

Chapitre 4 :

Les outils de la maintenance

- Documentation
- Gestion du stock et approvisionnement
- Bon de travail, entretien préventif et visites d'inspection, planification
- Tableaux de bord
- Fiabilité et disponibilité des équipements

1. DOCUMENTATION

1.1 Aspect documentaire de la connaissance des équipements :

1.1.1 Objectif

Aucune action technique importante ne peut se faire en maintenance sans référence documentaire. Un des rôles essentiels de la fonction maintenance est « d'assurer la maîtrise de la documentation relative aux équipements » avec pour objectif principal la connaissance technologique et opérationnelle des équipements

Cet objectif permet :

- Une préparation d'interventions plus sûres et plus efficaces
- Une aide aux agents de maintenance
- Une traçabilité des activités de terrain à des fins d'amélioration de l'organisation
- Une analyse du comportement des matériels à des fins d'améliorations techniques et d'optimisation économique

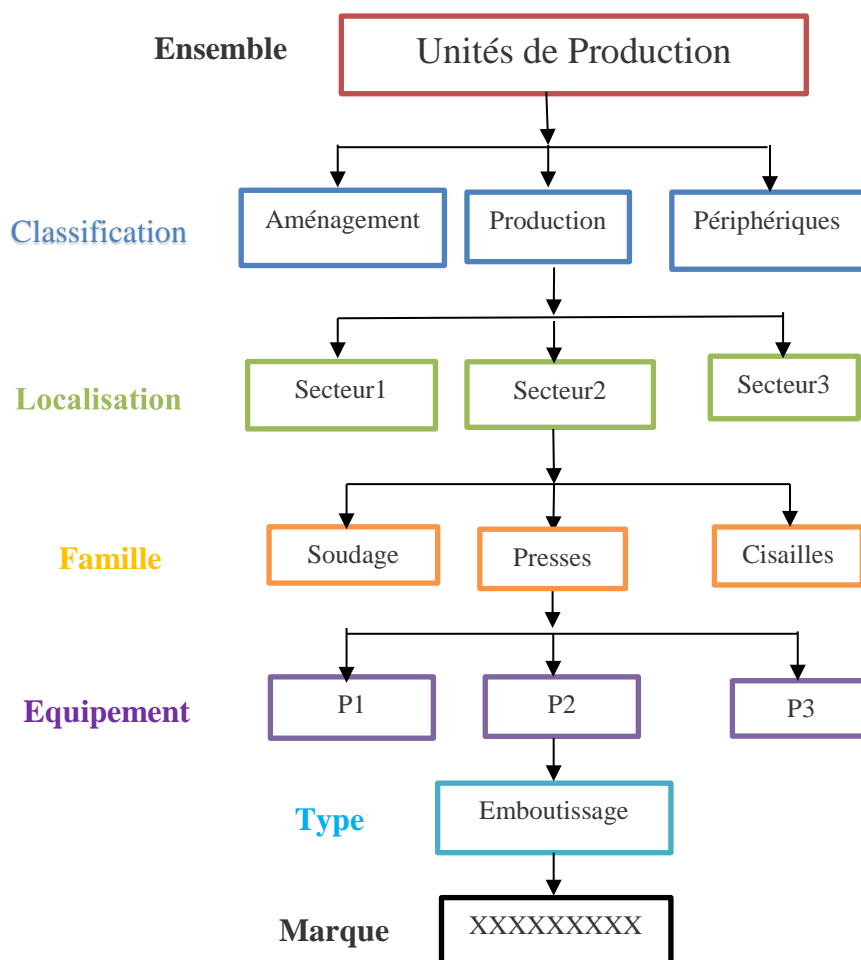
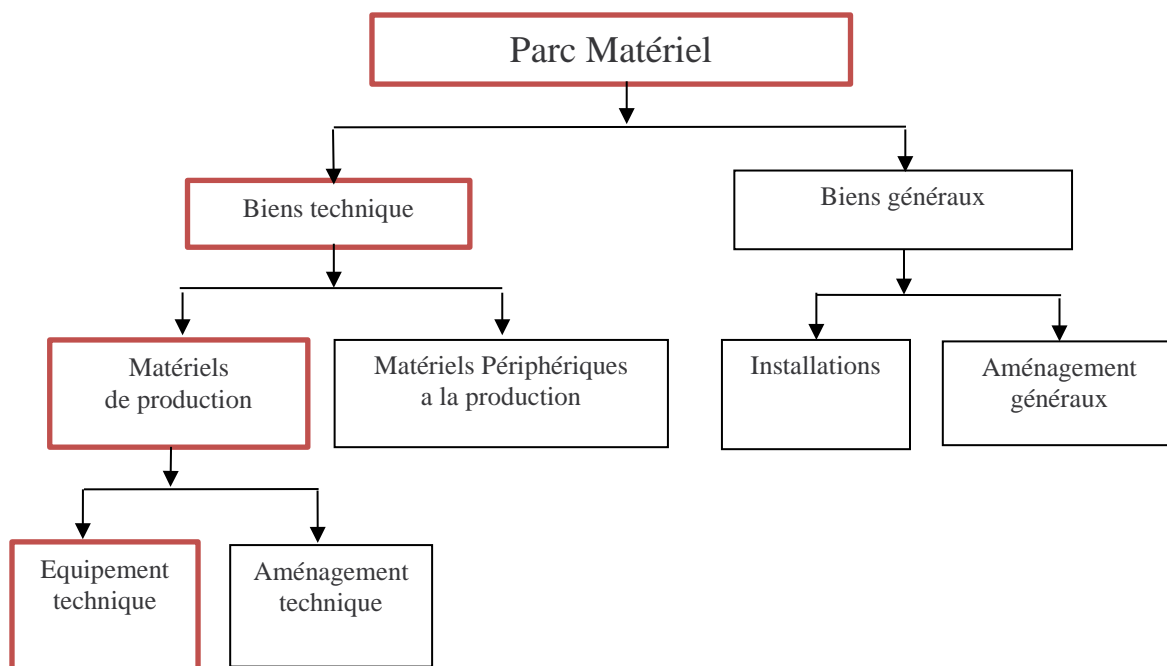
1.1.2 Le suivi des matériels

- Classer les matériels par nature
- Effectuer un découpage (zones géographiques, chaînes de production, etc.)
- Effectuer l'inventaire de tout le matériel
- Effectuer une codification de l'ensemble

1.1.3 Nature des différents matériels

- Équipements directement liés à la production
- Équipements connexes a la production (compresseurs, pompes, ponts roulants, etc.)
- Aménagements (éclairage, chauffage, climatisation, etc.)
- Installations (bâtiments, voirie, matériels de bureaux, téléphone, réseaux, etc.)

