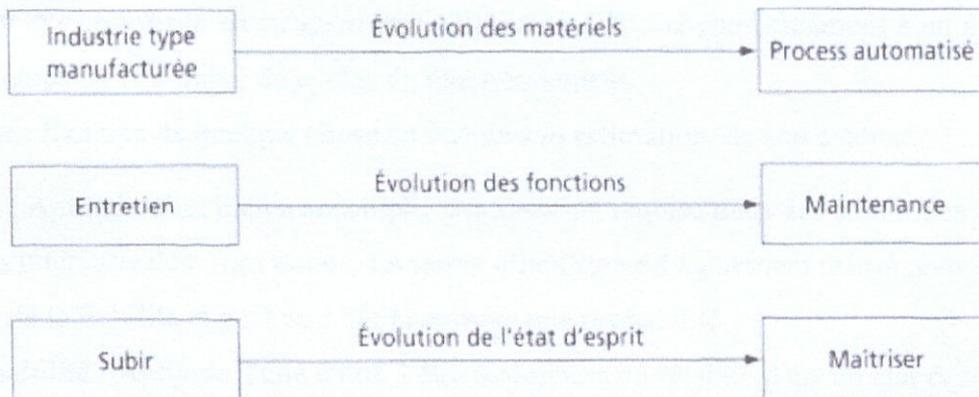


Fig. 01 : Transition entre le mot entretien et maintenance

6- Quelques terminologies utilisées dans la maintenance :

**Ajustage** : opération destinée à mener un appareil de mesure à un fonctionnement et à une justesse convenable pour son utilisation.

**Anomalie** : Déviation par rapport à ce qui est attendu. Une anomalie justifie une investigation qui peut déboucher sur la constatation d'une non-conformité ou d'un défaut. Itération ou



cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Après défaillance d'une entité, celle-ci est en état de **panne**.

**Avarie ou Panne** : Inaptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ou à assurer le service approprié à la suite d'une défaillance.

**Constat de défaillance** : relevé d'informations liées à la défaillance et destiné à orienter les investigations qui permettront d'identifier la fonction puis la chaîne fonctionnelle en panne.

**Contrôle** : Activité tel que mesurer, examiner essayer ou passer au calibre une ou plusieurs caractéristiques d'une entité et comparer les résultats aux exigences spécifiées en vue de déterminer si la conformité est obtenue pour chacune de ces caractéristiques.

**Défaillance d'usure** : Défaillance qui apparaît avec un taux rapidement croissant par suite de processus inhérents à l'entité.

**Défaillance** : est un passage d'une entité d'un état de fonctionnement normal à un état de fonctionnement anormal ou de panne.

**Dégradation** : évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation, à une cause externe. On fait souvent référence à une dégradation en parlant d'usure.

**Dépannage** : Action consécutive à la défaillance d'un bien, en vue de le rendre apte à accomplir sa fonction requise, au moins provisoirement.

**Entretien systématique ou programme** : Entretien effectué conformément à un échéancier, selon le temps ou le nombre de cycles de fonctionnement

**Expertise** : Examen de quelque chose en vue de son estimation, de son évaluation...

**Fiabilité** : Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné. Le terme «fiabilité» est également utilisé pour désigner la valeur de la fiabilité et peut être défini comme une probabilité.

**Maintenabilité** : Aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits.

**Pièce de rechange** : Bien destiné à remplacer un bien correspondant en vue de rétablir la fonction requise d'origine.

**Plan de maintenance** : Ensemble structuré de tâches qui comprennent les activités, les procédures, les ressources et la durée nécessaire pour exécuter la maintenance.



**Politique de maintenance :** la politique de maintenance consiste à fixer les orientations (méthode, programme, budget, etc.), dans le cadre des buts et objectifs fixés par la direction de l'entreprise (FD X 60-000 : mai 2002).

**Préparer l'intervention :** Définir toutes les conditions nécessaires à la bonne réalisation d'une intervention de maintenance. Quel que soit le type d'intervention à réaliser, la préparation sera toujours présente. Elle sera :

**Réparation :** Action définitive et limite de la maintenance à la suite d'une défaillance.

**Révision :** Ensemble des actions d'examen, de contrôle et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique pendant un temps donné ou pour un nombre d'unités d'usage donné.

**Stratégie de maintenance :** Ensemble des décisions qui conduisent :- à définir le portefeuille d'activités de la production de maintenance, c'est - à - dire, à décider des politiques de maintenance des matériels (méthodes correctives, préventives, amélioratrices à appliquer à chaque matériel) - et, conjointement, à organiser structurellement le système de conduite et les ressources productives pour y parvenir dans le cadre de la mission impartie (objectifs techniques, économiques et humains).

**Symptôme :** Événement ou ensemble de données au travers desquels le système de détection identifie le passage dans le fonctionnement anormal. C'est le seul élément dont a connaissance le système de surveillance au moment de la détection de la défaillance.

**Vérification :** confirmation par exemple et établissement de preuves que les exigences spécifiques ont été satisfaites.

### **7-Missions et objectifs de la maintenance :**

La maintenance est un outil très important qui doit être prescrit dans le plan de développement de toutes entreprises, ses principales missions sont nombreuses, telles que l'assurance de l'état de marche et de performance des moyens de production et/ ou d'exploitation. Il est important d'assurer un retour rapide des investissements en s'impliquant bien sûr au choix de l'équipement (évaluation le cout de la maintenance). Aussi, les infrastructures liées à la maintenance doivent être de moindre cout quant à la consommation des énergies utilisées, l'acquisition des compétences techniques aide de beaucoup à la gestion correcte de la maintenance tout en respectant les normes règlementaires de sécurité. Deux actions importantes résumées dans la figure ci-dessous.

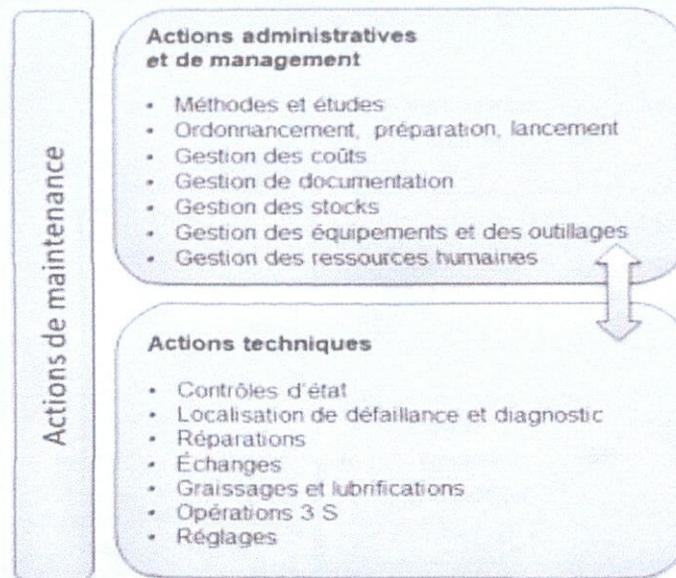


Fig. 02 : les actions liées à la maintenance

### 7.1-Structure générale de la maintenance :

#### 8- Les différents types de la maintenance :

Le processus de maintenance industrielle est l'épine dorsale de la productivité industrielle. Ainsi, plusieurs types d'opérations de maintenance des systèmes coexistent pour offrir aux industriels l'opportunité d'optimiser leurs chaînes de production (aéronautique, agro-alimentaire, électronique, électricité, hydraulique, machines électriques, pharmaceutique, etc.). La productivité d'une entreprise industrielle dépend en partie de la qualité des programmes de maintenance mis en place pour assurer le bon fonctionnement des équipements. Chaque industrie a des exigences spécifiques nécessaires pour mettre en œuvre le bon type de maintenance.



## 8.2 Maintenance préventive :

La maintenance est effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des équipements en cours d'utilisation et d'avoir ainsi une meilleure continuité de service.

### 8.2.1- Objectifs de la maintenance préventive :

- Augmenter la durée de vie du matériel.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc.
- Améliorer les conditions du travail du personnel de production.
- Diminuer le budget de maintenance.
- Supprimer les causes d'accidents graves

Sa mission est de maintenir les équipements dans leur état nominal :

- Permettre de produire avec une cadence et une qualité conforme au meilleur savoir-faire de l'entreprise.
- Améliorer les machines selon les besoins spécifiques de l'entreprise.
- Pérenniser le patrimoine matériel de l'entreprise.

- ✓ Ramener au nominal
- ✓ Maintenir au nominal
- ✓ Organiser et optimiser

#### 8.2.2.1 Maintenance préventive systématique :

La maintenance est effectuée selon un programme planifié et établi en fonction du temps ou le nombre d'unités d'usage. Ce sont des entretiens qui sont effectués à des dates planifiées à l'avance, avec une périodicité qui dépend du nombre d'heures, du nombre de cycles réalisés, etc. **En agriculture** ce système est très important, il permet de maintenir les machines agricoles toujours en bonne état de fonctionnement et rétablir leur durée cumulée.

**Exemple :**

- Vérification et mesure des prises de terre tous les ans.
- Changement des lampes toutes les 800 heures de fonctionnement.

**8.2.2.2 Maintenance préventive conditionnelle :**

La maintenance est subordonnée à un type d'événement prédéterminé (mesure, diagnostic, usure d'une pièce...). C'est une maintenance qui met en évidence l'état de dégradation d'un bien. Elle permet de suivre l'évolution d'un défaut et de planifier une intervention avant une défaillance partielle ou totale.

**Exemple :**

- Déclenchement intempestif d'un disjoncteur différentiel indique une baisse de la
- résistance d'isolement d'un récepteur. Ceci entraîne une surveillance régulière de la résistance d'isolement d'un équipement.

**9- Les niveaux de la maintenance :**

- ✓ Les 5 niveaux de maintenance :

L'AFNOR identifie 5 niveaux de maintenance dont on précise le service.

**Niveau 1 :**

Réglage simple prévu par le constructeur ou le service de maintenance, au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage pour ouverture de l'équipement. Ces interventions peuvent être réalisées par l'utilisateur sans outillage particulier à partir des instructions d'utilisation.

**Niveau 2 :**

Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet et d'opération mineure de maintenance préventive, ces interventions peuvent être réalisées par un technicien habilité ou l'utilisateur de l'équipement dont la mesure où ils ont reçu une formation particulière.



# Chapitre 1 : La maintenance dans le domaine de l'agriculture

## Niveau 3 :

Identification est diagnostique de panne suivit éventuellement d'échange de constituant, de réglage et de d'étalonnage général. Ces interventions peuvent être réalisées par technicien Spécialisé sur place ou dans un local de maintenance à l'aide de l'outillage prévu dans des Instructions de maintenance.

**Niveau 4 :** Travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ces interventions peuvent être réalisées par une équipe disposant d'un encadrement technique très spécialisé et des moyens importants adaptés à la nature de

L'intervention.

## Niveau 5 :

Travaux de rénovation, de reconstruction ou de réparation importante confiée à un atelier central de maintenance ou une entreprise extérieure prestataire de service

La figure ci-dessous résume en partie la relation des interventions des opérations de maintenance entre l'entreprise et le client

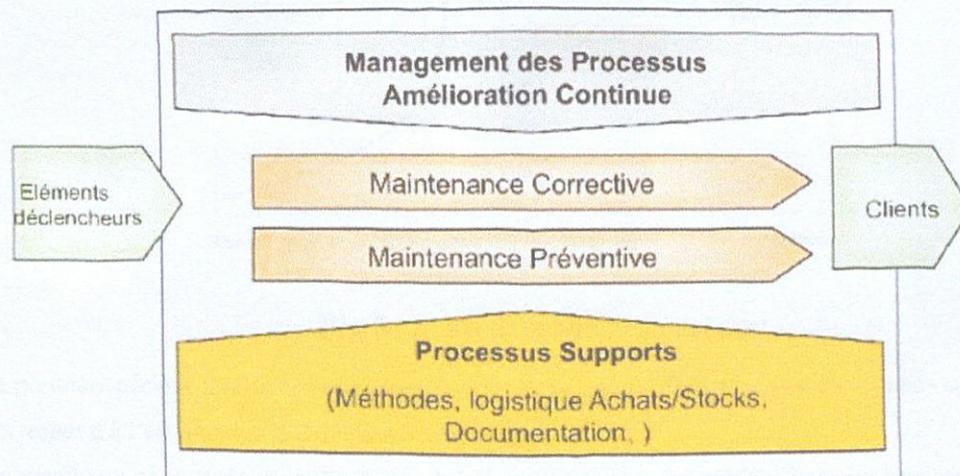


Fig. 04 : les interventions de la maintenance



## 10- Les différents indicateurs de la maintenance :

### 10.1 Fiabilité, maintenabilité et disponibilité (Analyses FMD):

**10.1.1 Fiabilité :** est l'une des composantes essentielles de la qualité d'un produit et elle est retenue en tant que critère fondamental pour leur élaboration.

« *C'est l'aptitude d'une machine à accomplir une fonction requise, dans des conditions données durant un intervalle de temps donné.* ». Elle est prise en considération dès le stade de la conception

Le terme **FIABILITE** est également utilisé pour désigner la valeur de la fiabilité et peut être désigné comme une probabilité (**Probabilité** : C'est une quantité indiquant, sous forme de fraction ou de pourcentage, le nombre de fois ou de chances qu'un événement à se produire sur un nombre total d'essais ou de tentative. R est toujours compris entre 0 et 1)

La courbe en baignoire représente l'évolution du taux de panne ou de défaillance pendant tout le cycle de vie, on distingue trois périodes :

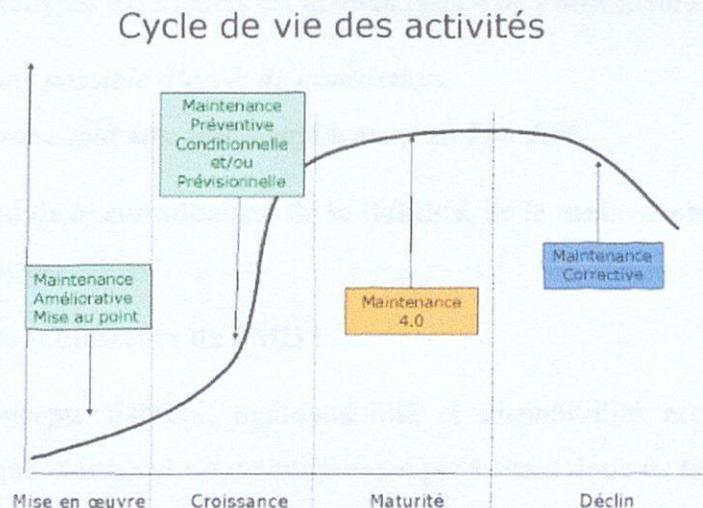


Fig 5 : le cycle de vie d'un produit

1. La première période dite de *jeunesse (croissance)* ou le taux de défaillance est élevé, mais en décroissance correspond à l'élimination des défauts liés au rodage.
2. Le deuxième période de *vie utile (maturité)*, caractérisé par une stabilité avec un taux de panne faible, l'équipement prouve sa robustesse et sa maturité.
3. Période de *vieillesse (déclin)*, le taux de défaillance et d'usure sont important et augmente rapidement avec le temps.

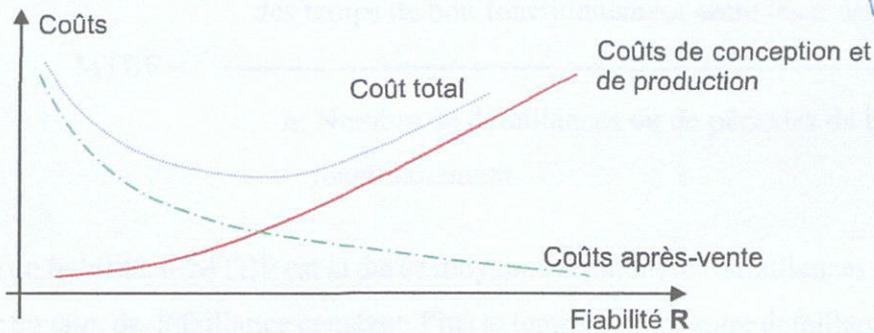


Fig 6 : Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité

**10.1.2 Maintenabilité :** dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. (La connaissance de l'équipement...).

