

II.1 Introduction

Dans un contexte économique fortement concurrentiel, la maintenance industrielle constitue un enjeu économique décisif dans le secteur industriel, tant au plan strictement économique qu'au plan humain. Nombreuses sont les techniques qui peuvent être, et doit être, utilisées dans un programme de maintenance. Les systèmes mécaniques et les machines constituant la majorité des équipements industriels, le contrôle de vibration constitue généralement l'élément clé des programmes de maintenance conditionnelle. Le plus souvent, la maintenance préventive repose uniquement sur des analyses de fiabilité qui ne tiennent pas compte des sollicitations influençant réellement les équipements du système tout au long de son fonctionnement.

II.2 Application de l'AMDEC

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effet et de leur Criticité) , est une méthode inductive permettant, pour chaque composant d'un système , de recenser son mode de défaillance et son effet sur le fonctionnement ou a sécurité du système .

L'indice de criticité « C » est la résultante des facteurs de risques . Il est déterminé par le produit des trois indices (équation II.1)

- ❖ « G » , Indice de Gravité.
- ❖ « O » , Indice de fréquence d'Occurrence .
- ❖ « D » , Indice de non Détection.

$$C = D * O * G \quad (II.1)$$

Si chaque indice est noté de 1 à 4, la criticité peut évoluer de 1 à 64. Plus l'indice est grand, plus le risque lié aux défaillances potentielles est élevé. Une stratégie d'amélioration des produits consiste à traiter les criticités supérieures à un seuil donné.(Tableau II.1) illustre exemple d'application de L'AMDEC.

L'AMDEC consiste à analyser :

- les défaillances,
- leurs causes,
- leurs effets.

L'AMDEC est réalisée grâce à des contrôles :

- de différents points de la chaîne de production,
- du produit ou du service fini.

Gravité G : impact des défaillances sur le produit ou l’outil de production			
1	Sans dommage : défaillance mineure ne provoquant pas d’arrêt de production et aucune dégradation notable des matériel.	3	Important : défaillance provoquant un arrêt significatif, et nécessitant une intervention importante.
2	Moyenne : défaillance provoquant un arrêt de production et nécessitent une petite intervention.	4	Catastrophique défaillance provoquant un arrêt impliquant des problèmes graves.
Fréquence d’occurrence O : probabilité d’apparition d’une cause ou d’une défaillance			
1	Exceptionnelle : la possibilité d’une défaillance est pratiquement inexistante.	3	Certains : il ya eu traditionnellement des défaillances dans le passé.
2	Rare : une défaillance occasionnels s’est déjà produite ou pourrait se produire.	4	Très fréquente: il est presque certain que la défaillance se produira souvent.
Non- détection D : probabilité de non- perception de l’existence d’une cause ou d’une défaillance			
1	Signes avant-coureurs : l’opérateur pourra détecter facilement la défaillance	3	Aucun signe : la recherche de la défaillance n’est pas facile.
2	Peu de signes : la défaillance est décelable avec une certaine recherche.	4	Expertise nécessaire: la défaillance n’est pas décelable ou encore sa localisation nécessite une expertise approfondie

Tableau II.1 : Facteurs d’évaluation de la criticité

L’indice de criticité, qui vise à évaluer le niveau de risque associé à la fonctionnalité d’un équipement permet de décider l’action à entreprendre (**tableau II.2**).

C < 16	Ne pas tenir compte
16 ≤ C < 32	Mise sous préventif à fréquence faible
32 ≤ C < 36	Mise sous préventif à fréquence élevée
36 ≤ C < 48	Recherche d’amélioration
48 ≤ C < 64	Reprendre la conception

Tableau II.2 : Échelle de criticité (C=G*O*D).

II.2.1 Application de l’AMDEC

Ces outils peuvent procurer un encadrement très utile car les analyses qualitative et quantitative de l’AMDEC s’insèrent dans une méthodologie globale (également applicable pour un produit déjà conçu) :

- ❖ définition de l’étude ;
- ❖ préparation de l’étude ;
- ❖ analyse et évaluation des défaillances potentielles ;

- ❖ actions correctives ou préventives ;
- ❖ réévaluation après actions correctives ;
- ❖ criticité résiduelle et liste des points critiques ;
- ❖ planification et mise en place des actions correctives.

II.3 La fiabilité R(t)

« Caractéristique d'un bien exprimée par la **probabilité** qu'il accomplisse une **fonction requise** dans des **conditions données** pendant un **temps donné** » (NF X 60-500).

Exemple1: La fiabilité d'un roulement de broche pendant 20 000 heures de fonctionnement est égale à 0.9 signifie :

- Qu'il y a 90 chance sur 100 → PROBABILITÉ
- 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

II.3.1 Les indicateurs liés à la fiabilité son :

- **R(t)** - fonction fiabilité (R vient de l'anglais reliability).
- **N** - nombre de pannes ;
- **λ(t)**- Le taux de défaillance ,Il représente une proportion de dispositifs survivants à un instant t(exprimé en pannes/unité d'usage);
- **MTTF** - moyenne des temps de bon fonctionnement jusqu'à la première défaillance, pour un système non réparable on à (MTTF=MTBF).
- **MTBF**- (qui vient de l'anglais *Mean Time Between Failure*) représente la moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances d'un **système réparable** ou le temps moyen entre défaillances ;

II.3.2 Calcul de la MTBF :

$$MTBF = \frac{\sum \text{Temps de Bon Fonctionnement (TBF)}}{\text{Nombre de pannes}} \quad (\text{II.2})$$

II.3.3 Calcul du taux de défaillance λ :

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad \text{Si } R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{alors } MTBF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = -1/\lambda [e^{-\lambda t}]_0^{\infty} = 1/\lambda$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (\text{II.3})$$

Exemple2: un compresseur industriel a fonctionné pendant 8000 heures en service continu avec 5 pannes dont les durées respectives sont : 7 ; 22 ; 8,5 ; 3,5 ; 9 heures .Déterminons son MTBF.

$$MTBF = \frac{8000 - (7 + 22 + 8,5 + 3,5 + 9)}{5} = \frac{8000 - 50}{5} = 1590 \text{ heures.....} \tag{II.4}$$

si λ est suppose constant :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{1590} = 0,0006289 = 6,289 \times 10^{-4} \text{ Défaillance/heures...} \tag{II.5}$$