1.1.4 Classification des matériels



1.1.5 L'inventaire :

C'est le document de base des études de maintenance

L'inventaire est matérialisé par l'énumération des nomenclatures et des codifications associées des biens de l'entreprise. Il est présenté suivant une logique de mise en famille.

Le suivi de cet inventaire sera facilité par une codification adaptée. Cette codification doit faciliter l'identification et la localisation des matériels.

1.1.6 Le découpage :

Le découpage doit se faire de façon fonctionnelle, par exemple :

- Par atelier ou groupes de production (situation géographique) ;
- En chaînes de maintenance au sein de chaque atelier (suivi des équipements) ;
- En ensembles fonctionnels au sein de chaque chaîne de maintenance (ensembles, sous-ensembles, organes, éléments, constituants ou composants).

1.1.7 La codification :

L'ensemble des biens, maintenant découpés, peut faire l'objet d'un classement qui doit être codifié et utilisé par tous les services de l'entreprise. Il serait absurde que chaque service utilise sa propre codification, cette solution amènerait la confusion. Cette codification doit faciliter l'insertion de l'informatique dans la gestion.

Objectifs de la codification :

- ✓ Rendre plus accessible les fichiers informatiques
- ✓ Renforcer l'action de normalisation (diminuer le nombre de références gérées par l'entreprise)
- ✓ Retrouver plus facilement un matériel ou un composant quelconque

1.2 Documentation du matériel

Dossier destiné aux intervenants techniques dans le cadre de leur métier

1.2.1 Dossier technique (caractéristiques de l'équipement)

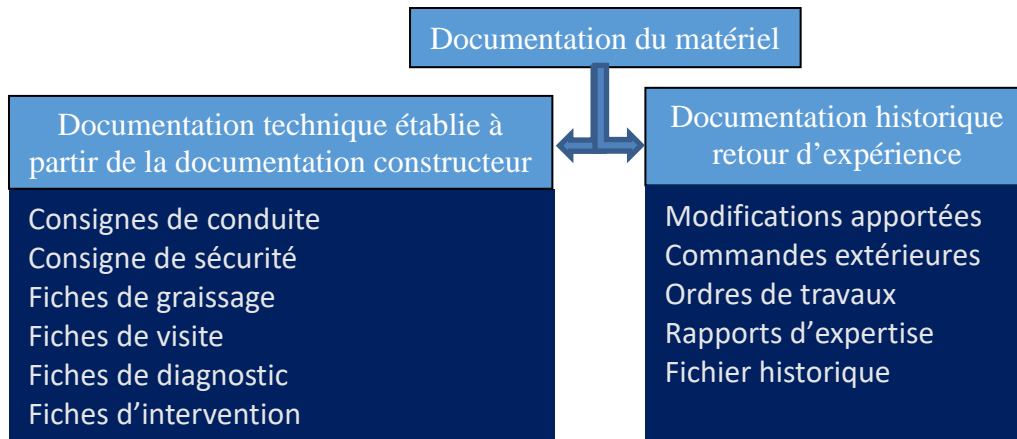
a) Dossier constructeur

- Documents achats dont cahier des charges,
- Caractéristiques techniques,
- Factures pour la garantie,
- Coordonnées SAV,
- Catalogue des pièces détachées
- Liste des pièces critiques avec référence et leur coût,
- Plans de toutes sortes (ensemble, détail, montage/installation, vues éclatées) et schémas (fonctionnels, techniques)
- Le mode d'emploi,
- Les notes d'entretien,
- Matériel de maintenance préconisé
- Équipements d'intervention et de mesure
- Liste des outillages spéciaux
- Listings des programmes
 - automates
 - informatiques

b) Gammes et modes opératoires

c) Check-lists

1.2.2 Dossier historique : le retour d'expérience (carnet de santé de l'équipement)



1.2.2.1 Rôle de la documentation historique

- Orienter la méthode de maintenance du matériel
- Contrôler l'efficacité de la maintenance
- Saisir les heures, les coûts, les matières
- Les ventiler suivant le domaine technique d'intervention
- Décider du renouvellement du matériel
- Décider d'une maintenance amélioration
- Recueillir des informations en vue d'une étude FMD

1.2.2.2 Exemple de Fiche Historique

Système : _____				FICHIER HISTORIQUE			N° de machine : _____		N° fichier : _____	
Marque : _____		Type : _____		Date de la 1° Mise en Service : ___ / ___ / ___			Energies : _____			
N°	Date	N° R.I.	N° Compteur	Degré d'urgence	Type d'Inter.	Désignation de l'intervention	Nature	Temps passé	Coût en DA	Documents émis
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										

Type d'intervention : Dp = dépannage - Rp = réparation - Rg = réglage - Rn = rénovation - Rc = reconstruction
Nature : M = mécanique - E = électrique - P = pneumatique - H = hydraulique - S = sécurité - A = autres raisons

2. Gestion du stock et approvisionnement

2.1 Définition du stock

Les stocks permettent de maîtriser les flux et de réguler les consommations. Une bonne gestion du stock se traduit par la disponibilité immédiate lors d'un besoin de :

- ✓ matières
- ✓ marchandises
- ✓ produits intermédiaires
- ✓ produits finis
- ✓ diverses fournitures.

2.2 Modèles de gestion des stocks

Définir une politique de réapprovisionnement consiste essentiellement à répondre à trois questions :

- ✓ QUOI (quel produit) faut-il réapprovisionner ?
- ✓ QUAND faut-il réapprovisionner ?
- ✓ COMBIEN faut-il réapprovisionner ?

Suivant la combinaison des réponses, il est donc possible de définir quatre politiques de base pour réapprovisionnement du stock.