**10.1.3 Disponibilité :** Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné en supposant que les fournitures des moyens extérieurs est assurée. (guide de l'utilisateur).

- *Avoir le moins possible d'arrêt de production.*
- *En cas de panne doit être remis rapidement en bon état.*

**La disponibilité dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance.**

## 10. 2- Le calcul des indicateurs de FMD :

Chacun des concepts fiabilité, maintenabilité et disponibilité est défini par une probabilité, chaque indicateur est quantifiable et permettent donc de les évaluer.

### 10.2.1 Les indicateurs utilisés au calcul de fiabilité :

#### 10.2.1.a- MTBF, Mean Time Between Failure

- représente la moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances.
- et le Taux de panne ou le taux de défaillance
- **n** : nombre de pannes



$$MTBF = \frac{\text{des temps de bon fonctionnement entre les } n \text{ défaillances}}{n}$$

n: Nombre de défaillances ou de périodes de bon fonctionnement

Dans l'analyse de fiabilité, le MTBF est la durée moyenne séparant les défaillances d'un système réparable avec un taux de défaillance constant. Plus le temps moyen entre défaillances est élevé, plus le produit est fiable.

### 10.2.2 Les indicateurs utilisés au calcul de la maintenabilité :

#### 10.2.2.b-MTTR (Mean Time To Repair),

elle peut être obtenue par la moyenne statistique d'un échantillon à  $n$  valeurs. il est calculé en additionnant les temps actifs de maintenance, ainsi que les temps annexes de maintenance le tout divisé par le nombre d'interventions.

$$MTTR = \frac{\text{temps d'arrêt total}}{\text{nombre d'arrêt}}$$

On peut améliorer la maintenabilité en :

- Développant les documents d'aide à l'intervention
- Améliorant l'aptitude de la machine au démontage (modifications risquant de coûter cher)
- Améliorant l'interchangeabilité des pièces et sous ensemble.

### 10.2.3 Les indicateurs utilisés au calcul de la Disponibilité :

#### 10.2.3.c- Disponibilité moyenne :

$$D_o = \frac{\text{temps de disponibilité}}{\text{temps de disponibilité} + \text{temps d'indisponibilité}}$$

ou  $D_o = \frac{TCBF}{TCBF + TCI}$



- La disponibilité allie donc les notions de fiabilité et de maintenabilité.
- Augmenter la disponibilité passe par : L'allongement de la MTBF (action sur la fiabilité).
- La notion de MTTR (action sur la maintenance)
- Quantification de la disponibilité : La disponibilité moyenne sur un intervalle de temps.
- ❖ Donnée peut être évaluée par le rapport :

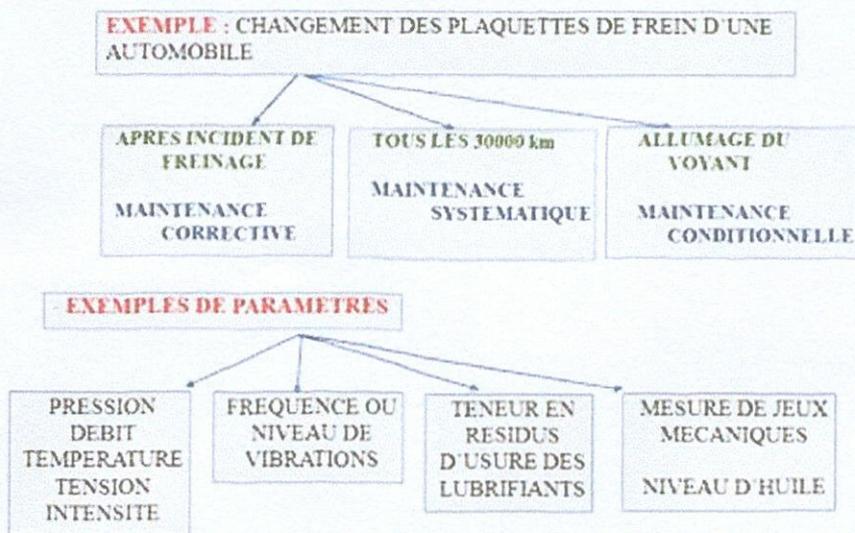
$$D = D(t) = \frac{\text{Temps d'utilisation et d'attente}}{\text{Temps d'utilisation et d'attente} + \text{Temps de maintenance}}$$

Exemple 1 : La fiabilité d'un roulement de broche pendant 20 000 heures de fonctionnement est égale à 0.9 signifie.

- Qu'il y a 90 chances sur 100 → PROBABILITE
- pour que le roulement fonctionne sans signe d'usure → FONCTION REQUISE
- pendant 20000 heures → TEMPS DONNE
- à une fréquence de rotation moyenne de 1500 tr/min → CONDITIONS DONNEES

Exemple 2 : Une fiabilité de R = 0.92 après 1000 heures signifie que le produit a 92 chances sur 100 (92 % de chances) de fonctionner correctement pendant les 1000 premières heures

Exemple 3 :







*Dans ce contexte des entretiens réguliers seront établis afin d'assurer un bon fonctionnement du matériel.*

### 1- Tracteur

Conduite de la maintenance d'un tracteur agricole La maintenance (entretien et réparations) d'un tracteur agricole doit être effectuée quotidiennement et périodiquement au bout de 500 heures environs, durée variable suivant les marques et les constructeurs.

#### 1.1.1 - Entretien journalier

Il est recommandé de faire quotidiennement une inspection générale du tracteur et vérifier à chaque fois que cela est nécessaire :

- l'état et le niveau de pression des pneus
- le niveau de l'huile du moteur, de freinage et de transmission
- la cuve du filtre à combustible. Purger si c'est nécessaire
- le préfiltre du filtre à air à bain d'huile : nettoyer et s'assurer du niveau d'huile et de son état
- le filtre à air et dépoussiérer l'élément principal. Un filtre colmaté entraîne une surconsommation non négligeable de carburant.
- le niveau du liquide de refroidissement et veillez sur la propreté du système (radiateur, durites, ventilateur, tension de courroie, etc.)
- le niveau de l'électrolyte dans les éléments de la batterie : ajouter de l'eau distillée pour recouvrir les plaques si elles ne le sont pas. Ne jamais mettre d'eau naturelle ou d'eau minérale.
- l'état des circuits hydrauliques apparents et ceux du freinage A la fin de chaque journée de travail, un tracteur doit être nettoyé, graissé et huilé à temps, dans les règles de l'art puis mis sous abri. Il est impératif de procéder à l'entretien cité ci-dessous :
- Nettoyer les vitres et le tableau de bord de la cabine de pilotage.
- Poser par terre le chargeur frontal ainsi que l'outil attelé si vous n'avez pas l'intention de dételer pour que les conduites hydrauliques ne soient pas sous pression.
- Vérifier l'arbre à cardans et le limiteur de couple en cas de travail avec outil animé par prise de force. - Vérifier le circuit électrique (batterie, feux et lumières, klaxon, ...)
- Faire le plein de carburant.

#### 1.1.2 - Entretien périodique

L'entretien du tracteur est essentiel pour assurer le bon fonctionnement de votre machine. Un entretien régulier permet de s'assurer que votre tracteur fonctionne efficacement et en toute



sécurité. Cela comprend le contrôle et le remplacement des fluides, le contrôle et le remplacement des filtres, ainsi que l'inspection et le remplacement des pièces.

Il est important de vérifier régulièrement l'huile et les autres fluides de votre tracteur pour s'assurer qu'ils sont au bon niveau. Il est également important de remplacer les filtres et les bougies d'allumage si nécessaire. L'inspection des pièces du tracteur et le remplacement des pièces usées ou endommagées sont également essentiels pour que le tracteur fonctionne au mieux.

Le nettoyage de votre tracteur est une partie importante de l'entretien. La propreté du tracteur permet de réduire l'usure des pièces et d'assurer un fonctionnement efficace du tracteur. Cela inclut le nettoyage de l'extérieur du tracteur, ainsi que du moteur, de la transmission et d'autres pièces.

Il est important d'utiliser les bons produits de nettoyage pour nettoyer votre tracteur. Vous devez également utiliser les bons outils et les bonnes techniques pour vous assurer que le tracteur est nettoyé en profondeur et protégé des dommages. Un nettoyage régulier permet de prolonger la durée de vie de votre tracteur et d'en assurer le bon fonctionnement.

La lubrification est un élément important de l'entretien des tracteurs. Elle permet de réduire la friction entre les pièces mobiles, ce qui contribue à prolonger la durée de vie du tracteur. Une lubrification régulière permet au tracteur de fonctionner en douceur et efficacement, et contribue à réduire l'usure des pièces.

Il est important aussi d'utiliser le bon lubrifiant pour votre tracteur et de lubrifier toutes les pièces mobiles. Vous devez également vérifier régulièrement les niveaux de lubrifiant et remplacer le lubrifiant si nécessaire. Une lubrification régulière contribuera au bon fonctionnement de votre tracteur et à son efficacité. L'entretien des pneus est une partie importante de l'entretien du tracteur. Il est important de vérifier régulièrement la pression des pneus et de les remplacer si nécessaire. Une vérification régulière des pneus permet de s'assurer qu'ils sont en bon état et qu'ils ne s'usent pas prématurément.

Il est important aussi de vérifier la bande de roulement des pneus. Une vérification régulière de la bande de roulement permet de s'assurer que les pneus offrent une traction adéquate et qu'ils ne glissent pas. Vérifier que les roues ne sont pas endommagées ou usées, et de les remplacer si nécessaire.



L'entretien de la batterie est une partie importante de l'entretien du tracteur. Il faut vérifier régulièrement la batterie pour s'assurer qu'elle est en bon état et qu'elle fournit la puissance appropriée. Il est également important de remplacer la batterie si nécessaire, car une batterie à plat peut entraîner l'arrêt de votre tracteur.

Il est également nécessaire de vérifier les connexions de la batterie et de les nettoyer si nécessaire. Cela permet de s'assurer que la batterie fournit la puissance appropriée et qu'elle ne se vide pas trop rapidement. En vérifiant régulièrement la batterie et ses connexions, vous contribuerez au bon fonctionnement de votre tracteur.

La sécurité est un élément important de l'entretien du tracteur. Il est important de vérifier régulièrement le tracteur pour s'assurer qu'il est en bon état et qu'il fonctionne en toute sécurité. Il faut notamment vérifier les freins, les feux et les autres dispositifs de sécurité pour s'assurer qu'ils fonctionnent correctement.

Il est également important de porter les équipements de sécurité appropriés lors de l'utilisation du tracteur. Cela inclut un casque de sécurité, des lunettes de sécurité et des vêtements de protection. Il est important de lire le manuel du tracteur et de suivre les instructions de sécurité. Le respect de ces consignes de sécurité vous aidera à assurer votre sécurité et celle de votre tracteur.

## **2 Le moteur :**

Il est primordial de changer régulièrement la lubrification du moteur pour s'assurer que le moteur fonctionne au maximum de son efficacité. La fréquence des changements de lubrification dépend du type de moteur et de ses conditions de fonctionnement. En général, il est recommandé de changer le lubrifiant tous les quelques milliers de kilomètres.

Lors du changement de lubrifiant, il est important d'utiliser le type de lubrifiant adapté au moteur. Il est également important de vidanger l'ancien lubrifiant et de le remplacer par du lubrifiant frais. Ceci montre que le moteur fonctionne de manière fluide et efficace.

Un entretien régulier est essentiel pour le bon fonctionnement de tout moteur. Il est important d'inspecter régulièrement le moteur afin de s'assurer qu'il fonctionne de manière fluide et efficace. Cela inclut la vérification des niveaux de lubrifiant, ainsi que l'inspection du lubrifiant pour détecter tout signe de contamination.

Il est également important de vérifier les filtres du moteur et de les remplacer si nécessaire. Cela permet de s'assurer que le moteur fonctionne efficacement et qu'il n'est pas endommagé par la saleté ou les débris. La lubrification des moteurs est importante pour le bon fonctionnement des moteurs. Il est important de choisir le bon type de lubrifiant pour le moteur, et de changer le



lubrifiant régulièrement. Il est également important d'entretenir le moteur et de l'inspecter régulièrement pour détecter tout signe de contamination ou de dommage.

En suivant ces étapes simples, vous pouvez vous assurer que votre moteur fonctionne efficacement et qu'il n'est pas endommagé par la saleté ou les débris. Vous pourrez ainsi prolonger la durée de vie de votre moteur et vous assurer qu'il fonctionne de manière optimale.

- Vidanger l'huile du moteur à chaud et laissez égoutter. Le tracteur doit être placé sur un sol horizontal.

- Remplacer le filtre à huile du moteur. Faire tourner le moteur pour s'assurer qu'il n'y ait pas de fuites. Arrêter le moteur et vérifier de nouveau le niveau d'huile, après quelques minutes, puis le compléter si c'est nécessaire.

- Nettoyer le reniflard aussi souvent que les conditions de travail sont poussiéreuses.

- Faire vérifier les culbuteurs, les injecteurs et la pompe par un spécialiste.

**N.B :** Si le moteur doit rester à l'arrêt pendant une longue durée, il faut le protéger avec une huile spéciale dite de stockage. Le système d'alimentation en carburant

- Utiliser un carburant propre, stocké et décanté convenablement.

- Remplacer l'élément du filtre à combustible, vérifier l'état des joints, nettoyer la cuve de décantation et purger le système.

- Faire vérifier la pompe d'injection et les injecteurs.

**2.1.1 Le système d'alimentation en carburant** - Utiliser un carburant propre, stocké et décanté convenablement. - Remplacer l'élément du filtre à combustible, vérifier l'état des joints nettoyer la cuve de décantation et purger le système.

- Faire vérifier la pompe d'injection et les injecteurs.

**2.1.2 Le système de refroidissement :** - Utiliser une graisse spéciale pour la pompe à eau.

- Nettoyer les ailettes du radiateur en y soufflant de l'air comprimé par l'arrière et vérifier fréquemment son niveau d'eau. Il convient d'employer une eau non calcaire à laquelle il faut ajouter un antigel, si le tracteur doit être utilisé en zones à climat froid.

- Vérifier la tension de la courroie du ventilateur.



- Si le moteur a tendance à chauffer cela veut dire que le circuit de refroidissement est étranglé par la tartre.

- Vidanger le circuit de refroidissement après la durée recommandée par le fabricant.

### 3 -Exemples de maintenance au niveau du matériel agricole

#### 3.1 Entretien de la moissonneuse batteuse

L'hivernage du matériel est le fait de rester une longue durée sans être utilisé, il convient d'y effectuer les principales opérations suivantes avant la mise sur cales :

- Remplacer toutes les pièces usées (roulements, chaînes, courroies, ampoules de feux d'éclairage ou de signalisation, fusibles).

- Les courroies doivent être démontées et entreposées dans un endroit obscur. Celles qui sont usées doivent être achetées et stockées.

- Les paliers doivent être contrôlés et tous les boulons d'assemblage resserrés. - Dresser les tôles déformées et refaire la peinture des parties dénudées.

- Déposer la batterie et la charger périodiquement.

- Protéger le moteur avec l'huile de stockage.

A la fin du travail d'entretien, la Moissonneuse batteuse doit être mise sur cales bien fermes de sorte que les roues dégonflées à moitié ne touchent pas le sol. Il est plus convenable, pour de longues durées de repos, de dégonfler les roues et les déposer dans un lieu obscur. L'engin doit être entreposé dans un abri clos pour le protéger des intempéries



Fig 7: photo générale d'une moissonneuse batteuse



Une moissonneuse-batteuse est une grande pièce de machinerie agricole utilisée pour récolter et battre les cultures céréalières. L'entretien régulier d'une moissonneuse-batteuse est essentiel pour garantir son bon fonctionnement et son efficacité.