Soit environ 0,0007 défaillance par heures ou 0,7 défaillance 1 000 heures

II.3.4 Loi exponentielle

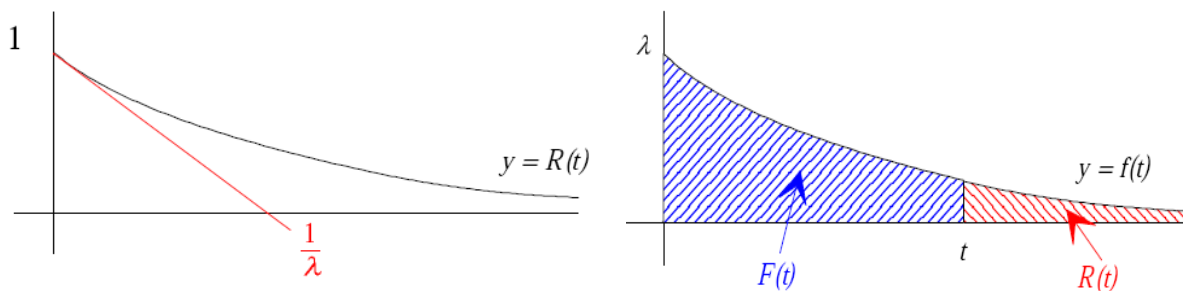
La loi exponentielle est la loi suivie par la variable aléatoire T lorsque le taux d'avarie est constant. Pour tout $t \geq 0$ on a $\lambda(t) = \lambda$ constante strictement positive.

Pour tout $t \geq 0$:

Fonction de fiabilité: $R(t) = e^{-\lambda t}$

Fonction de défaillance: $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$

Densité de probabilité: $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$



$$MTBF : E(T) = 1/\lambda \quad \text{Ecart type} : \sigma(T) = 1/\lambda$$

L' égalité $R(t) = e^{-\lambda t}$ est équivalente à $\ln R(t) = \ln(e^{-\lambda t})$, $\ln R(t) = -\lambda t$

Posons $Y = \ln R(t)$, on obtient $Y = -\lambda t$. Donc les points de coordonnées $(t ; Y)$ tracés dans le même repère orthogonal sont alignés sur une droite passant par $O(0 ; 0)$.

On estime que T suit une lois exponentielle si, pour un grand échantillon, les points connus de coordonnées $(t_i ; \ln R_i)$ construit dans un repère orthogonal sont approximativement alignés avec l'origine.

II.3.5 LE MODELE DE WEIBULL

La loi de Weibull est un modèle couramment employé pour modéliser la durée vie d'un matériel.

Cela permet de déterminer par exemple les périodicités dans le cas d'une maintenance préventive systématique. La loi de Weibull est très souple d'utilisation, ce qui lui permet de s'ajuster à un grand nombre d'échantillons prélevés au long de la vie d'un équipement. Elle couvre les cas de taux de défaillance variables, décroissants (périodes de jeunesse), ou croissant (période de vieillesse). Elle permet d'ailleurs, à partir des résultats obtenus de déterminer dans quelle période de sa vie se trouve le système étudié.

➤ **Définitions des paramètres utilisés**

Paramètres de Weibull : β est le paramètre de forme.

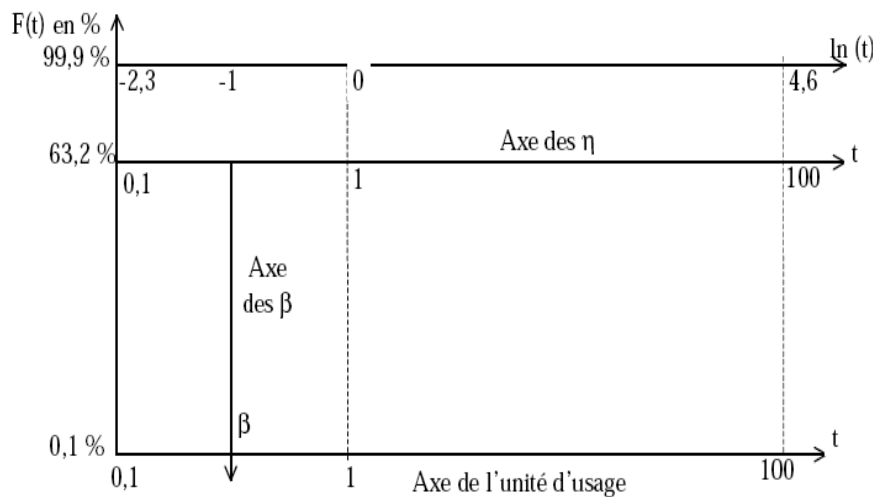
η est le paramètre d'échelle.

γ est le paramètre de position.

Fiabilité $R(t)$:	Taux de défaillance $\lambda(t)$	MTBF
$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$ <p>exp = 2,71828 base du logarithme népérien</p>	$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \times \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$	$MTBF = \eta \times A + \gamma$ <p>Le paramètre A est déterminé par la lecture des tables de Weibull en fonction du paramètre β.</p>

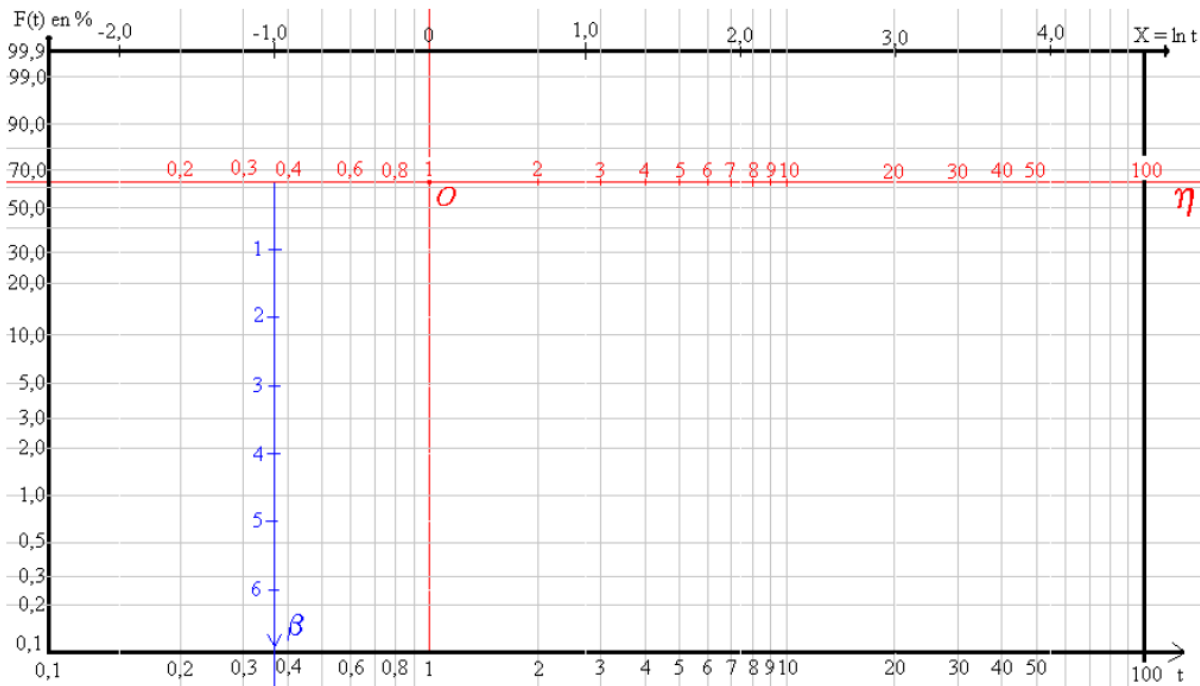
La courbe est tracée sur un papier spécial appelé papier de Weibull ou d'Allen Plait, ce qui permet de tracer une droite et de simplifier les calculs.