La difficulté pour le gestionnaire consiste à choisir le meilleur politique adapté à chaque produit

2.3 Méthodes de réapprovisionnements

- ✓ Les quatre politiques d'approvisionnement
- ✓ La quantité économique

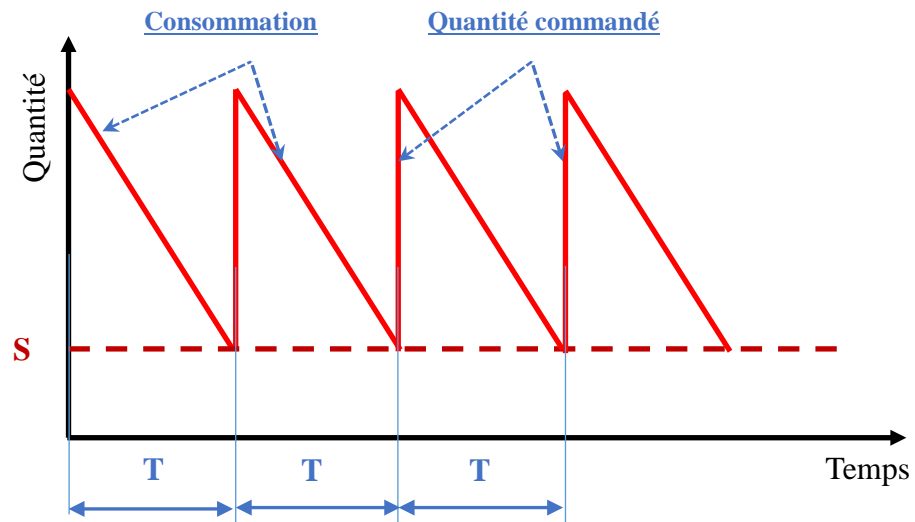
2.3.1 Les quatre politiques d'approvisionnement pour optimiser le coût de stockage

a) Méthode “calendaire” ou “méthode de réapprovisionnement fixe” (Réapprovisionnement à date et quantité fixes)

Cette méthode elle est voisine de la quantité économique de commande (c'est la formule de Wilson ou QEC).

Elle est appliquée à des produits

- ✓ dont la consommation est régulière
- ✓ de faible valeur
- ✓ de catégorie C (de la classification ABC)



S : Passer une commande quand le stock disponible atteint le seuil (S)

Avantage :

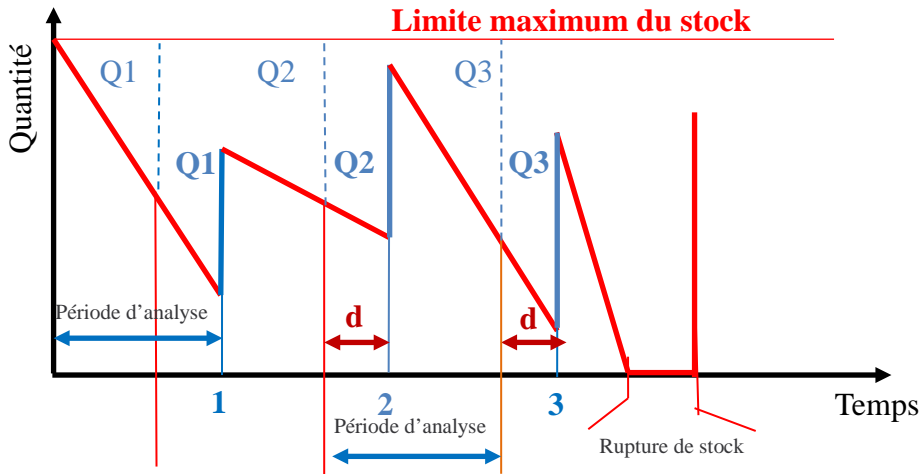
- ✓ Simplicité de la gestion
- ✓ Gains d'échelle négociables par les acheteurs

Inconvénients :

- ✓ Si la quantité de réapprovisionnement est mal calculée ou si la consommation n'est pas régulière, il y a risque " d'inflation " ou de rupture de stock.
- ✓ Les livraisons urgentes ou hors contrat, peuvent être très coûteuses (recours au fret aérien, lancement spécial chez le fournisseur ...)

b) méthode de reapprovisionnement ou plan d'approvisionnement (Réapprovisionnement à date fixe et quantité variable)

Cette méthode s'applique à des produits : dont la consommation est régulière, coûteux, périssables ou encombrants. La valeur de reapprovisionnement est déterminée soit au moment de l'analyse du stock, soit en tenant compte du délai d'approvisionnement de la commande (on ajoute à chaque quantité l'équivalent de la consommation moyenne pendant le délai d'approvisionnement).



Méthode du plan d'approvisionnement

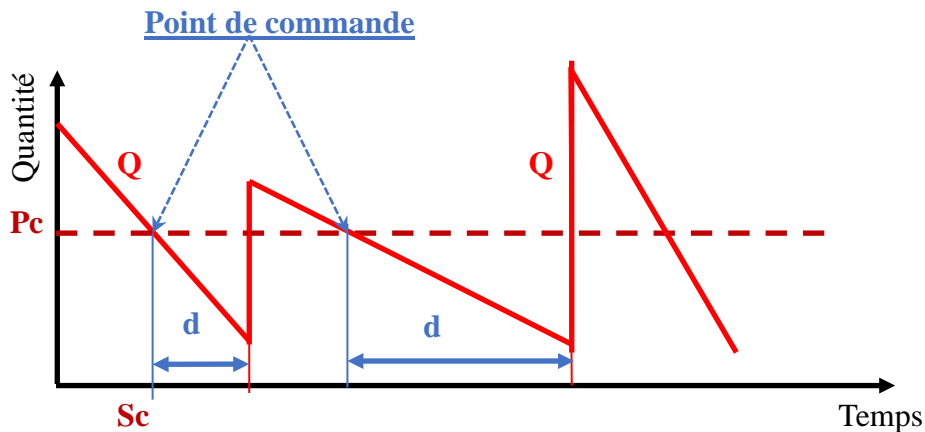
Avantage :

- ✓ Gestion des stocks simple
- ✓ Immobilisation financière faible ou maîtrisée

Inconvénients :

- ✓ Possibilité de rupture de stock

c) méthode du point de commande (Réapprovisionnement à date variable et quantité fixe)



Avantage :

- ✓ Permet d'éviter les ruptures de stocks
- ✓ Adapté à une consommation partiellement irrégulière.