Il est important d'inspecter régulièrement la moissonneuse-batteuse et de connaître les problèmes courants qui peuvent survenir. (Cette présentation donnera un aperçu de l'entretien des moissonneuses-batteuses, y compris la manière d'identifier et de résoudre les problèmes courants.)

### 3.1.1- Contrôle des courroies et des chaînes

- Avant de commencer tout entretien, il est important de vérifier que les courroies et les chaînes ne présentent aucun signe d'usure ou de détérioration. Les courroies doivent être tendues et les chaînes doivent bouger librement, sans plis ni torsions.
- Il est également important de vérifier la tension des courroies et des chaînes. Si la tension est trop forte, les courroies et les chaînes s'usent rapidement et doivent être remplacées.

### 3.1.2-Contrôle des lames et des couteaux

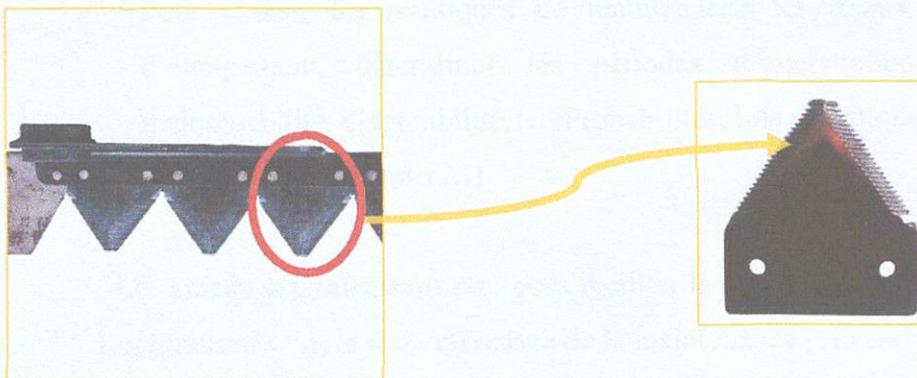


Fig : lame de coupe

Fig 8 : barre de coupe d'une moissonneuse batteuse

Les lames et les couteaux de la moissonneuse-batteuse doivent être contrôlés régulièrement pour s'assurer qu'ils sont en bon état. Les lames doivent être tranchantes et exemptes de rouille et d'entailles, et les couteaux doivent être tranchants et exempts de bavures.

Il faut vérifier régulièrement l'état des lames et des couteaux pour détecter tout signe d'usure ou de dommage. Si les lames ou les couteaux sont endommagés, ils doivent être remplacés dès que possible.



### 3.2 Entretien du pulverisateur

Voici quelques conseils concernant l'entretien des pulverisateurs, mais il faut impérativement se conformer aux indicateurs de la notice d'entretien du constructeur.

- Enlever les pastilles et rincer à l'eau claire le circuit de liquide après chaque utilisation.
- Verser le reste du produit, ne le laisser pas stagner dans des parties des circuits.
- Veuillez à la propreté des filtres spécialement ceux qui sont au niveau de la canalisation de refoulement.
- Il faut toujours contrôler la pression de gonflage de l'amortisseur à air de pompe.
- Démontez et nettoyez les buses pour les déboucher
- Il faut graisser les parties mécaniques mobiles selon les recommandations du constructeur

## 4. Les outils d'aide à la décision de la maintenance

Tout comme l'intervention technique de maintenance, l'organisation et la gestion des activités de maintenance nécessitent l'emploi d'outils d'usages et de natures différentes :

### 4.1- Outils mathématiques :

Pour choisir les politiques de maintenance les mieux adaptées à chaque type d'équipement, déterminer les périodes d'intervention, connaître la fiabilité, maintenabilité, disponibilité... (Probabilités, lois statistiques, algèbre des événements, analyses markoviennes...)

**4.2- Outils organisationnels :** pour faciliter la prise de décisions (AMDEC, Synoptiques, Logigrammes...), la mise en œuvre de la maintenance préventive (techniques de contrôle), ou l'organisation des interventions (procédures et modes opératoires)

**4.2.1 La méthode AMDEC** Correspond « Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité ». c'est un outil utilisé dans la démarche qualité, assurance et fonctionnement.

**La recherche de défaillance repose sur trois points important :**

- La cause de la défaillance
- L'effet de la défaillance



- La criticité

**4.3- Outils informatiques** : pour la gestion des éléments maintenus, des ressources utilisées et des budgets (GMAO, GTP, GTB), ou pour l'aide à la décision (Systèmes experts).

### 4.3.1- Exemple de logiciel de GMAO :

#### 4.3.1.1 Twimm

Il est très important au niveau de la maintenance de gérer les et de programmer les moments d'interventions et la gestion des devis ainsi que l'établissement des factures TWIMM facilite le quotidien des centre de maintenance dans la gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO). Ce logiciel offre de nombreuses fonctionnalités aux utilisateurs :

- **Planification des interventions**
- **Gestion des devis et des travaux**
- **Facturation**

Twimm engendre des relations d'experts entièrement personnalisables et configurables. Cette solution augmente de façon rentable la productivité des équipes de maintenance en utilisant une application Web accessible depuis le smartphone, tablette ou PC.

#### 4.3.1.2-UpKeep

Est un logiciel de GMAO aussi il gère les maintenances et les interventions. Sa conception donne aux techniciens la possibilité de gérer la maintenance, tout en étant en déplacement.

L'outil offre plusieurs fonctionnalités aux utilisateurs :

- **Création et gestion des bons de travail**
- **Optimisation du workflow**
- **Suivi de l'évolution des stocks et des équipements**
- **Application mobile.**

La plateforme du logiciel présente des points positifs :

- **une gestion de la maintenance simplifiée,**
- **une application mobile,**



- de la maintenance préventive,
- de l'automatisation des workflows
- suivi d'inventaire.
- gestion des stocks et des équipements.

### 4.3.1.3 Fiix

Fiix est un logiciel de GMAO qui permet de gérer votre maintenance de loin et à tout moment grâce à des outils collaboratifs.

Les principales fonctionnalités proposées par Fiix sont les suivantes :

- **Gestion des actifs**
- **Gestion des bons de travail**
- **Exécution de la maintenance**
- **Création de rapports personnalisables**
- **Gestion des stocks et des fournitures**



## المقدمة

### 1- Introduction

Les études sur le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces de contact ont toujours été l'un des domaines de la tribologie. Son point d'origine est l'interaction entre deux surfaces lisses (polies) et les solides lisses, qui se manifestent à l'échelle microscopique et affectent les surfaces de contact avec un type particulier. L'usure résulte de l'interaction constante de surfaces de la même ou d'une autre nature. La tribologie porte sur notre domaine de production industrielle et de transport, car elle agit dans les machines et les véhicules au sein de chaque système énergétique. Elle traite les problèmes liés à l'usure et à la lubrification, à la conception et à la fabrication de machines et de systèmes.

### 2. Introduction de ce chapitre

## Chapitre 3: Tribologie

La tribologie est une science qui étudie le frottement, l'usure et la lubrification. Elle est une discipline interdisciplinaire qui implique la physique, la chimie, la mécanique et la science des matériaux. Elle est appliquée dans de nombreux domaines, tels que l'automobile, l'aérospatial, l'industrie et l'agriculture.

Le frottement est la force qui s'oppose au mouvement relatif entre deux surfaces en contact. Il est dû à l'interaction entre les aspérités des surfaces et aux forces moléculaires. L'usure est la perte de matière d'une surface due à l'action de frottement. Elle est causée par l'abrasion, l'adhésion et l'érosion. La lubrification est l'application d'un fluide entre deux surfaces pour réduire le frottement et l'usure.

En 1881, un ingénieur anglais nommé Peter Bowden a été le premier à proposer une théorie de l'usure. Il a suggéré que l'usure est causée par l'abrasion des aspérités des surfaces. Cette théorie a été développée par d'autres chercheurs et a conduit à la formulation de la loi d'Archard, qui relie l'usure à la charge normale et à la distance de glissement.



### 1-Introduction

Les études sur le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces de contact entre deux corps solides relèvent du domaine de **la tribologie**. Son point focal est l'interaction entre les lubrifiants liquides (huiles) et les solides (graisses), car la lubrification fonctionne en séparant les surfaces de contact avec un film protecteur. Essentiellement, la tribologie concerne la science du frottement, de l'usure et de la lubrification. La majeure partie de notre capacité de production est axée sur le remplacement des éléments usés par les frottements, ce qui entraîne en fin de compte une perte d'énergie importante. Aux États-Unis seulement, on estime qu'environ 2 à 6 % de la production nationale est gaspillée à cause du frottement et de l'usure.

### 2. Historique de la tribologie :

Le vocable tribologie a été créé en 1966 et vient du grec. **Tribein** (tribos) : friction ou frottements, **logos** : recherche ou science ou étude, donc la tribologie est la recherche ou science de la friction. Plus généralement, elle comprend l'étude de la lubrification, du frottement et de l'usure des composants des machines.

La première chose à noter est que le frottement n'est pas seulement négatif, le déplacement d'une voiture dépend de l'adhérence du frottement entre le pneu et la route. De même, s'il n'y a pas de friction, les gens ne pourront pas marcher. Enfin, si les humains ont appris à maîtriser le feu il y a 100 000 ans, c'est en frottant un morceau de bois dur contre un morceau de bois tendre.

Mais il existe des frottements qui induisent à l'usure, cependant, dès la construction des premiers mécanismes, l'homme a cherché à supprimer l'usure et à diminuer le frottement pour réduire les efforts. Pour préciser l'ampleur du problème on peut citer le cas des automobiles actuelles pour lesquelles plus du quart de la puissance indiquée du moteur est perdue en frottement dans la transmission et le moteur.

En 1966, un rapport établi par Jost, donne une estimation des coûts liés à la lubrification et aux causes de l'usure (300 millions de livres), et a évalué les possibles économies réalisables avec des améliorations techniques. Tous les secteurs industriels sont concernés. Parmi les plus touchés on cite, l'industrie minière, la sidérurgie et la mise en forme du métal (fonderie, usinage

etc...), les procédés chimique, la construction navale, l’Energie, l’industrie des cheminots, du gaz et du pétrole, l’hydraulique, les chemins de fer .....

La connaissance tribologique aide à améliorer la durée de vie, la sécurité et la fiabilité des composants en interaction de la machine et produit des avantages économique substantiels évitant ainsi une défaillance grâce aux connaissances tribologiques.

### 3- Les trois fondamentaux de la tribologie :

**frottements** :la résistance au mouvement d'un corps qui se déplace contre un autre.

**usures**: la perte de matière due au mouvement

**lubrification**:l'utilisation d'un fluide pour minimiser la friction et l'usure

Ces trois domaines sont liés par des phénomènes physiques qui se traduisent dans les mécanismes :

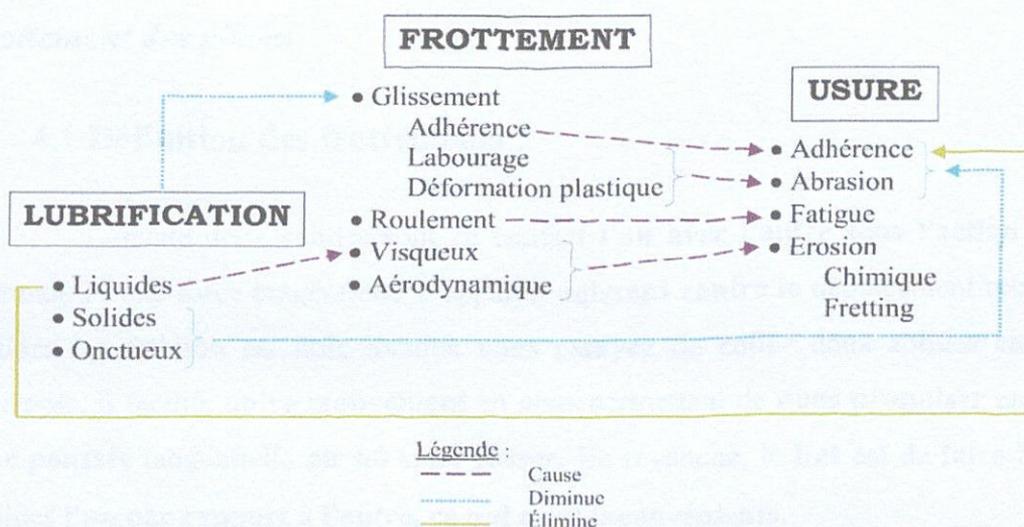


Fig 8 : la relation entre l’usure les frottements et la lubrification

Le processus tribologique complet de contact est difficile à comprendre car il implique à la fois des frottements, de l'usure, des déformations mécaniques ainsi que des changements chimiques

à différents niveaux échelles. Comme résumé dans la figure 9, le contact entre deux surfaces (appelées partenaires) provoque certains changements.

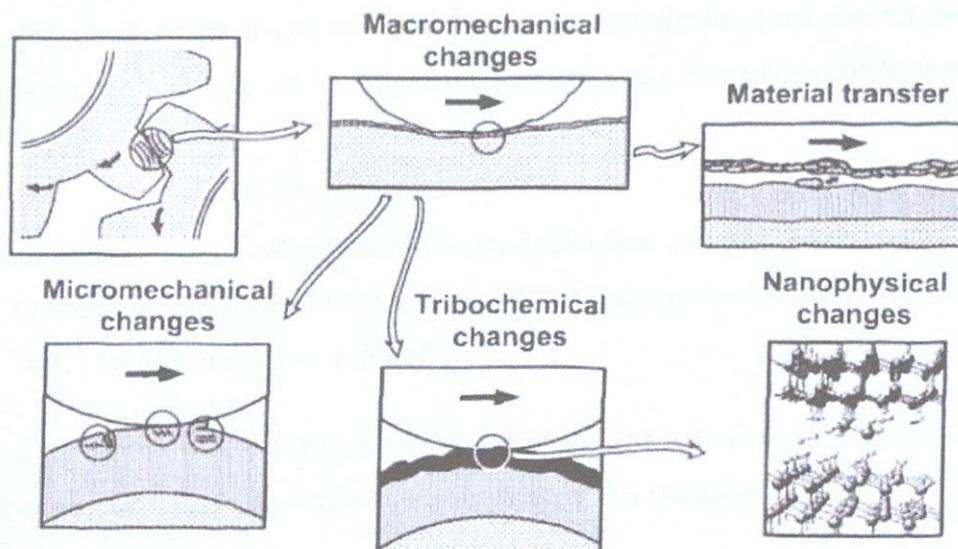


Fig 9 : contact tribologique

#### 4. Les frottements (causes des usures)

L'usure dans le domaine de l'industrie mécanique, concerne plus de deux tiers des problèmes rencontrés, cette usure est liée généralement aux problèmes de contact et de déplacement de deux surfaces (transmissions de mouvements, rotations, translations, etc...) : *c'est le frottement des pièces*

##### 4.1 Définition des frottements

Lorsque deux solides sont en contact **l'un avec l'autre sous l'action d'une** force normale  $F$ , une force tangentielle  $T$  apparaît **agissant contre le** déplacement relatif des deux solides **La friction** est utile lorsque **vous essayez de coller** deux solides **ensemble**. Par **exemple**, il facilite **notre mouvement** en nous permettant de **nous propulser en appliquant** une **poignée tangentielle au sol sans glisser**. En revanche, le **but** est de **faire bouger** deux solides **l'un par rapport à l'autre, ce qui a ses inconvénients**.

*Remarque : avant de passer aux phénomènes de frottements nous allons passer en revue la notion de surface.*

Coulomb a construit divers dispositifs et effectué des expériences pour étudier précisément l'effet des cinq phénomènes, sur le frottement de glissement, et certains sur le frottement de roulement :

1) nature des matériaux, 2) effet d'un lubrifiant, 3) étendue de la surface de contact, 4) charge appliquée, 5) temps de repos pendant lequel les surfaces restent en contact avant l'expérience

### 4.1.1 Définition d'une surface :

La surface d'un corps solide est la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant, elle est primordiale pour assurer des fonctions telles que :

- L'aptitude aux frottements
- la résistance à l'usure ou à la corrosion
- conduction thermique ou électrique
- résistance aux contraintes mécanique
- étanchéité statiques ou dynamiques...etc.