a) **Schématisation des axes**



L'axe des abscisses est gradué en logarithme décimal ($\log t$) et l'axe des ordonnées est gradué en logarithme népérien de logarithme népérien ($\ln(\ln(1/1 - F(t)))$).

b) Aspect du papier de Weibull



➤ **Méthodologie de Weibull**

1. Consulter les historiques de pannes et dresser la liste des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances.
2. Classer ces temps par ordre croissant.
3. Cumuler le nombre de défaillances (rang). Au premier temps il y a 1 avarie, au deuxième temps, il y en a 2, etc.
4. Calculer les fréquences des avaries $F(i)$, en fonction de la taille N de l'échantillon :

$N \leq 20$ méthode des rangs médians	$N > 20$ et $N < 50$ formule des rangs moyens	$N \geq 50$ groupement par classes
$F(i) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4}$	$F(i) = \frac{i}{N + 1}$	nombre de classes : $K \approx \sqrt{N}$ avec $X_M = TBF_{maxi}$, $X_m = TBF_{mini}$ $F(i)$ est alors calculé pour la limite supérieure de chacune des classes, en utilisant les rangs moyens.

5. Reporter les points ainsi trouvés sur le papier de Weibull en plaçant les TBF en abscisse et les $F(i)$ en ordonnée.
6. Tracer la droite passant au mieux par les points obtenus.
Si les points sont alignés sur une droite, on a $\gamma = 0$.
7. Détermination des paramètres η et β :
- Le paramètre η est obtenu par l'intersection de la droite tracée avec l'axe des h lue sur ce dernier axe. L'échelle utilisée pour la lecture devra être la même que celle choisie pour l'axe de t.

- Le paramètre β est obtenu en traçant une parallèle à la droite précédente et passant par la valeur 1 de l'axe des η . La valeur de β se lit sur l'axe des β , à l'intersection avec la droite parallèle tracée ci-dessus.

8. Interpréter les résultats

L'objectif de la maintenance peut consister, entre autres, à diminuer le nombre de défaillances touchant une machine. On s'intéresse donc plus particulièrement à la probabilité d'apparition de ces défaillances sur la durée de vie de la machine. Cette probabilité, ou taux de défaillance, évolue souvent suivant une courbe en « baignoire » (figure I.1) principalement pour les équipements électromécaniques.

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ indicateur de la fiabilité (exprimé en pannes par heure), peut être obtenu à partir des retours d'expériences, la vie des équipements se divise en trois phases:

- ❖ phase de jeunesse : $\lambda(t)$ décroît rapidement.
- ❖ Phase de maturité : $\lambda(t)$ est pratiquement constant.
- ❖ Phase de vieillesse : $\lambda(t)$ croît rapidement.

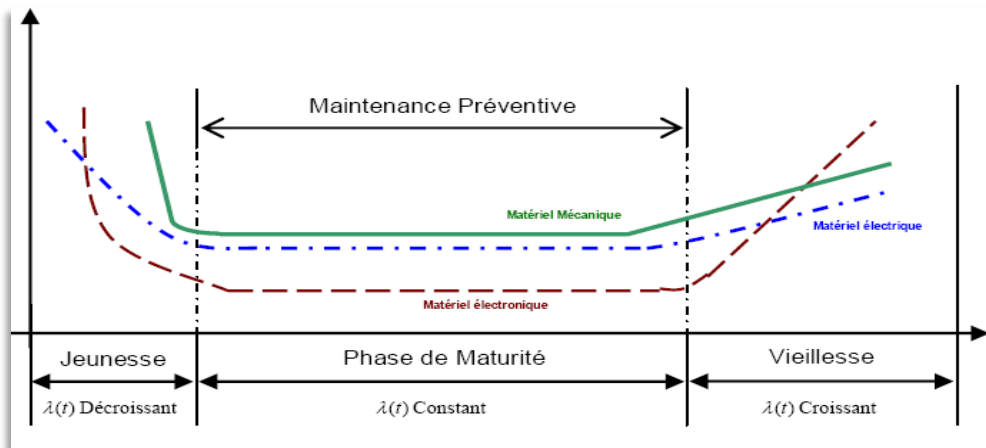
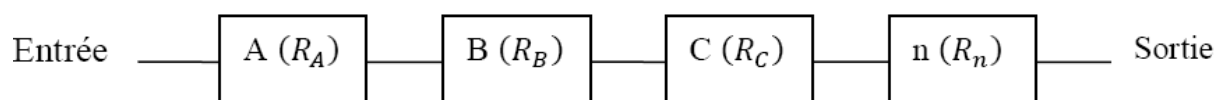


Figure I.1 : Taux de défaillance en fonction du temps

✓ **Fiabilité de Système en série**

$R(s)$ représente la fiabilité d'un ensemble de "n" composants montés en série. La fiabilité $R(s)$ d'un ensemble de "n" composants A, B, C , ..., n montés ou connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives $R_A, R_B, R_C, \dots, R_n$ de chacun des composants.