Inconvénients :

- ✓ Impose un suivi permanent des stocks pouvant entraîner des administratifs importants
- ✓ Peut encourager à faire des stocks de sécurité

d) Méthode coup par coup (Réapprovisionnement à date et quantité variables)

Elle est principalement utilisée pour les articles de la catégorie A (de la classification ABC) dont les prix de revient varient fortement ou dont la disponibilité n'est pas permanente.

Les pièces de rechanges (spécifiques, très onéreuses)

Les pièces de rechanges (organes de machines : moteurs, réducteurs, variateurs, ...) se distinguent des consommables (articles de quincaillerie : visserie, fusibles, câbles élec...) par une consommation irrégulière, souvent très faible en quantité

Pour le service de maintenance cette gestion est très délicate à gérer pour les raisons suivantes

- ✓ Les sorties sont beaucoup plus aléatoires que pour les consommables ;
- ✓ La rupture de stock est souvent plus lourde de conséquences que celle d'un consommable (arrêt de l'équipement) ;
- ✓ Le coût des pièces est souvent élevé ;

Pour optimiser cette gestion il est indispensable de prendre en compte la probabilité de défaillance. C'est l'application directe de la loi de Poisson. La variable aléatoire est discrète, c'est-à-dire qu'elle ne peut prendre que quelques valeurs possibles entre deux valeurs extrêmes. Il existe une valeur du stock de sécurité (S_s) pour laquelle le coût total (CT) est minimum. C'est le stock optimal ; il dépend du coût de possession (C_p) et du coût de défaillance (C_d).

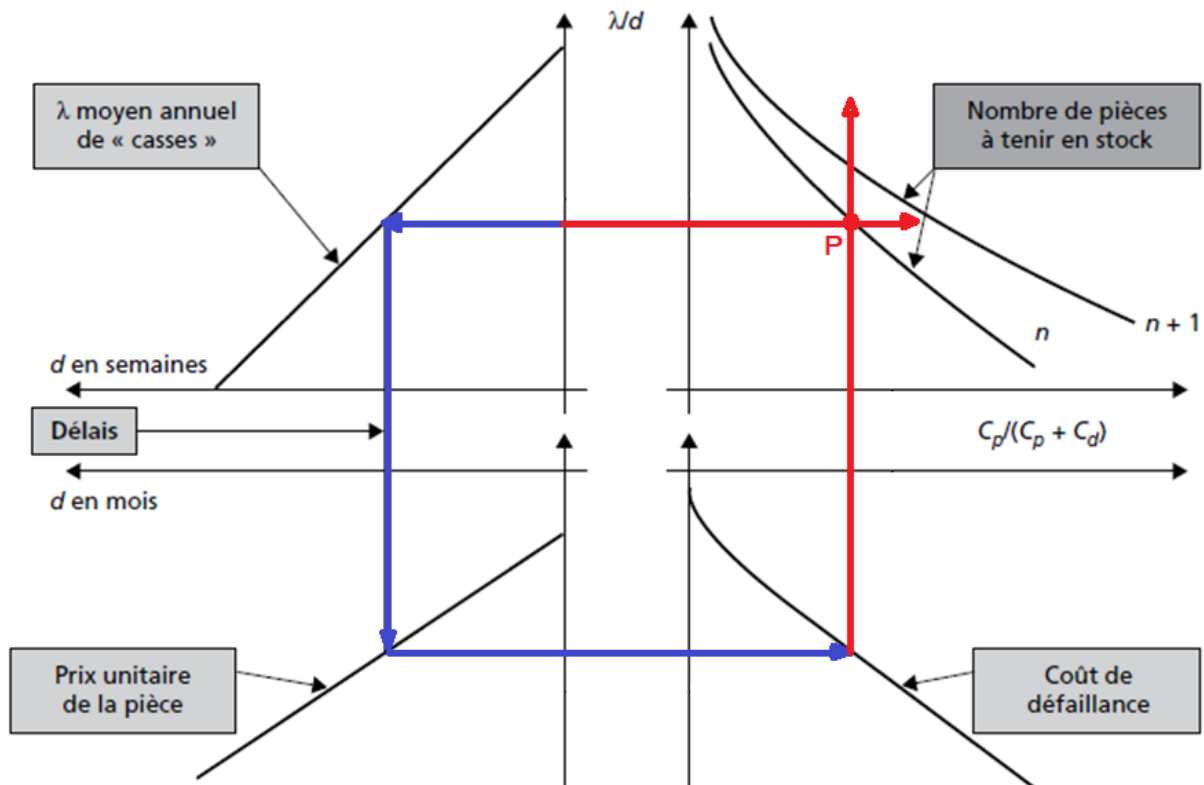
Structure de l'abaque :

- ✓ λ / d est le taux moyen de défaillance de la pièce pendant le délai de réapprovisionnement.
- ✓ C_p / d est le coût de possession de la pièce pendant le délai.

Les quatre entrées les plus classiques et minimales sont :

- ✓ le coût unitaire de la pièce C_u ;
- ✓ le délai de réapprovisionnement d ;
- ✓ le taux de défaillance annuel exprimé en nombre de pannes/an
- ✓ le coût de défaillance C_d (en maintenance) équivalant au coût de pénurie (en logistique).

Ces quatre données estimées nous amènent très rapidement au point P, à partir duquel nous choisirons la valeur n entière et supérieure (sécurité).



Méthode graphique par utilisation d'abaque

2.3.2 La quantité économique

a) Éléments du Coût de gestion

$$\text{Coût de gestion} = C_u + C_{pa} + C_{po}$$

C_u : Valeurs de consommation qui est pour un article donné, égale au produit de la quantité consommée en une année par le coût unitaire d'achat de l'article.

C_{pa} : Coût de d'acquisition ou coût de passation des commandes qui est la somme des frais engagés pour acquérir un stock.

C_{po} : Coût de possession, qui est la somme des frais engagés pour détenir un stock.