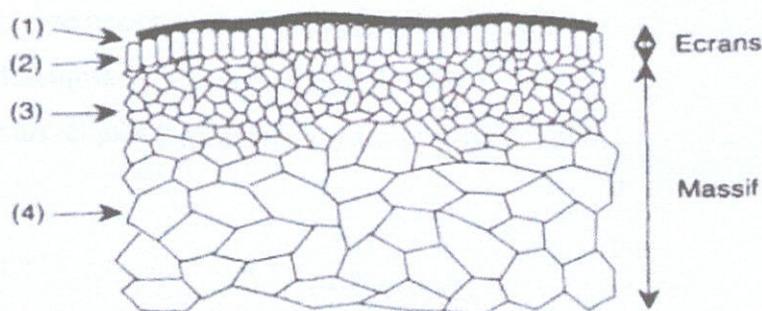


Fig 10 : éléments composant une surface d'un corps

- (1) film de contamination (0,3 à 3 nm) constitués de couches absorbées.
- (2) film d'oxydes (1 à 10  $\mu\text{m}$ ).
- (3) zone mécaniquement perturbée (1 à 50  $\mu\text{m}$ ) de structure écaillée ou structure de couche de diffusion.
- (4) partant de 100  $\mu\text{m}$  est le matériau massif.

Une surface fabriquée et usinée n'est pas parfaite, elle présente des défauts en raison d'erreurs d'imperfections, admissibles en production. Ces défauts peuvent être d'apparence (défauts macro-géométriques, ondulations) ou des défauts micro-géométriques. Définis plus fréquemment sous le nom de rugosité. Ces deux types de défauts peuvent être distingués de la manière suivante,

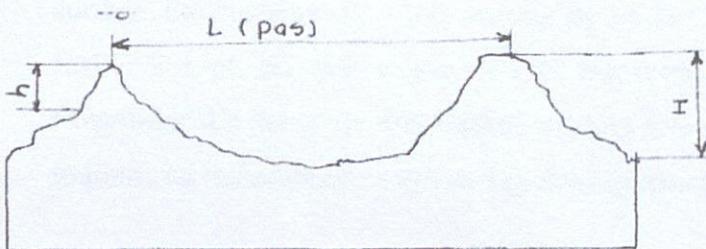
- **des défauts géométriques des surfaces** : horizontalité, rectitude, circularité. - **C'est des fissures rugueuses**, genres de sillons tracés régulièrement dans le relief des ondulations par les outils de coup, très irrégulières et parfois accidentels, correspondant ainsi à des arrachements, fentes...

#### 4.1.2 Types de contact :

Il s'agit de déterminer la géométrie et la nature du contact. Ces informations participeront en particulier à l'évaluation du champ de contrainte imposé au contact. Elles permettront aussi d'avoir une première idée sur les modes de lubrification à mettre en œuvre. Par nature du contact, on entend la définition générale de ce qui constitue le contact : solide/solide liquide/solide, liquide et particule/solide, liquide et vapeur/solide, etc.

La géométrie du contact caractérise la forme générale des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact. On constate que l'ensemble de contacts que l'on rencontre en génie mécanique peut se regrouper en trois grandes familles

- Les contacts de type ponctuel (typiquement sphère/plan).
- Les contacts linéiques (typiquement cylindre/plan).
- Les contacts surfaciques (typiquement parallélépipède /plan).



- L : Longueur.
- H : hauteur d'onde.
- h : hauteur de rugosité.
- Si  $L/H = 50$  à  $1000$  on a une ondulation.
- Si  $L/H < 50$ , on a une rugosité.

Fig 11: rugosité d'une surface sous microscope

Des phénomènes, pouvant intervenir, séparément ou simultanément, appartiennent à deux grands facteurs :

4.1.2.a- **Conséquences du contact proprement dit** : interactions mécaniques, chimiques, métallurgiques, entre les deux corps en présence.

4.1.2.b- **Impact de l'environnement (atmosphère, lubrifiant...)** :

- Actions physicochimiques dues à la composition du milieu,
- Actions mécaniques induites par la nature, la propreté de ce milieu (par exemple caractère abrasif d'une ambiance polluée).

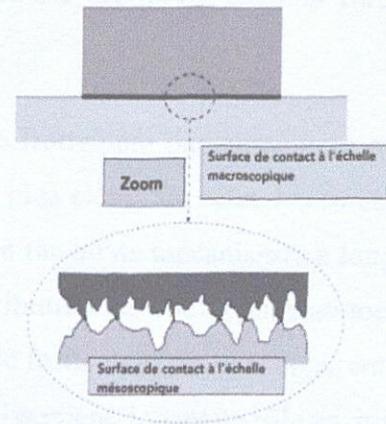
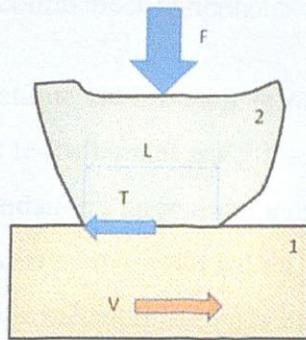


Fig 12 : frottement de deux corps en mouvements      Fig13 : surface de frottement

L'origine du frottement de contact a longtemps été accordée à des phénomènes de rugosité de surface. Par conséquent, si une surface de contact semble plane à l'échelle macroscopique, en réalité il n'en est rien à une échelle mésoscopique. A cette échelle, la surface apparaît irrégulière. **La force de frottement** est une force de réaction entre deux corps qui s'oppose toujours au mouvement relatif de ces deux corps en contact.

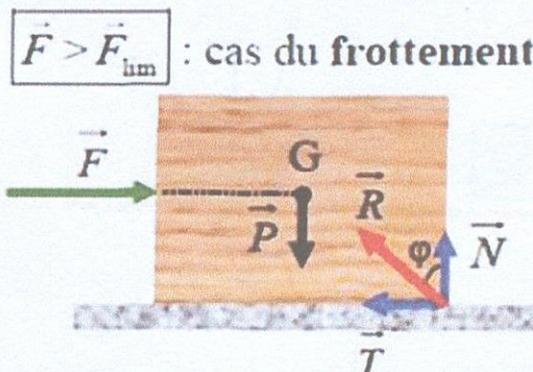


Fig 14 : forces de frottements

La caisse glisse sur le sol on a toujours  $N = -P$  mais cette fois la composante tangentielle de la force de frottement toujours opposées au mouvement devient constante en module et telle que

$T = \mu \cdot N$ . le coefficient  $\mu$  (parfois noté  $f$  également) est appelé « coefficient de frottement »

c'est un nombre sans dimension et sans unité et il est défini par  $\mu = \frac{T}{N} = \tan \varphi$

#### 4.2- Les deux types de frottements

**4.2.1. - frottement statique** Cette force augmente de zéro à un maximum avant le début du mouvement macroscopique. Frottement statique lorsque la vitesse relative de glissement des points (lignes ou surfaces) des solides en contact est nulle. C'est la force nécessaire pour commencer le déplacement du bloc.

Le frottement statique est basé sur le même mécanisme que le frottement par glissement ou dynamique, mais le frottement par glissement est généralement plus élevé. En effet, les forces d'adhésion ont tendance à augmenter avec le temps de contact en raison de mécanismes à long terme tels que la diffusion à l'état solide. Cela augmente la contribution du frottement statique. De plus, le montage mécanique dû à la rugosité peut augmenter le frottement statique apparent. Les ancrages mécaniques interviennent dans les frottements de glissement, jouant un rôle positif ou négatif selon la configuration et équilibrés en moyenne.

**4.2.2 - frottement dynamique** Après le début du mouvement, elle diminue jusqu'à une nouvelle valeur qui demeure constante tant que le mouvement persiste. Le travail effectué par les forces de frottement présente 3 effets :

- (1) de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur.
- (2) des déformations plastiques sont générées.
- (3) détachement de matière sur les surfaces de contact.

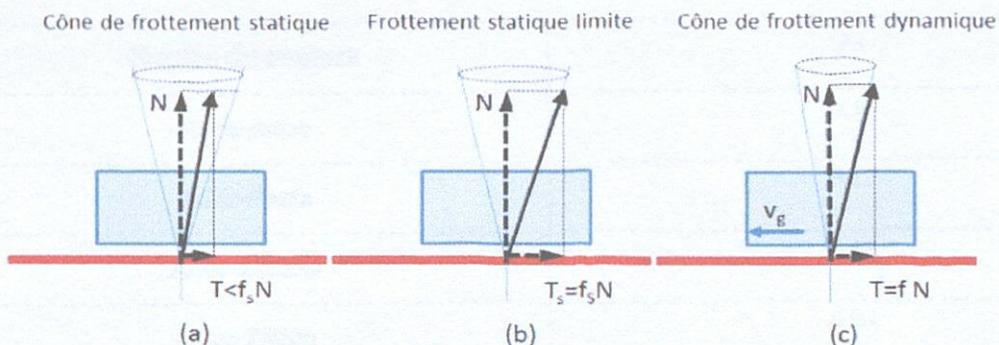


Fig. 15 : Frottement statique et statique limite et frottement dynamique

### 4.3.3 Appareil de mesure du frottement

Le tribomètre est un appareil qui mesure Le coefficient de frottement (Larousse). Présenté comme l'un des dispositifs les plus couramment utilisés, le tribomètre à disque à broches. Il se compose d'un arbre rotatif à vitesse variable avec un disque fixe, le premier matériau testé. Une goupille réalisée dans le deuxième matériau du couple tribologique est montée sur un support avec des capteurs de force normale et tangentielle. Une force normale est appliquée à la poutre pour forcer la goupille contre le disque. Il faut tourner le disque et mesurez la force tangentielle.

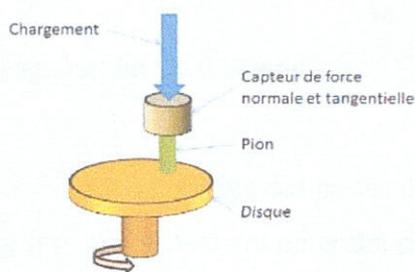


Fig 16: Le Tribomètre

### Dissipation

L'énergie fournie pour vaincre le frottement dans les contacts est dissipée sous différentes formes. Cependant, la majeure partie de cette énergie est convertie elle entraîne une augmentation locale de la température qu'il convient d'évaluer. On se placera toujours dans le cas d'un mode, et on fera l'hypothèse que toute l'énergie donnée pour vaincre le frottement est convertie en chaleur. Les frottements sont aussi très liés à la nature de matériau de contact comme le montre le tableau suivant :

Nature du contact	$f_s$
Acier-Acier	0,18
Acier-Fonte	0,19
Acier-Bronze	0,11
Acier-Téflon	0,04
Bois-Bois	0,65
Pneu-Route	0,80

On peut résumer tout cela par le graphique ci-contre, donnant la relation entre  $N$  (composante normale) et  $T$  (composante tangentielle) de la force de contact  $\vec{R}$  (résultante) entre deux corps.

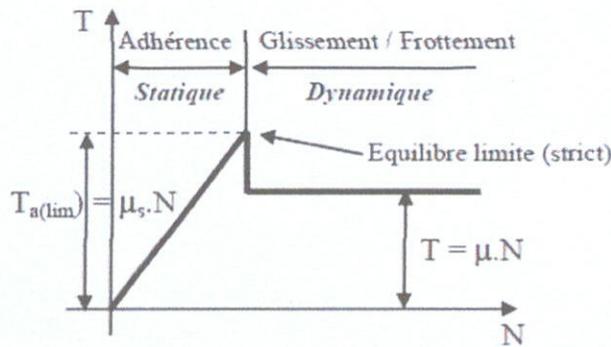


Fig. 16 : loi de frottement

**Remarques**

La force de frottement "tangentielle" ( $T$ ) est à l'origine des pertes d'énergie par frottement. Elle est toujours opposée au mouvement (ou au mouvement potentiel si équilibre).

**Conclusion**

L'une des conséquences du frottement est l'usure, qui se manifeste par une détérioration de la surface de frottement (rayures, bosses, stries, etc.), mais aussi un enlèvement de matière. Pour pallier cet inconvénient majeur de l'arrêt de la machine au bout d'un certain temps (l'usure fait changer les dimensions de la pièce et fait perdre à la surface l'aspect habituel souhaité par les ingénieurs), la surface a été huilée. , (graisses ou produits solides composés de couches pulvérulentes ou fines (talc, graphite)).



## Chapitre 4 : Etude des usures



## 1-Introduction

L'usure est un phénomène qui évolue avec le temps et définitive ; chaque état d'un système détruit définitivement l'état précédent, de sorte qu'il est très difficile, voire impossible, de reconstituer le passé à partir du constat d'une dégradation. L'usure mécanique des surfaces désigne le phénomène de dégradation des surfaces d'un solide sous l'action **mécanique** du milieu extérieur.

Selon la plupart des vocabulaires et définitions appartenant à la littérature technique spécialisée, l'**usure** est la « *perte progressive de matière de la surface active d'un corps, par suite du mouvement relatif d'un autre corps (mouvement de va et vient) sur cette surface* ».

**Une autre vision sur** la notion d'usure, qui est beaucoup moins restrictive car elle s'applique plus généralement à tout évènement conduisant à une **perte de fonction** des composants ou systèmes, ce point de vue confirmant les définitions les plus communes qui associent à l'usure la **détérioration due à l'usage**. (Technique de l'ingénieur)

## 2-Usures des pièces et organes :

Les mécanismes sont limités en durée de performances par des phénomènes d'usure, qui sont dus principalement au facteur technologique des mécanismes et des pièces même prise séparément, de leur métallurgie et plus particulièrement des traitements de surfaces, leur tolérance de fabrication, et leur condition d'utilisations.

L'usure est la cause principale de l'apparition des défaillances des machines et de la perte de leur capacité de fonctionnement. Une destruction et un enlèvement de la matière par frottement ce qui provoque avec le temps un changement progressive de la côte, de la forme et aussi de la surface de la pièce.

- La perte de fonction correspond aux mauvais fonctionnements qui peuvent résulter :
  - Des évolutions dimensionnelles, géométriques des pièces, telles que l'accroissement des jeux dû à une perte de cote (dégradation de la précision...) ou au contraire, au comblement des interfaces par l'accumulation de débris (blocage, coincement...);
  - o Des apparences de destruction des surfaces (rayures, sillons, cavités, excroissances...) dont l'influence peut être nuisible à plusieurs égards : déficience d'une étanchéité, altération des propriétés mécaniques des composants ou encore détérioration de l'aspect.

La loi de Preston-Archard a été présentée et commentée. Elle décrit l'effet sur le volume d'usure  $V$  de la force normale  $P$  et de la longueur de glissement  $L$  à l'aide de la vitesse d'usure  $k$ . Dans un certain domaine de validité, lorsque les effets thermiques restent limités, on peut

caractériser un contact frottant par sa vitesse d'usure :  $K = \frac{V}{(PL)}$

- avec :
- $V$  : volume formé par les débris d'usure,
- $P$  : force normale à la surface du contact,
- $L$  : distance cumulée parcourue par glissement,
- $k$  : vitesse d'usure, en  $\text{Pa}^{-1}$ .