Si les taux de défaillances sont constants au cours du temps la fiabilité sera calculée suivant la formule:

$$R_s = R_A \times R_B \times R_C \times \dots \times R_n \Rightarrow R_s = R_s = e^{-\lambda_A t} \times e^{-\lambda_B t} \times e^{-\lambda_C t} \times \dots e^{-\lambda_n t}$$

$$\text{Avec : } MTBF = \frac{1}{\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \dots + \lambda_n}$$

Si en plus, les composants sont identiques : $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_C = \dots = \lambda_n$ Alors :

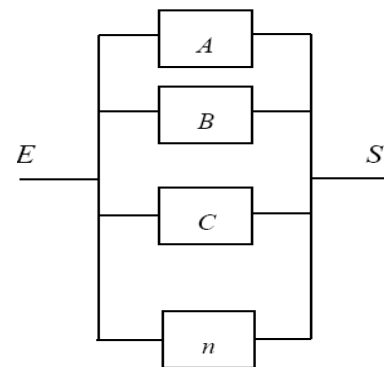
$$R_s = e^{-n\lambda t} \text{ et } MTBF = \frac{1}{n\lambda}$$

✓ Fiabilité de Système en série en parallèle

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant des composants (identiques ou non) en parallèle. Un dispositif, constitué de "n" composants en parallèle, ne peut tomber en panne que si les "n" composants tombent tous en panne au même moment. Soit les "n" composants de la figure ci-dessous montés en parallèle. Si la probabilité de panne pour chaque composant repéré (i) est notée Fi, alors :

La fiabilité R_p de l'ensemble est donnée par la relation :

$$R_p = 1 - (1 - R_A) \times (1 - R_B) \times (1 - R_C) \times \dots \times (1 - R_n)$$



Remarque : Si les "n" composants sont identiques ($R = R_A = R_B = \dots = R_n$) et ont tous la même fiabilité R_p , l'expression devient : $R_p = 1 - (1 - R)^n$

II.4 La maintenabilité M(t)

Selon la norme AFNOR X 60-010, « c'est l'aptitude dans des conditions données d'utilisation, d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir sa fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits »

II.4.1 Indicateurs de Maintenabilité sont :

- $\mu(t)$ -taux de réparation qui s'assimile à la probabilité que le système soit réparé entre l'instant t et l'instant (t+dt).
- MTTR- moyenne des temps de réparation (Mean Time To Repair).

II.4.2 Calcul de la maintenabilité (MTTR)

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Temps d'intervention pour } n \text{ pannes}}{\text{Nombre de pannes}(n)} \quad (\text{II.6})$$

II.4.3 Taux de réparation μ

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}} \quad (\text{II.7})$$

Le temps de réparation est composé de :

- Signalisation de la panne à l'administrateur .
- Détection du composant défectueux et son isolation.
- Remplacement du composant défectueux .
- Vérification que la panne a été réparée et que le système est opérationnel.

Exercice :01

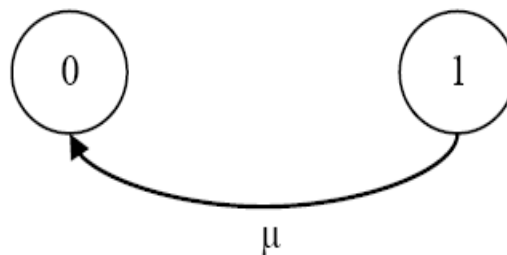
Déterminer par la chaîne de Markov que : $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$

Remarque On peut calculer l'maintenabilité $\bar{M} = 1 - M(t)$ directement à partir de la chaîne de Markov précédente. En effet, c'est la probabilité que le système qui est initialement en panne ne puisse pas être réparé. Il faut donc considérer la chaîne de Markov où on supprime toutes les transitions des états de marche vers les états de panne.

$$\bar{M} = \sum_{i \in \text{états de panne}} P_i(t)$$

Solution

Chaîne de Markov :



Matrice taux de défaillance : $M = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \mu & -\mu \end{bmatrix}$

$$\text{Equations d'états : } \begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = \mu P_2(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = -\mu P_2(t) \\ P_1(t) + P_2(t) = 1 \end{cases}$$

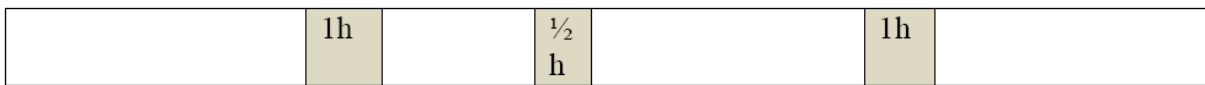
$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -\mu P_2(t) \Rightarrow \frac{dP_2(t)}{dt} + \mu P_2(t) = 0$$

$$\Rightarrow P_2(t) = e^{-\mu t}$$

$$\bar{M} = \sum_{i \in \text{états de panne}} P_i(t) \Rightarrow \bar{M} = e^{-\mu t}$$

$$\bar{M} = 1 - M(t) \Rightarrow M(t) = 1 - \bar{M} \text{ Donc : } \boxed{M(t) = 1 - e^{-\mu t}}$$

Exemple : La figure ci-dessous illustre le fonctionnement d'un équipement sur 24 heures :



	Bon fonctionnement
	Panne (d'arrêt)

A) Calculer la MTTR et le taux de réparation :

$$\text{Solution : } MTTR = \frac{2,5}{3} = 0,83h = 1,2h^{-1}$$

Le taux de réparation indique l'aptitude d'un bien à être dépanné et/ou réparé. Dans le cas où il est constant la fonction de maintenabilité est : $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$

II.5 La disponibilité A(t)

A(t) (A pour Availability) « 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 la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée » .

II.5.1 Indicateurs de disponibilité

L'indicateur de base de la disponibilité opérationnelle (**D**), est :

$$\text{Disponibilité} = t_F / (t_F + t_P)$$

- t_F : temps de fonctionnement du système.
- t_P : temps de la panne du système.

$$t_P = \text{nombre d'échecs} * MTTR = t_F * \lambda * MTTR$$

donc Disponibilité = $1 / (1 + \lambda * MTTR)$ **or** $\lambda = 1 / MTBF$ Par conséquent :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} < 1 \tag{II.8}$$

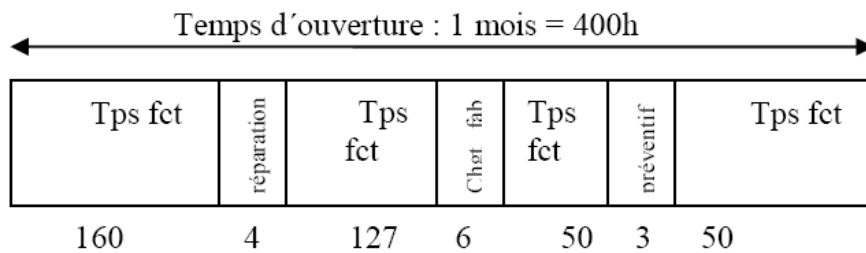
La disponibilité allie donc les notions de fiabilité et de maintenabilité. Augmenter la disponibilité passe par :

- L'allongement de la MTBF (action sur la fiabilité).
- La notion de le MTTR (action sur la maintenance).