Il est exprimé par un pourcentage du stock moyen en valeur, caractérisé par le taux de possession du stock, qui peut être compris entre 20% et 40% de la valeur du stock moyen.

b) Éléments constitutifs le coût de passation de commande (C_{pa})

$$\left. \begin{array}{l} \text{Coût de passation de commande} \\ \text{(en DA par unité de commande)} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} +\text{Coût des locaux} \\ +\text{Coût du Personnel} \\ +\text{Coût des fournitures administratives} \\ +\text{Coût des déplacements des acheteurs} \end{array} \right.$$

- ✓ Coût des locaux (administratifs, quais de déchargement)
- ✓ Coût du Personnel (salaires et charges sociales des acheteurs et agents administratifs assurant la gestion et le suivi des commandes d'achat, des réceptionnaires et contrôleurs des commandes)

- ✓ Coût des fournitures administratives (bon de commande, imprimés, etc. ...)
- ✓ Coût des déplacements des acheteurs (sélection, contrôle,...)

c) Le coût de passation de la commande comprend :

- ✓ le coût de la commande (téléphone, timbre...)
- ✓ les emballages permettant la livraison par lots
- ✓ les coûts de transports (moins on passe de commandes, plus on diminue le coût de passation)

Eléments constitutifs Le **coût de possession(Cpo)** :

$$\text{Coût de possession (en \% du stock moyen)} = \left\{ \begin{array}{l} +\text{Coût des magasins} \\ +\text{Coût du Personnel} \\ +\text{Coût des équipements} \\ +\text{Coût administratif} \\ +\text{Coût de possession (financiers)} \end{array} \right.$$

- ✓ Coût des magasins (amortissements ou location, taxe, électricité, assurances, ...)
- ✓ Coût du Personnel (Salaires et charges sociales des manutentionnaires et caristes magasiniers, ...)
- ✓ Coût des équipements (appareils de levage et de manutention, rayonnages, ...)
- ✓ Coût administratif (Ordinateur, fournitures, ...)
- ✓ Coût de possession (financiers)

Le coût de possession du stock comprend

- ✓ les coûts liés à la manutention
- ✓ les coûts liés à leur conservation (sécurité et énergie)
- ✓ les coûts liés au loyer ou à l'acquisition des locaux de stockage

Remarque :

- Plus les commandes sont petites, plus le stock est réduit et plus on minimise le coût de possession du stock.
- Plus les commandes sont petites, plus elles sont nombreuses et plus on accroît le coût de passation des commandes.

d) **Modèle de Wilson**

Wilson a établi une formule basée sur un modèle mathématique simplificateur dans lequel on considère que la demande est stable sans tenir compte des évolutions de prix, des risques de rupture et des variations dans le temps des coûts de commande et de lancement ("en avenir certain").

❖ Les hypothèses du modèle :

- ✓ La demande annuelle est connue et certaine
- ✓ La consommation est régulière (linéaire)
- ✓ Les quantités commandées sont constantes.
- ✓ La pénurie, les ruptures de stock, sont exclues.

❖ Pour que cette formule soit applicable il faut que

- ✓ Le coût d'acquisition doit être proportionnel aux quantités achetées (pas de rabais ou de remises).
- ✓ Pas de pénurie du produit (rupture de stock).
- ✓ La demande du produit doit être constante sur la période.
- ✓ Les coûts de stockage et de commande unitaire doivent être définis et constants.

❖ Paramètres utilisés :

N : nombre de commandes annuelles

Q : Nombre de pièces approvisionnées ou lancées en fabrication en une seule fois

P_u : prix d'achat unitaire des matériels

K : Nombre de pièces consommées (fabriquées ou achetées)

N=K / Q : Nombre annuel deancements

C_u =K x P_u : Coût d'achat

τ : Taux de possession de l'entreprise exprimée en % ; c'est le taux d'intérêt appliqué à la valeur moyenne du stock

C_{po}= (Q / 2) x P_u x τ : Coût annuel de possession

C_a=Coût d'acquisition d'une commande ou de lancement en fabrication

C_{pa}=**(K / Q) x C_a** :Coût annuel de lancement

Stock moyen dans l'entreprise : S_m=**Q / 2** (dans l'hypothèse d'une consommation régulière)

Coût total = coût de passation + coût d'achat + coût de possession

Coût total de stockage : C_T = (K / Q) x C_a + (Q / 2) x P_u x τ

❖ Quantité économique de commande

Trouver la quantité économique Q_e, c'est trouver la valeur de Q pour laquelle le coût total est minimal, c'est à dire la valeur Q_e pour laquelle la dérivée du coût total par rapport à la quantité est nulle.

$$C_T(Q) = \underbrace{\frac{K \times C_a}{Q}}_{C_{pa}} + \underbrace{K \times P_u}_{C_u} + \underbrace{\frac{Q}{2} \times P_u \times \tau}_{C_{po}}$$

La quantité économique Q_e doit être telle que C_T soit minimale

$$\frac{\delta C_T}{\delta Q} = 0$$

$$\frac{\delta C_T}{\delta Q} = -\frac{K}{Q^2} \times C_a + 0 + \frac{1}{2} \times P_u \times \tau = 0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} \times P_u \times \tau = \frac{K}{Q_e^2} \times C_a \Leftrightarrow Q_e^2 = \frac{2 \times K \times C_a}{P_u \times \tau}$$

D'où la formule de Wilson :

$$Q_e = \sqrt{\frac{2 \times K \times C_a}{\tau \times P_u}} \quad Q_e = \sqrt{\frac{2 \times K \times C_a}{\tau \times P_u}}$$