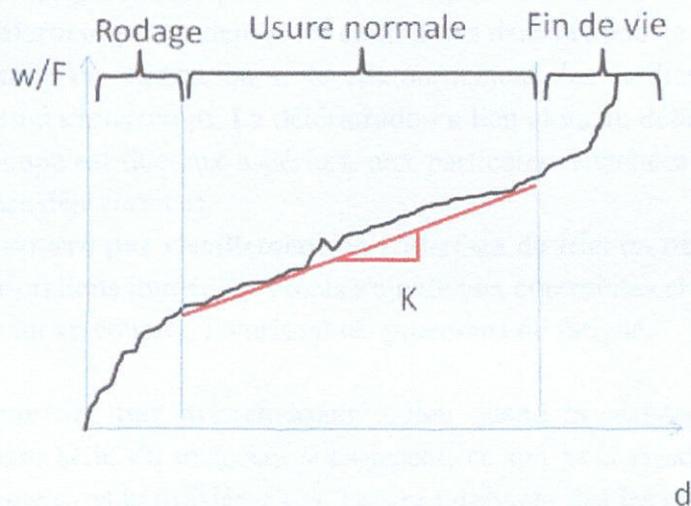


Fig. 17 : Représentation graphique de la vitesse d'usure  $K$

Une analyse du processus indique que la tenue à l'usure ou le phénomène d'usure sont influencés par :

- Les métaux accouplés.
- La rugosité des couches limites (surface, lubrification).
- Le type de mouvement (glissement, roulement, écoulement, chocs, etc.).
- La vitesse du mouvement.
- l'enlèvement des particules solides.



### 3- Classification des types d'usures :

**Kragelsky** a classé l'usure sous 5 formes **reproduit intégralement**

([https://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Usure\\_des\\_surfaces](https://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Usure_des_surfaces)) ci-dessous :

1. La **déformation élastique** du matériau par les saillies du corps antagoniste a lieu si les contraintes ne dépassent pas la limite d'écoulement dans la zone de contact. L'usure n'est alors possible que par fatigue, le passage répété du corps frottant produisant des microfissures de traction perpendiculaires à la surface.
2. Un **repoussage plastique** se produit si les contraintes de contact atteignent la limite d'écoulement et si le matériau contourne les saillies du corps antagoniste. L'usure résulte dans ce cas, après un petit nombre de cycles, de la fatigue provoquée par le contact frottant.
3. La **microcoupe** survient si les contraintes dans la zone de contact atteignent la limite de rupture ou si le contournement des saillies par le matériau déformé s'interrompt. La détérioration a lieu alors au début de l'interaction. La coupe est due aux aspérités, aux particules détachées et aux arêtes des cavités déjà formées.
4. La **rupture par cisaillement** de l'interface de friction ne provoque pas de détériorations immédiates mais s'ajoute aux contraintes et aux déformations agissant au contact, favorisant les processus de fatigue.
5. La **rupture par arrachement** a lieu quand la résistance de l'interface dépasse celle du matériau sous-jacent, ce qui peut conduire au grippage. Comme dans le troisième cas, l'usure intervient dès les premières étapes de l'interaction. L'adhésion des aspérités est favorisée par les déformations plastiques et le raclage des couches oxydées et contaminées.

### 4- Les nombreuses formes d'usures sont classées en plusieurs groupes :

- **Usure par abrasion (abrasive)** : déformation ou coupe par corps durs (sévère et modérée)
- **Usure par adhésion (adhésive)** : jonctions intermétalliques, micro grippages, par contact métal- métal.
- **Usure par corrosion** : réactivité avec l'ambiance, ou par contact (attaque chimique).
- **Fluage** : déformation sans perte de matière,
- **Fatigue** : endommagement sous des efforts répétés,
- **Autres causes d'usures** : cavitation, érosion, dissolution (enlèvement de particules par fatigue).



- Usure d'origine électrique : piquage

### Conséquences

L'usure des pièces mécaniques, localisée sur les parties en contact, génère les conséquences de :

- *diminution des propriétés* mécaniques de la surface, avec augmentation de la porosité.
- *diminution des dimensions* d'origine avec augmentation des jeux fonctionnels.
- *diminution de la résistance* à la fatigue avec augmentation de la fragilité.

Il faut donc faire une remise à niveau de ces trois états, qui passe par un rechargement en métallisation, ainsi qu'un ré usinage des parties considérées pour rendre à la pièce ses qualités d'origine. Le choix du dépôt est primordial pour redonner une nouvelle vie technique à la pièce.

### 5.1 -Usures abrasives :

L'usure par abrasion est le résultat du déplacement du matériau par des particules dures. Saillies dures. Elle peut résulter des protubérances d'une des pièces c'est à dire des aspérités dures ou des particules véhiculés par des fluides et circulent dans l'interface et peuvent provoquer des rayages.

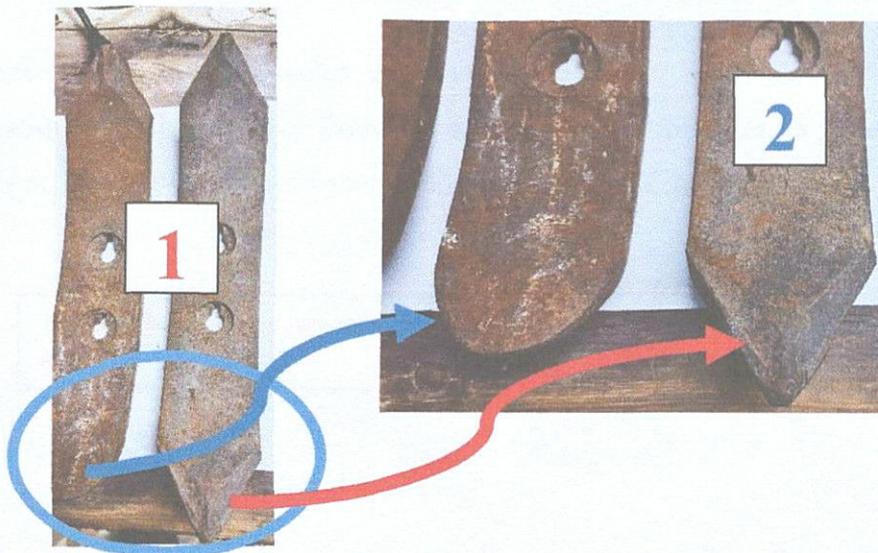
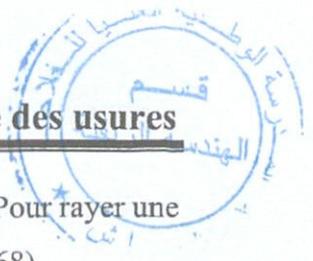


Fig. 18 : Usure abrasives sue des soc d'un cultivateur

L'usure abrasive combine altération et coupe. Elle creuse des sillons et peut y aller jusqu'à enlever de la matière. Pour rayer une surface, il faut une pièce plus dure que la première de 20



à 25%. Elle creuse des sillons et peut y aller jusqu'à enlever des micro copeaux. Pour rayer une surface, il faut une pièce plus dure que la première de 20 à 25% selon Tabor (1968).

Selon le mode d'abrasion on distingue deux types d'usures par abrasion :

**5.1.1 -L'abrasion à deux corps :**

Dans ce cas la pièce la plus dure râpe ou lime la pièce la plus tendre. L'abrasion à deux corps concerne certains secteurs, gros consommateur d'énergie et de matières ou encore les techniques d'enlèvement de matière volontaire, que l'on veut maîtriser.

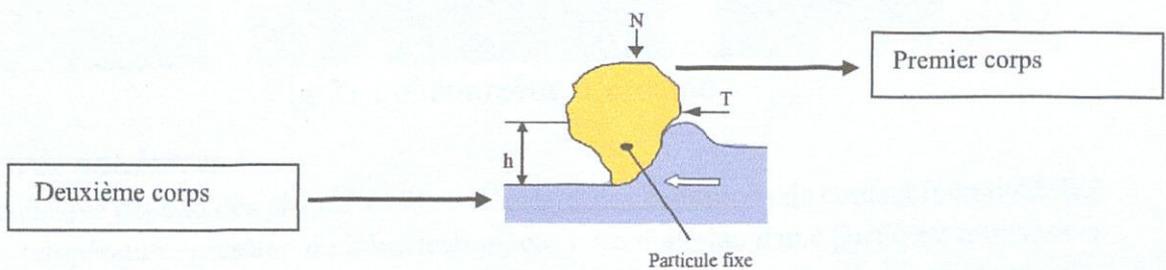


Fig.19 : abrasion à deux corps

**5.1.2- L'abrasion à trois corps :**

Dans ce cas les particules abrasives dures sont libres dans l'interface et déforment plastiquement les surfaces flottantes en créant des empreintes, la perte de matière dépend à la fois du matériau usé et de l'abrasif provoquant ainsi des rayages.

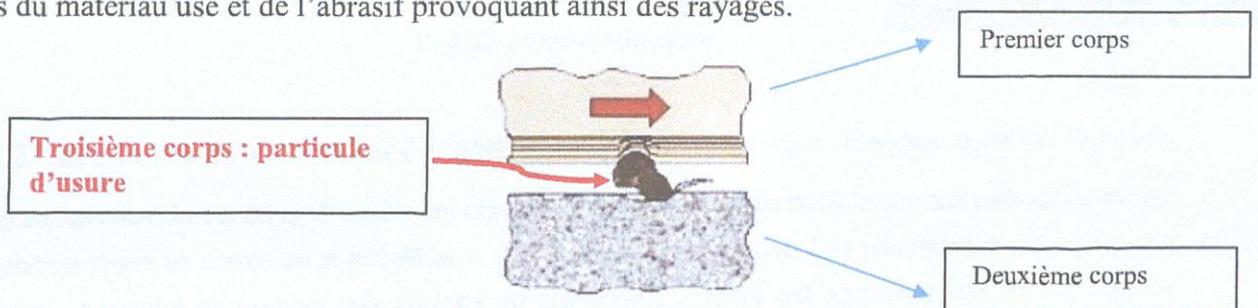
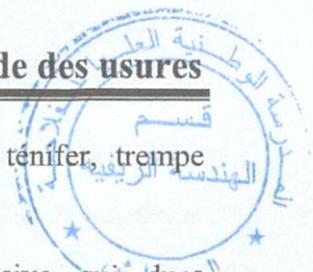


Fig 20: abrasion a trois corps

Les dommages causés par l'usure abrasive en général, peuvent être limités par le choix des matériaux. La résistance à l'abrasion peut être obtenue par un revêtement superficiel dur



comme le traitement de surface (cémentation, carbonatation, nitruration, ténifier, trempe superficielle, etc....

**5.1.3-L'érosion**, c'est une forme particulière de l'usure abrasive qui est due essentiellement au contact des fluides en mouvement relatif (huile, eau, air). Que la cause de l'érosion soit l'eau, le vent ou le travail du sol classique (charrue), dans tous les cas le sol se détache et se dépose.



Fig.21 : phénomène d'érosion

**5.2- Usures adhésives :**

L'usure adhésive dépend des propriétés du matériau et des conditions de contact (compatibilité chimique, température, pression de lubrification, etc.). Le matériau d'une partie est transféré et solidement soudé à l'autre partie. Frottement sec, échauffement local des surfaces et pression de contact.

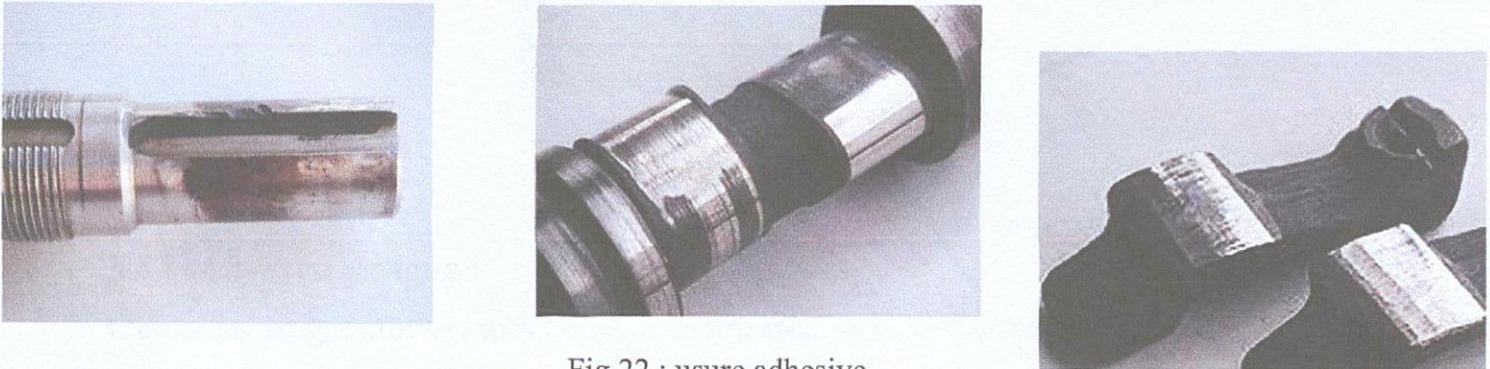


Fig.22 : usure adhésive

**5.3 Usures corrosives (usure chimique) :** Ce type d'usure intervient dans les situations où le contact fonctionne en environnement corrosif. L'énergie dissipée dans le contact peut alors activer les phénomènes de corrosion et accélérer la dégradation des surfaces. Les pièces sont rongées et portent de nombreuses piqûres ou crevasses. L'usure est aggravée par les contraintes mécaniques et le frottement.





Les moteurs sont particulièrement sensibles à l'usure corrosive par suite de leurs températures basses ou élevées de fonctionnement, de la présence de soufre dans les combustibles, de la formation de produit acides par oxydation des huiles lubrifiants.

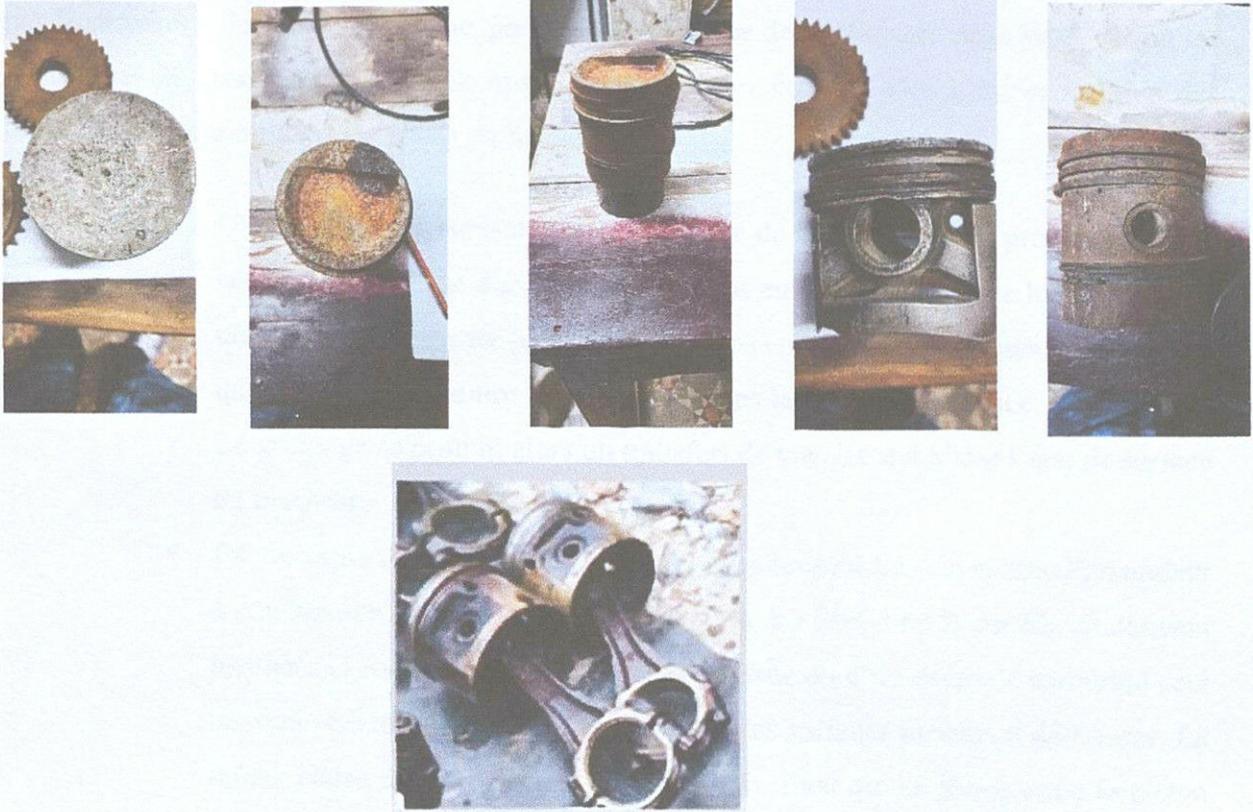


Fig. 23 : usures chimique

**5.4 Usures par fatigue :**

L'usure par fatigue provient sous l'effet de contraintes, se produit en raison d'un contact local répété. Ce type d'usure affecte principalement les roulements et les engrenages. Il y a formation de fissures dans les matériaux. Les fissures se répandent alors vers la surface avec détachement de matières dont la taille peut atteindre le millimètre. L'usure par fatigue est souvent dissimulée par l'usure et l'adhérence. Causée par le frottement des roulements ou des paliers glissants sous de lourdes charges répétées, elle se trouve principalement dans les engrenages et les roulements où il s'agit d'un mode de défaillance normal. La détérioration vieillie provoque des accidents visibles. Les pièces restent intactes jusqu'au dernier moment et peuvent être irrémédiablement endommagées. Cependant, dans certains cas, il existe des événements externes qui permettent de surveiller les pièces mobiles.