Exemple

Un fabricant de machines outils prévoit en accord avec son client la disponibilité intrinsèque d'une machine en prenant en compte des conditions idéales d'exploitation et de maintenance :

- 1 changement de fabrication par mois, temps moyen du changement : 6 heures. maintenance corrective :
 - ❖ taux de défaillance : 1 panne/mois
 - ❖ temps moyen de réparation : 4 heures
 - 3 heures de maintenance préventive par mois.
- Calcul la disponibilité intrinsèque (les temps sont exprimés en heures) : temps d'ouverture : 1 mois = 400 heures ;



Solution :

$$D = \frac{\text{Temps de disponibilité}}{\text{Temps de disponibilité} + \text{Temps d'indisponibilité}}$$

$$D = \frac{160 + 127 + 50 + 50}{400} = \frac{387}{400} = 0,967(97\%)$$

Exemple3: Un composant électronique de puissance a un taux de panne constant de 0,07 pour 1000 heures de fonctionnement.

- ❖ Quelle est la probabilité pour qu'il survive 5000 et 2000 heures? L'unité de temps est 1000 heures.

Solution :

$$P(t < 5000) = R(t) = R(5) = R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-(0,07) \cdot 5} = 0,705 \text{ (environ 70,5\%).}$$

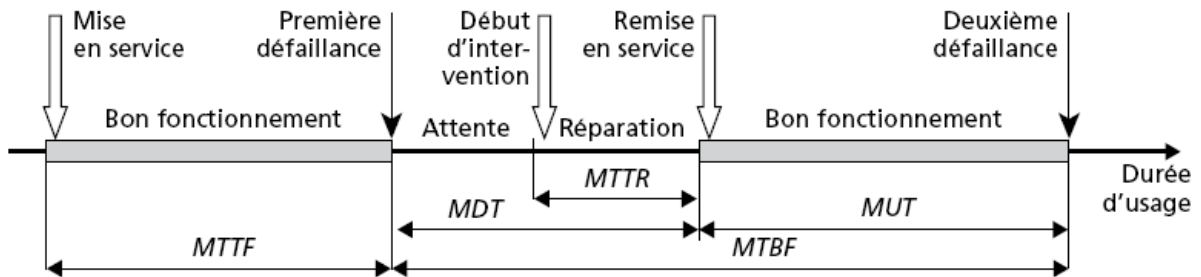
$$\text{Pour } 2000 \text{ heures } (t=2) : R(t) = e^{-(0,07) \cdot 2} = 0,869 \text{ (environ 86,9\%).}$$

- ❖ Quelle est la probabilité pour que le composant dure entre 2000 et 5000 heures ?

$$P(2000 \leq t \leq 5000) = F(5) - F(2) = F(2) - F(5) = 0,869 - 0,705 = 0,164 \text{ (16,4\%).}$$

II.6 Analyses FMD : indicateurs opérationnels

La figure II.2 : schématise les états successifs que peut prendre un système réparable.



La figure II.2 Les durées caractéristiques de FMD

En fait, les grandeurs portées par le graphe sont des durées (TBF) auxquelles on fait correspondre des moyennes (MTBF) obtenues par exploitation statistique $m(t)$ ou probabiliste $E(t)$ des n durées constatées et enregistrées.

Avec :

MDT= Mean Down Time =Temps Moyen d'Indisponibilité.

MUT= Mean up Time=Temps Moyen de Remise en Etat.

Résumé :

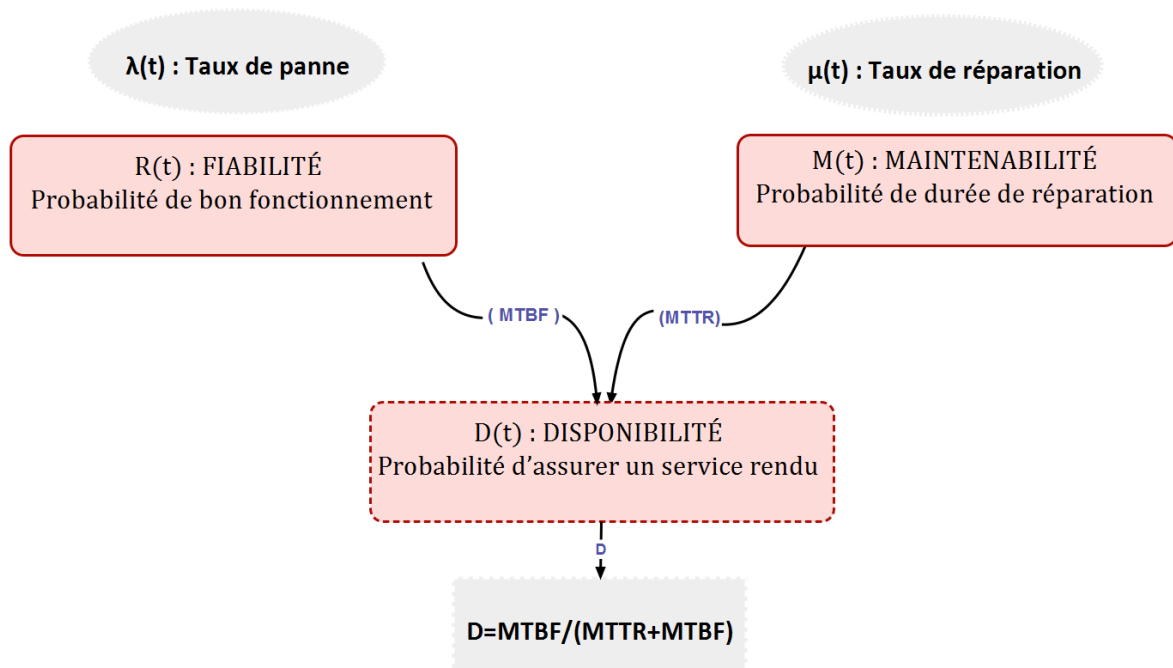
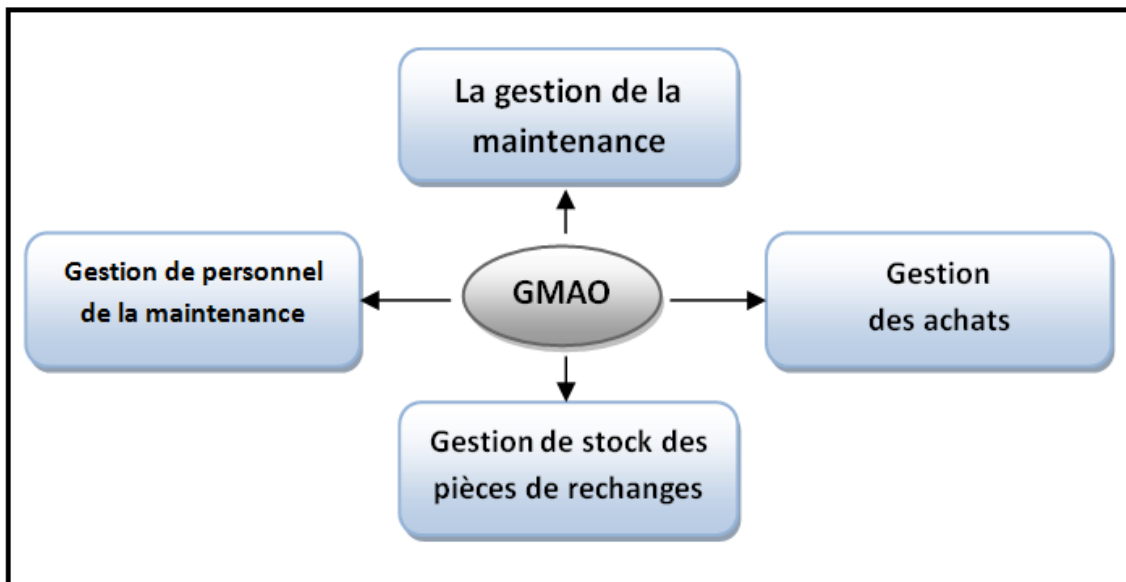