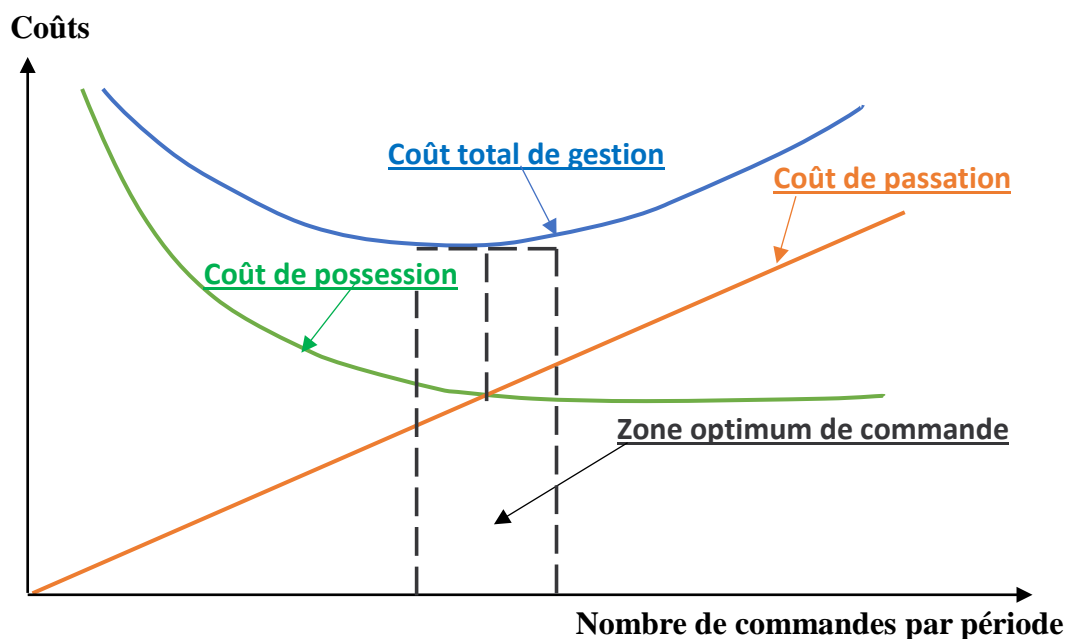


Figure... : Courbe des coûts.

❖ Les dates de réapprovisionnement

La quantité économique de commande Q_e correspond en moyenne à N commandes par an.

La durée optimale T_0 entre commandes s'en déduit :

$$\text{En année } T_0 = \frac{1}{N} = \frac{Q_e}{K} \quad ; \quad \text{En mois } T_0 = \frac{12 \times Q_e}{K}$$

La possession d'un article en magasin comprend 3 catégories de dépenses : dont l'une est constante et les deux autres varient en sens inverse suivant que l'on commande souvent ou rarement pour une même consommation.

La quantité économique permet de connaître la quantité à commander chaque fois pour que la dépense totale soit minimum.

$$N_e = \frac{K}{Q_e} \quad \text{C'est l'application de la formule de Wilson}$$

Q_e : Quantité économiques

K : consommation annuelle de l'article

Remarque : le taux de possession moyen est évalué aujourd'hui à 16%

3. INSPECTIONS DE L'EQUIPEMENT ET ENTRETIEN PREVENTIF

Les inspecteurs certifiés et les techniciens compétents offrent une évaluation précise de la condition de votre équipement. Ils évaluent les risques, repèrent les possibilités d'amélioration et formulent des recommandations.

Un programme d'entretien préventif efficace est essentiel à l'amélioration de la sécurité et de la productivité. L'entretien préventif peut contribuer à réduire les temps d'arrêt et accroît la fiabilité. Nous créons un plan d'entretien personnalisé proactif selon votre équipement, vos applications et votre cycle de service.

Une approche globale de la gestion de la maintenance

Inspections et entretien préventif repérer les risques ainsi que les possibilités d'amélioration. Notre vaste expérience et expertise nous permet d'adapter l'entretien préventif à chaque recommandation des fabricants.

L'entretien de routine, comme l'ajustement et la lubrification, est effectué afin que votre équipement demeure opérationnel tout en satisfaisant aux directives d'entretien du fabricant.

Les inspections de conformité sont conçues pour satisfaire aux exigences réglementaires.

Nos techniciens et inspecteurs compétents sont vos spécialistes en matière de réglementations locales. Dans certains pays, les réglementations exigent le recours à un tiers.

Ces tâches essentielles d'inspection et d'entretien préventif font partie des produits de service.

Nos produits sont réunis dans nos Programmes de service.

4. LE TABLEAU DE BORD :

4.1 Définition :

Le tableau de bord est un ensemble d'informations traitées et mises en forme de façon à caractériser l'état et l'évolution d'une situation donnée.

Les tableaux de bord sont en général constitués des tableaux, des graphiques permettant de suivre l'évolution d'une ou plusieurs variables au cours du temps. Il est mis à jour en temps réel par les actions et transactions quotidiennes.

Les indicateurs permettent des comparaisons par référence à des données externes ou internes (comparaison à soi-même dans le temps) Ils permettent aussi de mesurer les écarts entre les prévisions et les résultats opérationnels.

4.2 Le tableau de bord peut être :

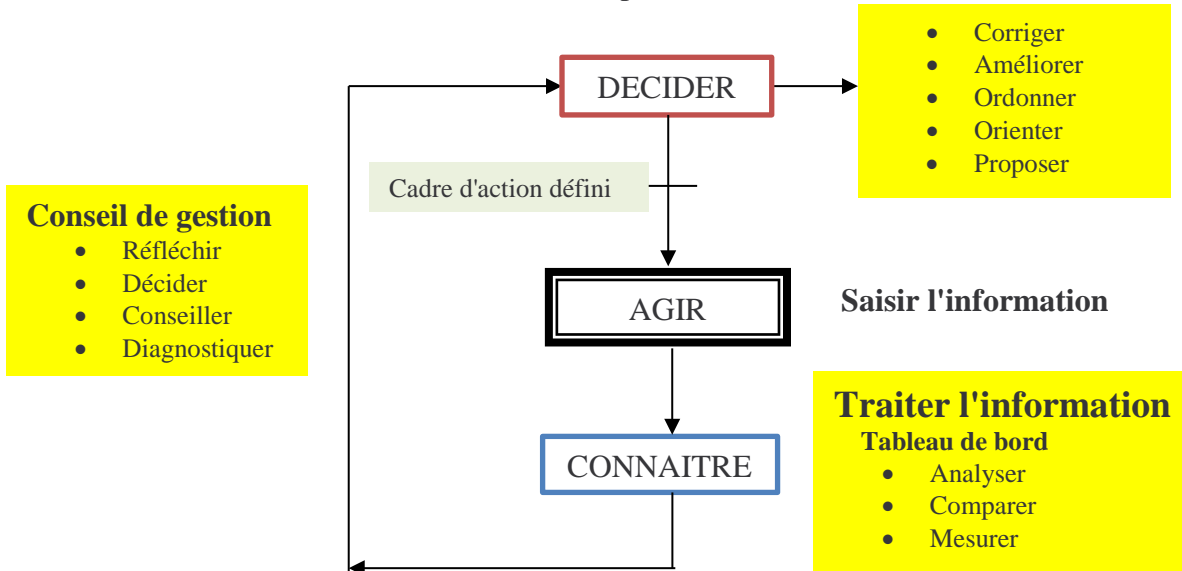
- **Un outil de mesure** des situations et comportements humains, économiques et matériels qui doit donner des mesures précises et irréfutables parce qu'exemptes de modifications ou de filtrages.
- **Un outil de décision** qui permet de réagir très vite dès les premiers et les premiers écarts annonciateurs de dérives plus importantes.
- **Un moyen de diagnostic** : une augmentation des micros arrêts sur une ligne de fabrication, un accroissement de l'absentéisme, de l'énergie consommée, des rebuts, des pannes ont forcément des causes directes ou indirectes qu'il faut rechercher, si besoin en augmentant ponctuellement les moyens d'analyse sur le secteur incriminé.
- **Un moyen de dialogue et de délégation** qui permet le travail en groupe sur des éléments d'évaluation délimitant et canalisant le domaine d'application et les efforts à fournir ; actualisé automatiquement par des transactions courantes, il constitue un moyen de contrôle transparent disponible sans avoir à demander des informations, permet au responsable de connaître la situation de ses équipes et de pouvoir plus facilement dialoguer avec elles sur des éléments objectifs.
- **Une d'marche d'amélioration continue** : Le tableau de bord est un ensemble D'informations sur l'état et l'évolution du service maintenance sous forme :
 - ✓ Des états chiffrés ou exprimés en %
 - ✓ Des graphiques d'évolution ou de répartition
 - ✓ Des ratios