Les contraintes mécaniques générées par le frottement peuvent entraîner la création et la propagation de fissures. Dans le cas des matériaux ductiles (tels que les matériaux métalliques), il est question d'usure par fatigue superficielle ou par délamination. La rupture par fissuration a lieu en sous-couche, parallèle à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales. A terme, des écailles dues à la propagation des fissures apparaissent dans les zones de frottement.

- ✓ Usure par fatigue mécanique : ou fatigue de surface, elle est produite par une contrainte cyclique due au roulement ou entre deux surfaces lubrifiées sous une charge importante (contact hertz). Ces contraintes provoquent des fissures qui peuvent se produire en surface ou sous la couche de surface.
- ✓ Le grippage se produit alors un transfert de matière qui altère l'état de surface du matériau.
- ✓ Par exemple ce phénomène se produit entre le cylindre et le piston d'un moteur à combustion par manque de lubrification. Le film d'huile est détruit souvent localement en raison de la température élevée ou d'un excès de carburant ceci conduit rapidement a des grippages avec des surfaces fortement détériorée. La même chose se produit lorsque le film lubrifiant qui se forme entre le piston et le cylindre est insuffisant suite à un manque d'huile, cette défaillance **de ce** système tribologique nécessite une réparation couteuse.

- Une répartition des mécanismes à l'origine de l'usure dans l'ensemble des milieux industriels est présenter par la figure ci-dessous

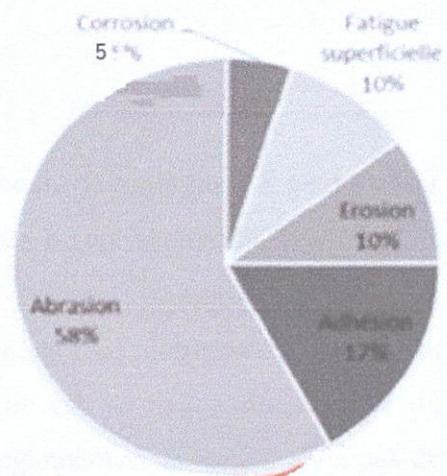


Fig 24 : répartition de l'usure dans le milieu industriel



## 6- L'usure des pneumatiques

### 6.1-Introduction

Les pneus sont une part importante de votre budget. Un bon entretien optimise l'usure retardant ainsi le remplacement tout en minimisant le temps d'immobilisation de votre voiture ou de votre tracteur, donc note spéciale selon votre activité et votre nombre. Vous devez prévoir les kilomètres que votre véhicule parcourra contrôles réguliers de la pression des pneus ainsi que des contrôles d'usure (témoin).

### 6.2 -Diagnostic des pneus usés ou endommagés :

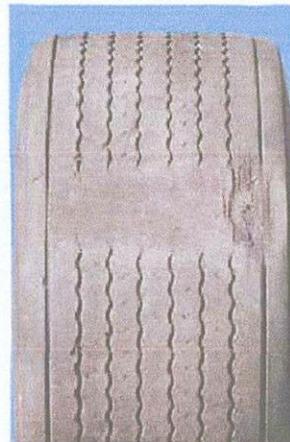


Fig. 25 : état des pneus usées

L'usure est très localisée et sa forme ressemble à celle de la bande de roulement. Il peut y avoir des rayures ou des déchirures dans le caoutchouc. Remarques complémentaires éventuelles : D'autres pneus sur le même essieu peuvent présenter les mêmes symptômes. Les causes possibles sont que les freins sont trop puissants ou que les roues sont bloquées en raison d'un défaut du système de freinage. Le résultat qui en découle est le risque de troubles du comportement. Quant aux pneus, s'ils sont conformes à la réglementation et qu'il n'y a pas de problème de comportement, il n'y a pas d'autre choix que de les rouler tels quels. Si l'usure localisée n'est pas le résultat d'un freinage excessif, le véhicule doit faire vérifier et réparer le système de freinage.



6.2.1-Coupure profonde au niveau de l'épaule du pneu

Une coupure profonde au niveau du pneu un dégât irréversible qui est dû à une perforation au roulage ou lors des manœuvres (clou, objet tranchant, nid-de-poule Etc.....). Il est préférable de faire un examen chez un professionnel lorsque la blessure est apparente dans la zone d'épaulement (jonction flanc/bande de roulement) les réparations ne sont pas adoptée dans ces cas-là donc la réparation est exclue.



Fig. 24 : coupure au niveau du pneu

6.2.2-Témoins d'usure

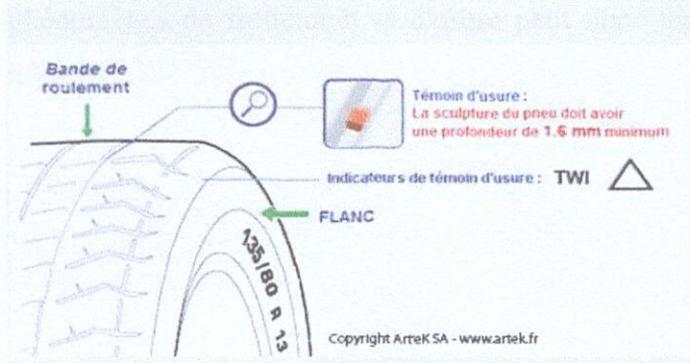


Fig 27: témoin d'usure au niveau du pneu

L'usure maximale de la bande de roulement au niveau de tous les pneus il existe des témoins d'usure qui correspondent à la limite légale d'usure de la bande de roulement qui est de 1,6 mm, quand ces témoins frôlent il reste seulement 1,6 mm de hauteur de gomme) c'est un indicateur qui quelle que soit La figure ci-dessous montre les différents cas d'usures des pneus

leur localisation sur la bande de roulement, il est obligatoire de procéder au remplacement du pneu. Pour éviter de tomber dans ce cas et pouvoir changer les pneus dans les délais il est recommandé de faire contrôler vos pneus par un professionnel, il va mesurer la profondeur de la bande de roulement avec un outil nommé « **jauge de profondeur** ».

																										
<b>Coupures multiples/ arrachements</b>	<b>Domage par pièce du véhicule/patinage</b>	<b>Domage par blocage des freins</b>																								
<table border="1"> <tr> <td>Apparence</td> <td>De nombreuses petites coupures à la surface avec des portions enlevées de la bande, laissant une apparence rugueuse.</td> </tr> <tr> <td>Cause probable</td> <td>Le véhicule travaille en terrain rude (mauvais choix de gomme).</td> </tr> <tr> <td>Action corrective</td> <td>Revoir le choix de pneu en fonction de l'opération.</td> </tr> <tr> <td>Disposition du pneu</td> <td>Domage mineur, devrait être remis en service. Consulter un rechapier pour réparation ou rechapage.</td> </tr> </table>	Apparence	De nombreuses petites coupures à la surface avec des portions enlevées de la bande, laissant une apparence rugueuse.	Cause probable	Le véhicule travaille en terrain rude (mauvais choix de gomme).	Action corrective	Revoir le choix de pneu en fonction de l'opération.	Disposition du pneu	Domage mineur, devrait être remis en service. Consulter un rechapier pour réparation ou rechapage.	<table border="1"> <tr> <td>Apparence</td> <td>Coupures ou lignes à 360 degrés tout autour du pneu.</td> </tr> <tr> <td>Cause probable</td> <td>Contact avec des pièces du véhicule (supports du garde-boue, pare-hocs), ou patinage du pneu sur la glace ou sur une route à la surface lâche.</td> </tr> <tr> <td>Action corrective</td> <td>Analyser la cause. S'assurer que le pneu n'est pas en contact avec des pièces du véhicule. Revoir les habitudes de conduite des chauffeurs.</td> </tr> <tr> <td>Disposition du pneu</td> <td>Le retourner en service si le dommage n'est pas plus creux que la bande des rainures de la bande. Si le dommage est plus creux, procéder au rechapage si possible ou le mettre aux rebut.</td> </tr> </table>	Apparence	Coupures ou lignes à 360 degrés tout autour du pneu.	Cause probable	Contact avec des pièces du véhicule (supports du garde-boue, pare-hocs), ou patinage du pneu sur la glace ou sur une route à la surface lâche.	Action corrective	Analyser la cause. S'assurer que le pneu n'est pas en contact avec des pièces du véhicule. Revoir les habitudes de conduite des chauffeurs.	Disposition du pneu	Le retourner en service si le dommage n'est pas plus creux que la bande des rainures de la bande. Si le dommage est plus creux, procéder au rechapage si possible ou le mettre aux rebut.	<table border="1"> <tr> <td>Apparence</td> <td>Usure excessive localisée au travers de la surface de la bande et démontrant des signes d'abrasion. Le dommage peut ressembler à la carcasse.</td> </tr> <tr> <td>Cause probable</td> <td>Nouvelles plaquettes de frein (non encore ajustées), système de freinage non équilibré, conduites de freins gelées, abus du chauffeur.</td> </tr> <tr> <td>Action corrective</td> <td>Vérifier le système de freinage.</td> </tr> <tr> <td>Disposition du pneu</td> <td>Si la carcasse n'est pas endommagée, il peut être réparé ou être rechapé sinon le mettre aux rebut.</td> </tr> </table>	Apparence	Usure excessive localisée au travers de la surface de la bande et démontrant des signes d'abrasion. Le dommage peut ressembler à la carcasse.	Cause probable	Nouvelles plaquettes de frein (non encore ajustées), système de freinage non équilibré, conduites de freins gelées, abus du chauffeur.	Action corrective	Vérifier le système de freinage.	Disposition du pneu	Si la carcasse n'est pas endommagée, il peut être réparé ou être rechapé sinon le mettre aux rebut.
Apparence	De nombreuses petites coupures à la surface avec des portions enlevées de la bande, laissant une apparence rugueuse.																									
Cause probable	Le véhicule travaille en terrain rude (mauvais choix de gomme).																									
Action corrective	Revoir le choix de pneu en fonction de l'opération.																									
Disposition du pneu	Domage mineur, devrait être remis en service. Consulter un rechapier pour réparation ou rechapage.																									
Apparence	Coupures ou lignes à 360 degrés tout autour du pneu.																									
Cause probable	Contact avec des pièces du véhicule (supports du garde-boue, pare-hocs), ou patinage du pneu sur la glace ou sur une route à la surface lâche.																									
Action corrective	Analyser la cause. S'assurer que le pneu n'est pas en contact avec des pièces du véhicule. Revoir les habitudes de conduite des chauffeurs.																									
Disposition du pneu	Le retourner en service si le dommage n'est pas plus creux que la bande des rainures de la bande. Si le dommage est plus creux, procéder au rechapage si possible ou le mettre aux rebut.																									
Apparence	Usure excessive localisée au travers de la surface de la bande et démontrant des signes d'abrasion. Le dommage peut ressembler à la carcasse.																									
Cause probable	Nouvelles plaquettes de frein (non encore ajustées), système de freinage non équilibré, conduites de freins gelées, abus du chauffeur.																									
Action corrective	Vérifier le système de freinage.																									
Disposition du pneu	Si la carcasse n'est pas endommagée, il peut être réparé ou être rechapé sinon le mettre aux rebut.																									

Fig 28 : différents types d'usures en fonctions des causes

**Conclusion :**

Le coût annuel de l'usure dans les pays développés est estimé à des centaines de milliards de dollars (pièces de rechange, main-d'œuvre, temps d'arrêt des usines, etc.), et l'usure affecte la productivité et réduit indirectement les matières premières et les ressources naturelles. et la surconsommation. En ce qui concerne la transmission de puissance, les pertes d'efficacité et l'usure doivent être éliminées autant que possible. La lubrification est le moyen le plus important pour minimiser les effets de deux phénomènes inévitables :C'est le sujet de la troisième majeure, Tribologie. maisLa lubrification n'est pas toujours possible. Son efficacité est d'autant plus grande que les surfaces de contact ont des propriétés compatibles et de bonnes propriétés géométriques, notamment au niveau microscopique. Une bonne connaissance des phénomènes de frottement et d'usure peut donc aider à contrôler et minimiser leurs effets négatifs.



### 1. Introduction

La lubrification est indispensable pour les machines et les équipements industriels. Elle permet de réduire les frottements, d'augmenter l'efficacité des machines, de prolonger leur durée de vie et de réduire les coûts de maintenance. Elle est également essentielle pour la sécurité et la fiabilité des machines.

Le choix du lubrifiant est primordial et dépend de nombreux facteurs : la température, la charge, la vitesse, le type de machine, etc. Il est donc essentiel de connaître les propriétés des lubrifiants et de les choisir en fonction des conditions de travail.

### 2. Principes de la lubrification :

La lubrification est le processus de réduction des frottements entre deux surfaces en contact.

## Chapitre 5 : La lubrification et graissage

La lubrification est un processus complexe qui implique de nombreux facteurs. Elle est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des machines et des équipements industriels. Elle permet de réduire les frottements, d'augmenter l'efficacité des machines, de prolonger leur durée de vie et de réduire les coûts de maintenance.

Le choix du lubrifiant est primordial et dépend de nombreux facteurs : la température, la charge, la vitesse, le type de machine, etc. Il est donc essentiel de connaître les propriétés des lubrifiants et de les choisir en fonction des conditions de travail.

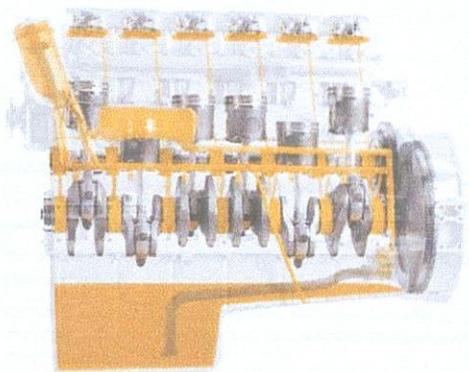


▪ **Introduction**

La lubrification est indispensable au bon fonctionnement des moteurs. Elle réduit les frottements entre les pièces mobiles, ce qui contribue à augmenter l'efficacité du moteur. Elle contribue également à réduire l'usure et la détérioration, ainsi qu'à prévenir la corrosion et la rouille.