Figure II.3 : Relations entre FMD.

II.7 La technologie de GMAO :

L'appel du progiciel GMAO (**gestion de maintenance assistée par ordinateur**) va répondre aux besoins des entreprises en ce qui concerne les échanges d'information et des procédures, et l'analyse des activités de maintenance et les archivés.

La GMAO se caractérise par quatre fonctionnalités standards (figure II.4) :



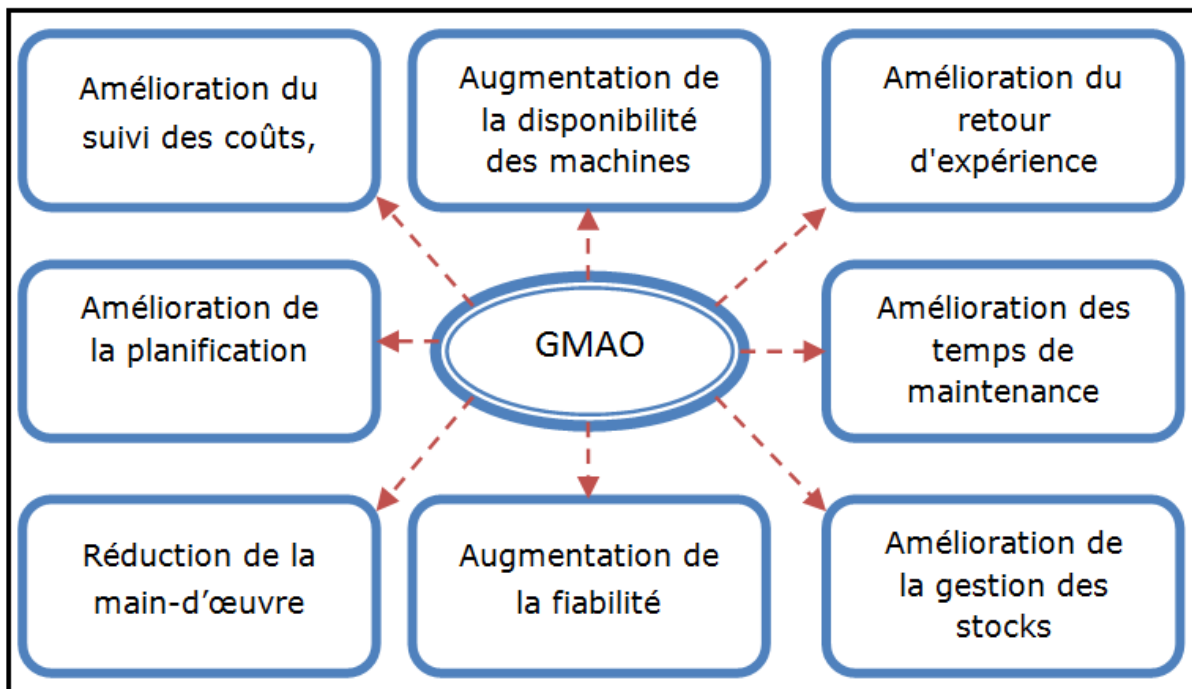
La figure II.4: Les caractéristiques de la GMAO

- La gestion de maintenance concernant les interventions préventives ou curatives sur les équipements industriels.
- La gestion du personnel de maintenance relative aux plannings, les affectations, et à la gestion de la formation.
- La gestion du stock des pièces de rechange, contrôle des stocks en magasin, alerte sur le seuil, réception des pièces.
- La gestion des achats en tout ce qui concerne l'addition des commandes, la gestion des fournisseurs et de leurs prix, et la facturation.

La GMAO s'inscrit dans un projet d'amélioration de productivité grâce aux actions suivantes.

- - L'amélioration de la disponibilité des équipements.
- - La prolongation de la durée de vie des machines.
- - L'amélioration du taux de charge de l'équipe maintenance.
- - L'amélioration du partage de l'information, suppression de la « personne indispensable ».
- - L'amélioration de la sécurité des équipements.
- - La maîtrise des coûts de maintenance.

D'après une analyse réalisée par l'Association Française des Ingénieurs et responsables de Maintenance , les effets de la GMAO dans les entreprises l'ayant mis en œuvre sont les suivants :



La figure II.5: Les effets de la GMAO

II.8 Analyse vibratoire

❖ Principe

Cette méthode s'applique à tous les matériaux. Elle consiste à analyser en fonction du temps les oscillations mécaniques d'un système autour d'une position de référence au moyen d'un ou de plusieurs capteurs. Les oscillations ou vibrations mécaniques sont produites soit par le système en fonctionnement (un moteur par exemple) soit sont induites par des sollicitations externes (par impact ou en sollicitation forcée).