4.3 L'élaboration d'un tableau de bord

L'élaboration d'un tableau de bord est une problématique des responsables de maintenance. Ils sont souvent confrontés aux questions suivantes :

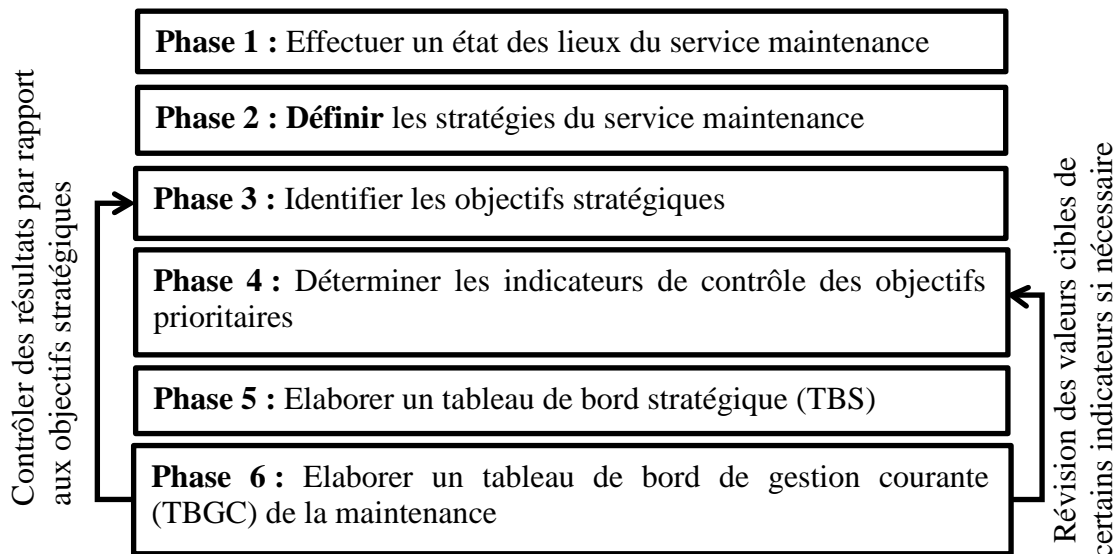
- Quels sont les indicateurs à intégrer dans le tableau de bord ?

- Quel niveau de détail est nécessaire pour le tableau de bord ?



- Quelle contribution attendre du tableau de bord pour le contrôle des objectifs stratégiques du service maintenance ?

4.4 La mise en œuvre du tableau de bord



Gérer c'est prendre des décisions en connaissance de causes

La décision n'est plus isolée mais participative (Qualité totale, TPM). Elle est prise à partir des indicateurs du tableau de bord.