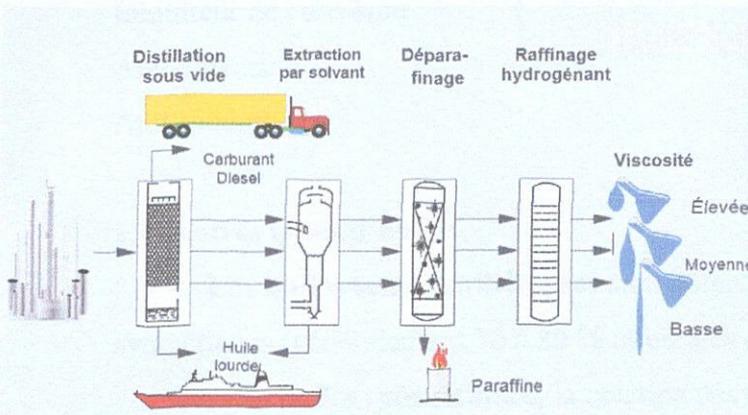
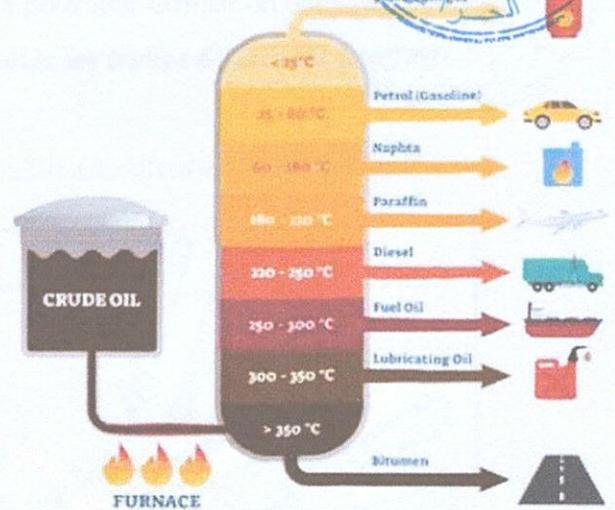
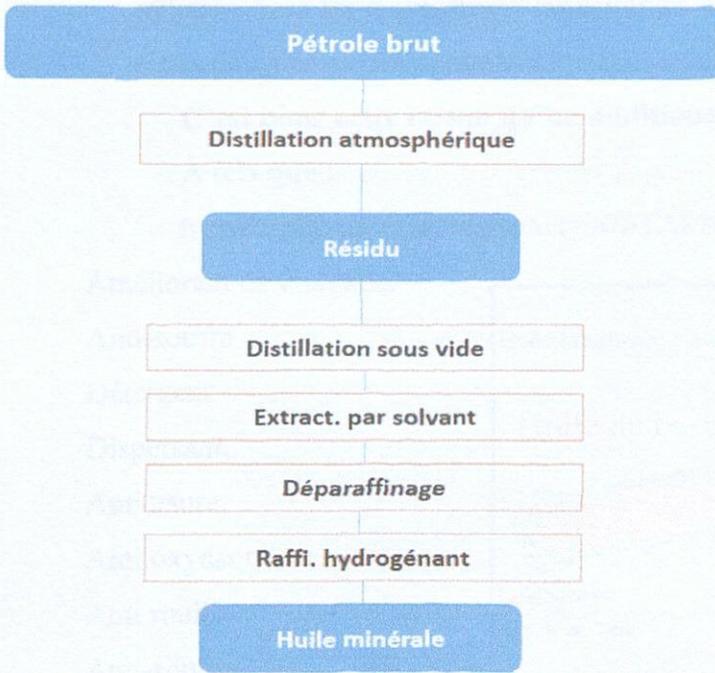
La lubrification des moteurs est généralement assurée par l'utilisation d'huile, de graisse ou d'une combinaison des deux. L'huile est utilisée pour lubrifier les pièces mobiles, tandis que la graisse est utilisée pour lubrifier les pièces fixes. Le type de lubrifiant utilisé dépend des besoins spécifiques du moteur.

**2. L'origine des huiles des moteurs :**



Le raffinage est une étape clé de la conversion du pétrole. Son but est de convertir le pétrole en une série de sous-produits de haute valeur commerciale à travers une série de processus, il passe ensuite par d'autres unités (craqueur catalytique, hydrocraqueur, alkylation, cokéfaction, reformeur, isomériser, unité de désulfuration de l'essence et du diesel) pour améliorer la qualité du produit et est converti en nouveaux dérivés créés.

Le mot pétrole ou **Petra-oléum** en latin qui signifie **huile** et pierre désigne un mélange de produits appelle hydrocarbure ; composé constitué principalement d'hydrogène et du carbone. Après avoir séjourné dans les roches sédimentaires pendant un temps relativement long, la matière organique qui s'est déposée dans un endroit confiné **Le raffinage du pétrole débute par la distillation, ou fractionnement, du pétrole brut en vue de le Séparer en différents groupes d'hydrocarbures.** Les produits obtenus dépendent directement des caractéristiques du brut traité. On transforme ensuite la plupart de ces produits de distillation **en produits plus facilement utilisables**, en modifiant leurs structures physique et moléculaire par craquage, reformage et par d'autres procédés de conversion, puis on soumet les produits obtenus à divers



Fraction du pétrole brut	Les produits issus de cette fraction (quelquefois avec un traitement supplémentaire)
Gaz (G)	Gaz dérivés du pétrole, comme les gaz combustibles entrant dans la fabrication de produits chimiques
Essence (E)	Carburant pour les automobiles, pesticides, médicaments, plastiques, engrais chimiques, détergents, solvants entrant dans la fabrication d'autres produits chimiques
Kérosène (K)	Paraffine, carburant pour avions, white spirit
Gasoil (G)	Carburant pour camions et bus, fioul pour chauffage central
Huiles lourdes (HO)	Huiles lubrifiantes et graisses, cires, encaustiques, fabrication d'autres produits chimiques
Résidus (R)	Goudron pour enrober des routes, matériaux étanches pour toitures, combustibles pour centrales électriques

Fig. 32 : le mécanisme du raffinage du pétrole

## 2.1. Les huiles minérales

2.1.1. L'huile minérale est obtenue à partir de la distillation du pétrole brut. Petit prix avec des performances "moyennes". C'est un des produits dérivé du raffinage du pétrole.

### 1.1 Le processus d'obtention de ces huiles n'est pas parfait :

Les molécules résultantes sont de tailles différentes, affectant l'homogénéité de l'huile et limitant les applications possibles. Des produits indésirables (paraffines, solvants légers...) restent également dans cette huile de base. Les huiles minérales sont les plus couramment

utilisées dans les applications automobiles et industrielles. Sauf que les huiles minérales pures qui sont de très bonne qualité sont insuffisante pour leur utilisation dans les moteurs.

C'est pour cette raison qu'on additionne à toutes les huiles différents produits :

À tels que :

<https://perso.crans.org/mbertin/AE%20GM%20Lubrification%20light.pdf>

Améliorant de viscosité.

Anti-soufre

Détergent

Dispersant,

Anti usure,

Anti oxydant,

Anti rouille

Anti-soufre

Inhibiteur de corrosion

Anti-corrosion

Anti-mousse



Fig 33 : les différents additifs

## 2.2. Autres types d'huiles

a- Les **huiles semi-synthétiques** sont obtenues à partir de mélanges d'huiles minérales et synthétiques (généralement 70 à 80 % minérales et 20 à 30 % synthétiques).

b – Les **huiles synthétiques**, la création des molécules exactes est nécessaire pour obtenir une huile de base dont les performances sont similaires à celles de la substance pure. Les produits créés ont des propriétés physiques et chimiques prédéterminées, des additifs nécessaires sont ajoutés pour obtenir le service souhaité. Ces huiles offrent des performances élevées, en particulier dans les applications et conditions de fonctionnement difficiles. Ces huiles fonctionnent bien :

1. **Indice de viscosité plus élevé. Meilleure résistance à la chaleur.**
2. **meilleure tenue thermique.**
3. **réduire le frottement**
4. **Réduire l'usure des pièces**
5. **Atténuer les chocs**
6. **Réduire la température**
7. **Protéger de la corrosion**



8. Nettoyer, évacuer et filtrer les particules étrangères sur les pièces en mouvement.

*Remarque : le rôle d'un inhibiteur est de protéger le lubrifiant.*

3. Types de lubrification :

3.1 *Hydrodynamique* : séparation de deux surfaces par un film relativement épais, par un mouvement dynamique de la pièce en mouvement.

3.2 *Hydrostatique* : introduction de lubrifiant sous pression entre les surfaces en mouvement (source de pression).

3.3 *Elastohydrodynamique* : semblable à hydrodynamique mais une des surfaces roule (roulement, dent profilée d'engrenage). Matière liquide ou solide qui, interposée entre deux surfaces, réduit les forces de frottements.

4. Principaux organes à lubrifier :

- 1- Les paliers de vilebrequin, Les têtes de bielle et les manetons,
- 2- Les paliers de l'arbre à cames
- 3- Les engrenages et la chaîne de distribution
- 4- Les rampes de culbuteur, la queue de soupapes, le guide, le poussoir, Les pistons et la paroi du cylindre,
- 5- Les commandes d'organes annexes
- 6- Relevage hydraulique

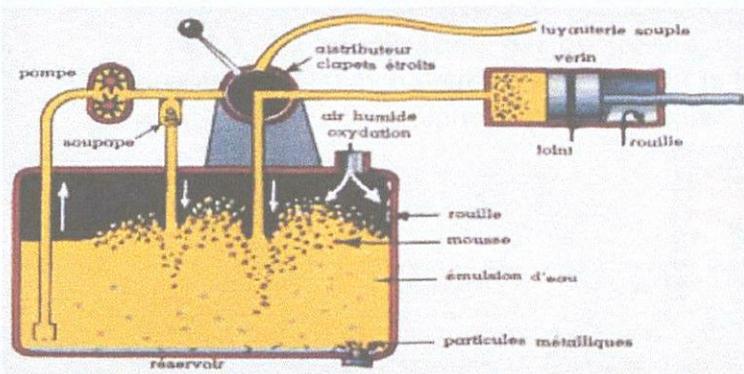


Fig 34 : la lubrification du relevage hydraulique

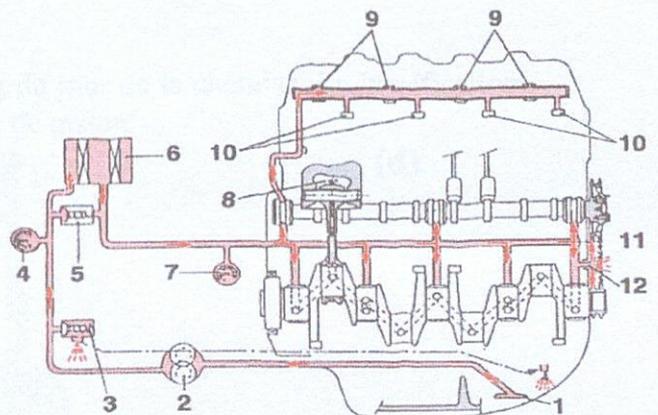


Fig 35 : le circuit complet de





## 5. Les caractéristiques et classification des huiles :

En principe, il existe deux types de classification des huiles moteur, chacune ayant ses propres différences :

- a) Classification selon la viscosité (fluidité)
- b) Évaluation par service (niveau de performance)

### 5.1 Classification selon la viscosité :

**5.1.1 La viscosité :** c'est la plus importante des caractéristiques des huiles elle est définie comme étant la résistance de l'huile à l'écoulement, elle diminue lorsque la température augmente.

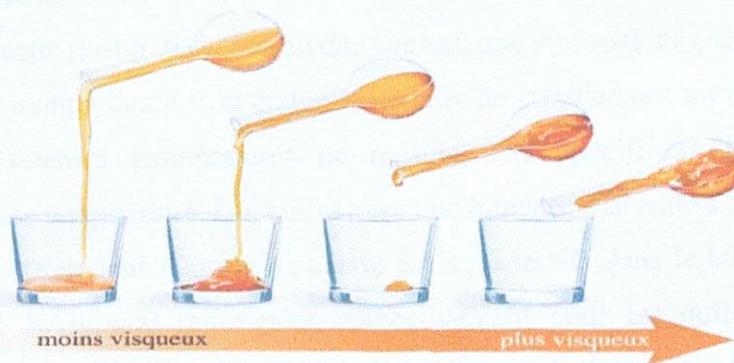


Fig 37 : les différents états de la viscosité de l'huile

**5.1.2 Indice de viscosité (IV) :** L'index ou indice de viscosité caractérise la sensibilité et la qualité d'une huile à la température, plus l'index est élevé moins la viscosité varie avec la température

*Une huile est d'autant plus fluide, et par suite s'écoule facilement que la viscosité est faible*

Les huiles sont classées suivant leur viscosité, (une huile en service s'use et s'altère plus ou moins rapidement), suivant la nature du moteur, et sa nature

### 5.2. La classification SAE :

Les lubrifiants pour les véhicules (huiles moteurs et huiles à engrenages), sont décrits avec des classes SAE (SAE = Society of Automotive Engineers), c'est En 1900 que la S A E



établit une classification en fonction de la viscosité de l'huile, Cette classification comprend des fourchettes de viscosité à des températures donnée

On y définit les éléments suivants :

- 1- Températures pour les mesures de viscosité
- 2- Valeurs seuil de viscosité
- 3- Attributions à des classes

Des huiles d'hiver la viscosité est définie à **-5 à -30 °C** suivis de la lettre **W** (winter). Des huiles d'été et dont les viscosités sont définies à **100°C**.

**Remarque : Une huile S A E 30 est plus visqueuse qu'une huile S A E 20**

Dans la plage de régime chaud, la viscosité de l'huile moteur et de l'huile pour engrenages est déterminée uniformément à 100° pour toutes les classes SAE. Ceci n'est pas pratique pour les huiles moteur. Pour cette raison, il est définit dans ce cas, une viscosité supplémentaire de 150° HTHS (haute cisaillement à haute température). Le taux de cisaillement est de 106 s-1. Selon la classe SAE, différentes températures de mesure sont spécifiées dans la plage de fonctionnement à basse température. Les huiles avec une limite de viscosité à basse température ont la lettre "W" à côté de leur numéro de classe SAE respectif. Dans le tableau qui suit les classes de viscosité SAE sont regroupées respectivement pour les huiles moteur Huile monograde / Huile multigrade Lorsqu'une huile ne répond qu'à l'exigence d'une classe SAE, c'est une huile monograde, ( SAE 10W ou SAE 30 pour des huiles moteurs). C'est une huile multigrade si elle répond aux exigences de la classe W à froid et des classes sans "W" à 100°C ou 150°C. , (SAE 0W-30 ou SAE 5W-40 pour des huiles moteurs).

**Tableau 2 : classification SAE des huiles moteurs.**

Classe de viscosité SAE	Viscosité maximale en mPa s pour une température de ... °C		Viscosité à 100°C en mm2/s		Viscosité à haute température (150°C) pour un taux de cisaillement de 106s-1 en mPa s min.
	Mise en marche / Démarrage	Pompabilité	min.	max.	
W	6200 à -35	60'000 à -40	3,8		
5W	6600 à -30	60'000 à -35	3,8		
10W	7000 à -25	60'000 à -30	4,1		
15W	7000 à -20	60'000 à -25	5,6		
20W	9500 à -15	60'000 à -20	5,6		
25W	13000 à -10	60'000 à -15	9,3		
20			5,6	≤ à 9,3	2,6
30			9,3	≤ à 12,5	2,9
40			12,5	≤ à 16,3	2,9
40			12,5	≤ à 16,3	(0W-40, 5W-40, 10W-40) 3,7
50			16,3	≤ à 21,9	(15W-40, 20W-40, 25W-40, 40) 3,7
60			21,9	≤ à 26,1	3,7



Point d'inflammabilité Ou point d'éclair:

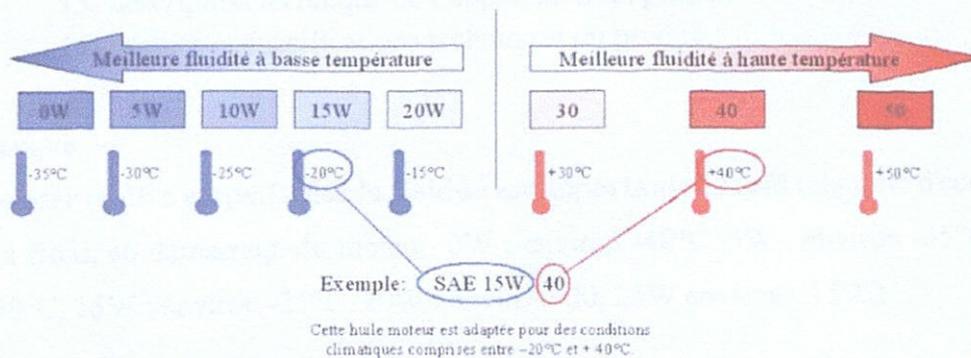


Fig 38 : impact de la température sur la fluidité des huiles

### 5.2.1 Comment lire le bidon d'huile moteur

Voici toutes les informations que vous pouvez retrouver sur un bidon. Ces dernières sont propres à chacune des références :



<https://www.lubexcel.com/actualites/comment-lire-un-bidon-d-huile-moteur->

- 1- Logo de la marque
- 2 et 9- nom du produit
- 3 et 10- description brève du produit



- 4 et 11- viscosité du produit
- 5 et 12- application du produit
- 6 et 17- conditionnement du produit
- 7 et 16- coordonnées de la marque
- 13- description technique de l'application du produit
- 14- normes et spécifications techniques du produit

### Remarque

Plus le premier chiffre est petit plus la fluidité est importante à froid (capacité d'écoulement de l'huile à froid, au démarrage du moteur. 0W : environ -40°C, 5W : environ -35°C, 10W : environ -30°C, 15W : environ -25°C, 20W : environ -20, 25W environ : 15°C).