❖ Les vibrations

Le suivi des paramètres vibratoires est particulièrement bien adapté aux machines tournantes. L'analyse vibratoire fournit un nombre important de renseignements sur l'état de l'équipement.

Avantages de la méthode

- Détection de défauts à un stade précoce
- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi
- Autorise une surveillance continue
- Permet de surveiller l'équipement à distance

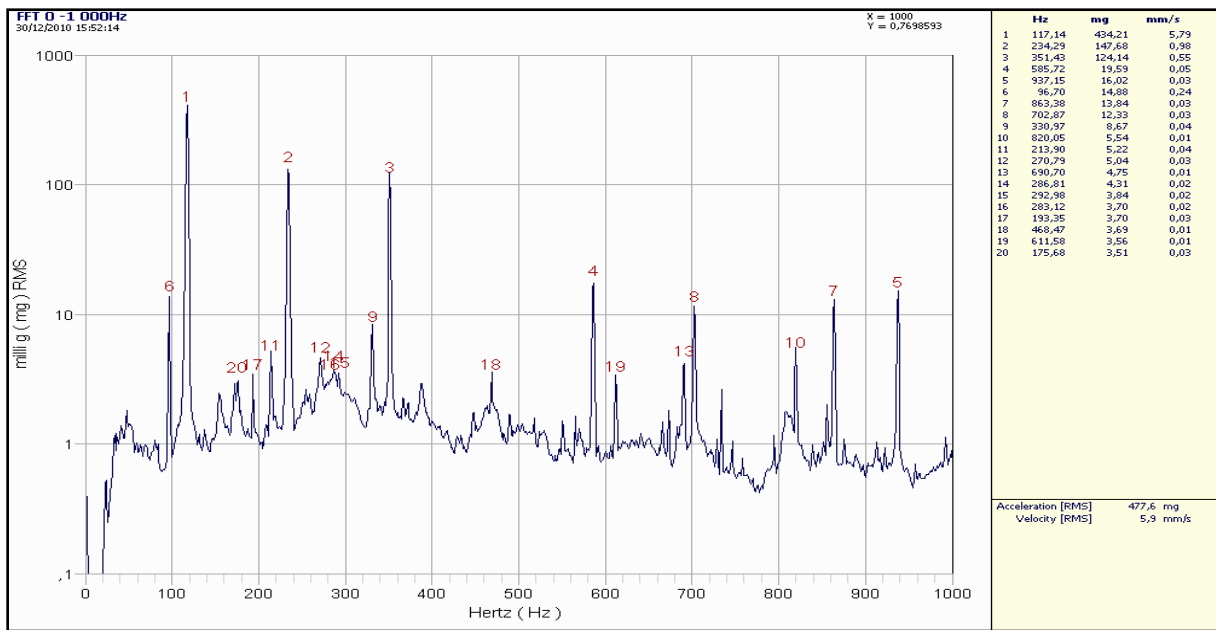
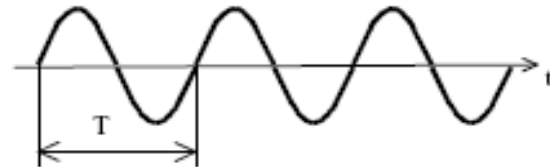
Inconvénients

- Spectres parfois difficiles à interpréter
- Dans le cas de surveillance continue, installations relativement coûteuses

Une vibration correspond à des variations périodiques d'un milieu matériel (gazeux, liquide ou solide) qui se transmettent de proche en proche. On parle souvent de son lorsque la vibration a lieu dans l'air alors que dans un milieu solide, on parle simplement de vibration.

Une onde sonore est caractérisée par une fréquence f (en Hz) et une période T (en s).

$$T = \frac{1}{f}$$



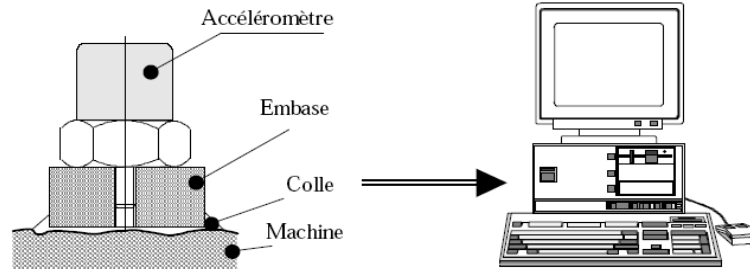
La figure II.6: Exemple de spectre obtenu par une mesure d'analyse vibratoire

II.8.1 Phénomènes mis en évidence par l'analyse vibratoire

a) Principe de mesure : Lorsque la machine est neuve, on réalise des mesures dont on enregistre les spectres. C'est la signature des vibrations. Il suffit ensuite de comparer les mesures effectuées régulièrement à la signature d'origine.

b) Réalisation des mesures :

Les capteurs utilisés pour mesurer les vibrations sont généralement des accéléromètres piézo-électriques. On colle des embases aux endroits stratégiques, c'est-à-dire près des éléments à surveiller (paliers, turbines, rotors...). L'accéléromètre est vissé sur l'embase au moment des mesures ou laissé à demeure en cas de mesures continues. Le signal de mesure est enregistré sur un collecteur puis transféré sur ordinateur ou enregistré directement à travers une carte d'acquisition.



Le diagnostic est réalisé après analyse spectrale et temporelle du signal à travers divers filtres.

c) Défauts obtenus à basse fréquence : Les défauts à basse fréquence caractérisent des phénomènes simples qui apparaissent à moins de 200 Hz. Il s'agit :

- *du balourd* : Pour qu'une pièce tournante ne vibre pas trop, il faut qu'elle soit équilibrée, c'est-à-dire que son centre de gravité soit sur l'axe de rotation. Les efforts dus à un balourd peuvent devenir très importants et amener une rupture.
- *- du déalignage* : Le déalignage s'observe lorsque deux lignes d'arbres ne sont pas bien alignées. A la rotation, des contraintes apparaissent dans l'accouplement ou dans les paliers, accélérant les usures.
- *- du desserrage* : Le desserrage d'un élément engendre des chocs qui abîment les pièces et peut déboucher sur une casse.
- *- du frottement* : Le frottement produit une usure des pièces, de la poussière et augmente la température du mécanisme. Il est cependant souvent difficile à diagnostiquer car il se confond avec les autres défauts BF.

d) Défauts obtenus à moyenne fréquence Les phénomènes apparaissant entre 200 Hz et 2000 Hz correspondent à des modulations :

- *- fréquence de compression de pales, d'aubes ou d'ailettes* : Cette fréquence est due aux forces dynamiques induites par le passage des pales d'un ventilateur, d'une turbine ou des palettes d'un compresseur.
- *- défauts d'engrènement* : Ce sont les défauts observables sur les engrenages.
- *- défauts de marquage de roulements* : Ce sont des défauts de marquage ou d'écaillage des pistes de roulement. Les fréquences sont données par le constructeur.
- *e) Défauts obtenus à haute fréquence* : Ils concernent particulièrement les défauts généralisés des roulements lors d'usure, manque de lubrification...