### ✓ Autres caractéristiques des huiles de lubrification

#### - Point de combustion, ou point de feu :

C'est une propriété à laquelle huile enflammée continue à brûler quand on retire la flamme

#### - Point de solidification :

C'est la température la plus basse à laquelle l'huile reste à l'état liquide.

#### - La fixité :

C'est la caractéristique d'huile de bonne conservation,

- Fluidité / VISCOSITÉ : caractérise la vitesse d'écoulement.
- Onctuosité : pouvoir d'adhérence aux surfaces.
- Point Éclair : Température D'ébullition.
- Point De Feu : température de combustion.
- Point De Congélation : température de cristallisation.
- Fixité : conservation des caractéristiques quand t° augmente.
- Stabilité : conservation des caractéristiques dans le temps.
- Disponibilité : maintien des résidus en suspension.
- Détergent : évite l'agglomération des résidus.
- Neutralité : n'attaque pas les métaux et les plastiques.

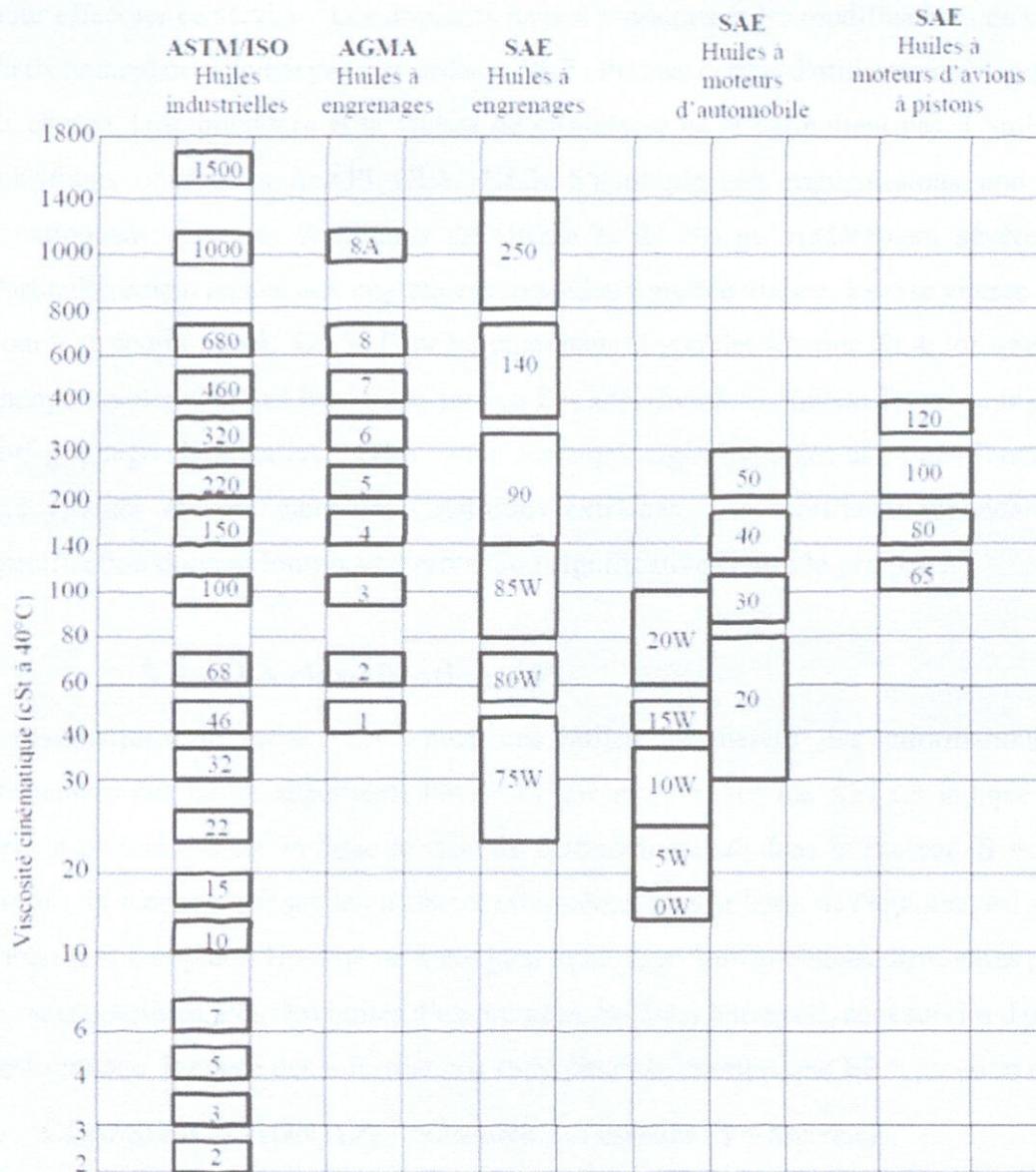
## 5.3 La classification selon les performances :

### 5.3.1 La classification GL : Transmissions mécaniques



-Classification CCMC : moteurs Diesel : PD1,PD2.....

Tableau 3 : synthèse de la classification des huiles



6. Les Graisses :

Les graisses peuvent être définies comme des produits solides ou semi-solides résultant de la dispersion d'épaississants dans des lubrifiants liquides. Des additifs peuvent être ajoutés à ce produit pour lui conférer des propriétés particulières. Les principaux facteurs affectant les propriétés et les propriétés de la graisse lubrifiante sont :

- Type et quantité d'épaississant

**GL1** : S'applique dans tous les cas où l'huile minérale pure est suffisante pour l'engrenage en dessous faible pression unitaire et vitesse de glissement lente. Antioxydants, inhibiteurs de rouille, Des agents anti-mousses peuvent être utilisés pour assurer les propriétés du lubrifiant pour effectuer ce service. Les dopants hautes pressions et les modificateurs de coefficient de frottement ne peuvent pas être utilisés. **GL2** : Précise le type d'utilisation où les conditions de charge, la température et la vitesse de glissement ne le permettent pas. L'utilisation de lubrifiants conformes à API GL1. **GL3**: S'applique aux transmissions non hypoïdes fonctionnant dans des conditions de vitesse et de charge modérément sévères. **GL4** : Particulièrement adapté aux engrenages hypoïdes à grande vitesse, à basse vitesse et à faible couple et couple élevé. **GL5** : Pour les engrenages hypoïdes tels que GL4, lorsque la charge change rapidement. Les lubrifiants font ça Les spécifications doivent fournir une protection anti-grippage significative. **GL6** : Pour les engrenages hypoïdes extrêmes fonctionnant à des vitesses élevées dans des conditions extrêmes. Les lubrifiants répondant à cette spécification doivent fournir une protection significative contre le grippage.

### 5.3.2. La classification API

Les désignations de service API pour ces huiles fournissent des informations sur les performances des huiles spécifiées. Pour l'huile moteur, service API est indiqué par deux lettres, la première lettre indique le type de carburant utilisé dans le moteur (S =essence et C=diesel), la seconde indique la puissance elle-même, plus la lettre de l'alphabet est grande les performances comptent. Une même huile peut avoir deux performances différentes pour deux carburants possibles. Pour les huiles d'engrenages, les deux lettres GL sont suivies d'un numéro de performance. Il existe des informations supplémentaires telles que EP = pression extrême.

- **CLASSIFICATION API : S: moteurs à essence (S = Service)**
- **CLASSIFICATION API : C... : moteurs Diesel (C = Commercial)**

**Remarque : Les services API sont définis par l'industrie américaine et ne sont pas assez bons pour les moteurs européens, donc selon le rapport puissance/poids et des conditions de fonctionnement très exigeantes. Une désignation européenne et appliquée Par les services européens. C'est le service CCMC.**

### 5.3.3 Classification CCMC

- Classification CCMC : G... : moteurs essence :



- Viscosité de l'huile et propriétés physiques

Tableau 4 : composition des graisses

Poly glycols	Bonnes propriétés lubrifiantes, point éclair élevé. Haut indice de viscosité : 150 à 200, faible volatilité, bonne stabilité thermique, incompatible avec les huiles minérales. Exemples d'utilisations : Poly glycol soluble à l'eau : fluide difficilement inflammable, fluide d'usage Poly glycol insoluble : fluide de frein, lubrifiant moteur, lubrifiant engrenage ...
Esters	Faible volatilité, bonnes propriétés à froid, bonne tenue thermique, bonne propriété solvante et bonne résistance au cisaillement. Exemples d'utilisation : graisse, turbine à gaz, aviation, utilisé comme additif (pouvoir lubrifiant élevé).
Hydrocarbures synthétiques (polyalphaoléfines)	Comportement à froid performant, indice de viscosité élevé. Selon la longueur de la chaîne, bonne propriété thermique. Exemples d'utilisations : lubrifiant d'engrenages, compresseur ...
Silicone	Inerte chimiquement, grande résistance à la chaleur et à l'oxydation. Hydrophobe, indice de viscosité élevé (jusqu'à 300), bonne propriété à froid. Incompatibilité chimique avec de nombreux additifs. Pouvoir lubrifiant très médiocre. Exemples d'utilisations : graisse, fluide hydraulique ...
Glycol	Utilisées dans les compresseurs (air, frigorifiques) pour la propreté des clapets, compatibilité avec les fluides frigorigènes, caloporteur...

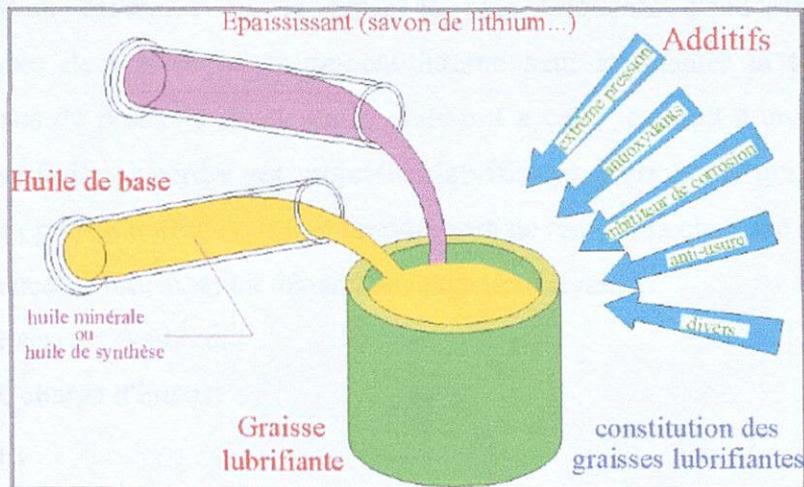


Fig 39 : les différents types d'additifs dans les graisses

Additif doit être gras :

- Réduit la friction et l'usure
- Protège contre la corrosion
- Roulements scellés pour empêcher la pénétration d'eau et de contaminants
- Résistant aux fuites, gouttes et déversements
- Tolérance aux changements de structure ou de consistance pendant le service
- Restez portable pendant que vous l'utilisez
- Compatible avec les joints
- Autoriser ou rejeter l'humidité



Tableau 5 : Les différentes caractéristiques des graisses

Type	Graisses ordinaires			Graisses complexes			Synthétiques		
	Calcium	Lithium	Sodium	Aluminium	Calcium	Baryum	Lithium	Polyurie	Bentone
Point de goutte °C	80-100	175-205	170-200	260+	260+	200+	260+	250+	aucun
Temp. max °C	65	125	125	150	150	150	160	150	150
Caract. haute temp.	très faibles	bonne	bonne	excel.	excel.	bonne	excel.	excel.	excel.
Caract. basse temp.	moyenne	bonne	faible	bonne	moyenne	faible	bonne	bonne	bonne
Stabilité mécanique	moyenne	bonne	moyenne	excel.	bonne	moyenne	excel.	bonne	moyenne
Résistance à l'eau	excel.	bonne	faible	excel.	excel.	excel.	excel.	excel.	moyenne
Stab. à l'oxydation	faible	bonne	bonne	excel.	excel.	faible	bonne	excel.	bonne
Texture	lisse	lisse	fib. ou liss.	lisse	lisse	fibreuse	lisse	lisse	lisse

### 6. Comment appliquer la graisse ?

Une lubrification excessive est la cause la plus fréquente d'endommagement des roulements. L'excès de graisse Le frottement interne peut augmenter la température du roulement au-dessus du point de goutte de la graisse. De cela, conduit à une séparation de l'huile et la graisse finit par perdre ses propriétés lubrifiantes. Lors de du graissage Pour les roulements en deux parties normaux, il faut prendre soin de remplir la chambre de lubrification au tiers. La fréquence de lubrification dépend des facteurs suivants :

- Difficulté de service Ambient
- État du joint, charge d'impact

#### Conclusion :

**Dans un moteur, une bonne lubrification augmente le rendement en réduisant les pertes mécaniques dues aux frottements.**



Références



## Références

## Les sites internet

- 1- <https://www.ummtto.dz/dspace/bitstream/handle/ummtto/3892/Ammam,%20Djamel%20Hamidi,%20Yacine.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- 2- <https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/Cour%201%20lubrification%20.pdf>
- 3- [https://content.euromaster.fr/b2b/sites/fr\\_b2b/files/2021-01/optimiser-usure-pneus-poids-lourds-1.pdf](https://content.euromaster.fr/b2b/sites/fr_b2b/files/2021-01/optimiser-usure-pneus-poids-lourds-1.pdf)
- 4- [https://www.gerad.ca/Sebastien.Le.Digabel/MTH2302D/13\\_fiabilite.pdf](https://www.gerad.ca/Sebastien.Le.Digabel/MTH2302D/13_fiabilite.pdf)
- 5- <https://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/7%20Usure%20et%20proprietes%20des%20materiaux%2028%20pages.pdf>
- 6- <https://www.agri-mag.com/2017/06/17/mecanisation-maintenance-tracteur/>

## Les livres

- 7- Matériel de travail du sol
- 8- Bouami, D. (2019). *Le grand livre de la maintenance : concepts, démarches, méthodes, outils et techniques*. Afnor.
- 9- Philippe Lerat. (2007). *Les machines agricoles : conduite et entretien*
- 10- *Fonctionnement et entretien du moteur à essence*. 4eme édition Centre national d'études et d'expérimentation du machinisme agricole
- 11- *Fonctionnement et entretien du moteur diesel ; 4eme édition Centre national d'études et d'expérimentation du machinisme agricole*
- 12- Notice d'entretien. Tracteur agricole Deutz 15CV . brochure
- 13- Billot, J. F., Aubineau, M., & Autelet, R. (1993). *Les matériels de travail du sol, semis et plantation*. Paris: CEMAGREF/ITCF/TEC et Doc.
- 14- Barrau, O. (2004). *Étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud* (Doctoral dissertation).
- 15- S Petrov, S., & Bisnovaty, S. (1986). *Repair of farming machinery*. Mir Publishers.