II.9 L'analyse d'huile : A quoi ça sert ?

L'analyse des lubrifiants en service contribue à optimiser les coûts de maintenance (directs et indirects) par une meilleure connaissance de l'état des machines et de l'évolution du lubrifiant. Cette technique s'applique à l'ensemble du parc des machines lubrifiées. Cette méthode est complémentaire des suivis par analyses vibratoire et thermographique.

L'analyse d'huile, pratiquée dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle, va permettre, par exemple, de détecter et de suivre les dysfonctionnements potentiels suivants :

❖ Sur moteur thermique	❖ Sur systèmes hydrauliques
Problèmes d'étanchéité de la filtration d'air.	Pollution du circuit (matières solides, eau...).
Infiltration de liquide de refroidissement.	Efficacité de la filtration (niveau de pollution...).
Déréglage du système d'injection.	Caractéristiques résiduelles du lubrifiant.
Etat mécanique du moteur (usure).	Usure des composants (pompes, moteurs, distributeurs...).

❖ Sur multiplicateurs, réducteurs et engrenages
Mauvais état d'un roulement ou d'un palier.
Transmission défectueuse (engrenages endommagés).
Performance des additives extrêmes pressions.
Appréciation des caractéristiques résiduelles du lubrifiant.
Pollution externe (eau, poussières...).

D'une manière générale, tous les mécanismes lubrifiés, à la condition que le graissage ne se fasse à fond perdu, sont susceptibles d'être surveillés dans leur fonctionnement par analyse de leur lubrifiant en service. Les résultats permettent de déceler des anomalies caractéristiques telles que :

- La contamination par des particules internes à l'équipement.
- L'évolution par comparaison des résultats obtenus entre chaque analyse.
- Le type d'usure.
- La pollution par des agents extérieurs entraînant une détérioration du lubrifiant et/ou une usure par abrasion (poussière atmosphérique).

La viscosité est essentielle puisque la comparaison avec celle du lubrifiant usagé permet de vérifier ses propriétés d'écoulement mais aussi son éventuelle dilution, par du carburant par exemple. *Selon la norme NF T 60-100, il faut mesurer le temps d'écoulement d'une quantité de lubrifiant à travers un capillaire pourvu de deux repères déterminant une constante à une température donnée.*

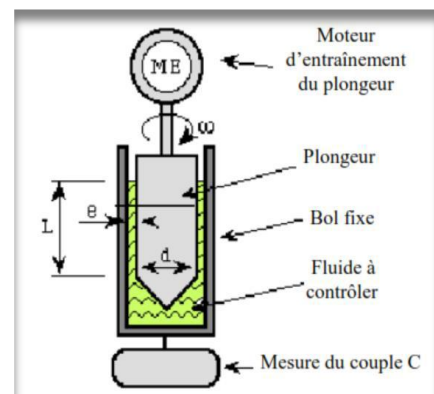
Le contrôle de cette viscosité peut se faire à l'aide de plusieurs moyens, quelques-uns sont décrits ci-après :

❖ **Rhéomètre**

- Cet appareil mesure la viscosité dynamique de tous les fluides (newtoniens ou non). Cet appareil de grande précision est peu employé pour les huiles dans l'industrie, car son utilisation est plus délicate et son prix important. De la valeur du couple mesuré, on déduit la viscosité dynamique.

Il est à noter aussi que, le bol peut également être chauffé pour des essais à température.

$$C = \mu.L. \frac{\pi.d^3}{4.e} .w$$



○ Que faire des huiles usagées

Les huiles usagées peuvent suivre différentes filières de traitement :

- ❖ La régénération consiste à retraiter les huiles usagées en raffinerie en vue de produire des huiles de base.
- ❖ Le recyclage permet d'utiliser le produit dans des installations industrielles (charges de cracking catalytique, diesel marine...).
- ❖ La valorisation énergétique consiste à utiliser l'huile usagée, éventuellement prétraitée, comme combustible dans les cimenteries et les chaufourniers. Le pouvoir calorifique d'une huile usagée est en effet à peu près équivalent à celui d'un combustible traditionnel.

II.9.1 Intérêts

On peut utiliser l'analyse des huiles pour :

- La surveillance des machines (gain sur la durée de vie des composants, gain sur l'indisponibilité des équipement, rentabilité si la machine possède un coût d'indisponibilité important...)
- La surveillance des lubrifiants (gain sur le lubrifiant et sur les opérations de remplacement d'huile, rentabilité si la quantité d'huile utilisée est importante.)

II.10 Conclusion

D'une façon générale, ce travail (document pédagogique), souligne l'impact de la maintenance sur les performances d'un système industriel. La maîtrise dans la pratique d'une maintenance gérée rationnellement pourra soulager notre industrie. Le problème étant de savoir dans quelle mesure cela est possible et couramment renforcer la gestion dans l'approche d'une fonction maintenance plus adéquate répondant à nos propres conditions industrielles.

Actuellement, la maintenance conditionnelle s'impose comme la meilleure solution permettant d'accroître les performances et d'améliorer le niveau de sûreté de fonctionnement de tout système industriel. Pour assurer une maintenance conditionnelle efficace, plusieurs outils peuvent être utilisés : l'analyse d'huile, thermographie, l'analyse vibratoire qui a fait ses preuves est la plus connue et la plus largement utilisé. Donc pour réaliser un diagnostic fiable ou définir des indicateurs de surveillance pertinents, il ne suffit pas d'avoir un matériel adapté à ce type d'investigation, il faut aussi avoir les aptitudes nécessaires pour le mettre en œuvre. Enfin, on peut dire que la maintenance et ses applications dans l'industrie , restent évoluent, par la formation et l'encadrement technique dans le secteur.