4.5 Exemple

La décision entre les différents types de maintenance

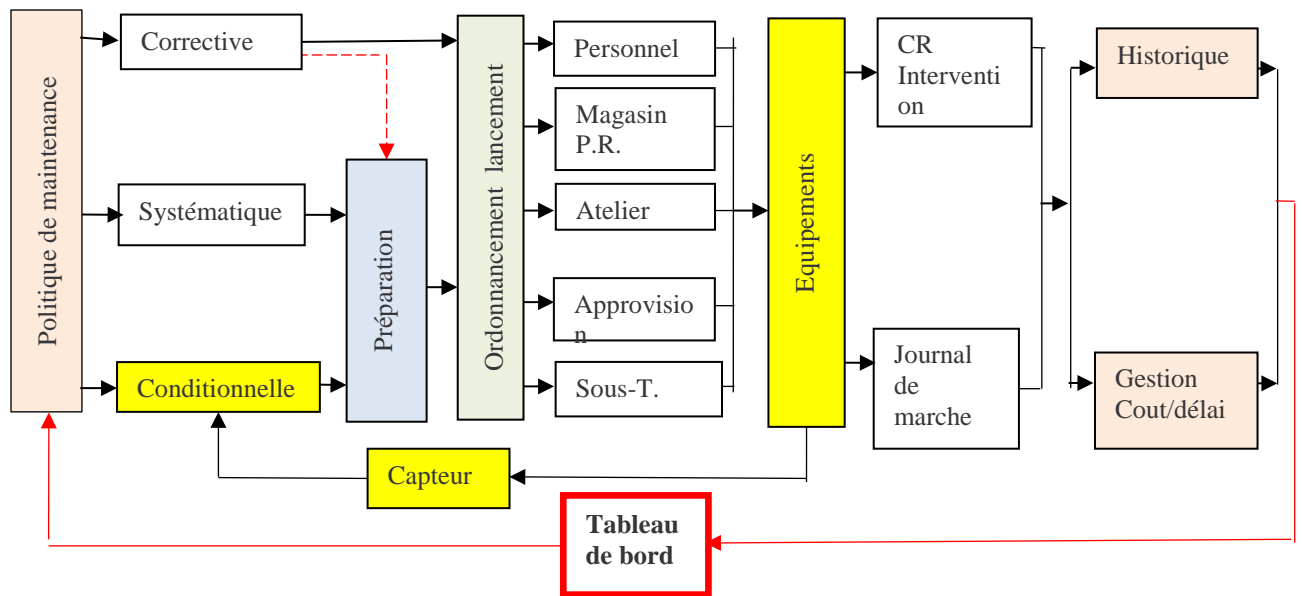


Figure 4.1 :Tableau de bord et politique de maintenance

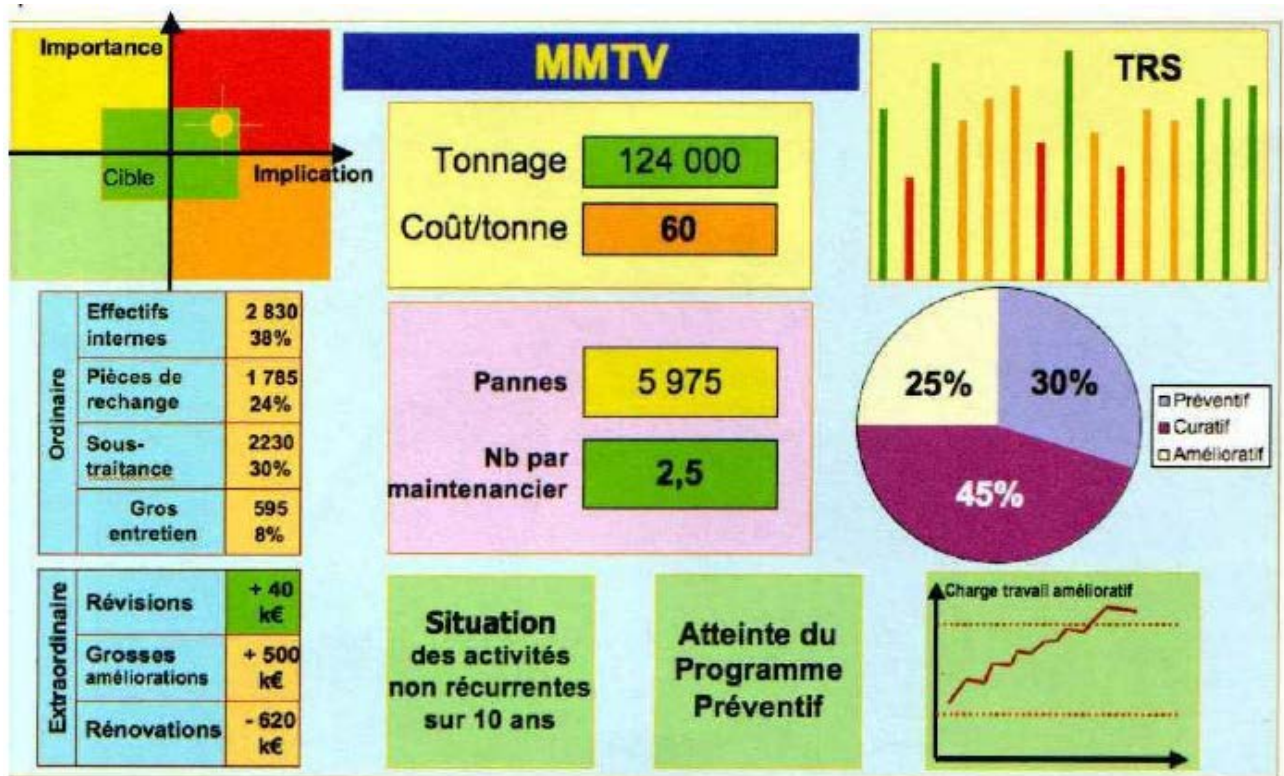


Figure 4.2 : les informations traitées et mises en forme dans un Tableau de bord

5. LES COMPOSANTES DE LA FMD

5.1 Introduction

La disponibilité met en évidence l'aptitude à la réparation d'un dispositif en mesurant l'efficacité de la maintenance.

Une haute **disponibilité** exige une excellente **fiabilité** (peu de défaillances), une bonne **maintenabilité** (une grande rapidité de réparation ou de remise en état) et une bonne **logistique de maintenance** (bonnes procédures d'entretien et de réparations, des moyens en personnel, des stocks de composants...).

5.2 Indicateurs opérationnels

La figure 1 schématise les états successifs que peut prendre un système réparable.

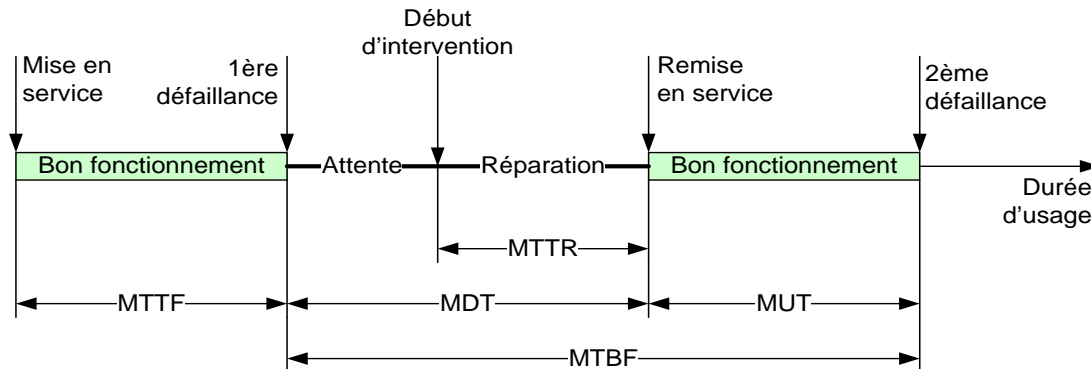


Figure 1 – Les durées caractéristiques de FMD

- **MTBF** (Mean Time Between Failures) : est la Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement Elle correspond à la durée de vie moyenne entre deux défaillances consécutives (systèmes réparables). $MTBF = \bar{T} = E(T) = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt$
- **MTTF** (Mean Time To Failure) : est la durée moyenne de bon fonctionnement d'un système avant sa première défaillance. Cette durée remplace le MTBF pour les systèmes non réparables.
- **MTTR** (Mean Time To Repair) : est la Moyenne des Temps Techniques de Réparation.
- **MDT** (mean down time) : appelé encore MTI, c'est le temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre
- **MUT** (Mean Up Time) est la durée moyenne de bon fonctionnement après réparation. En général : $MDT \ll MUT$ alors $MTBF \approx MUT$.

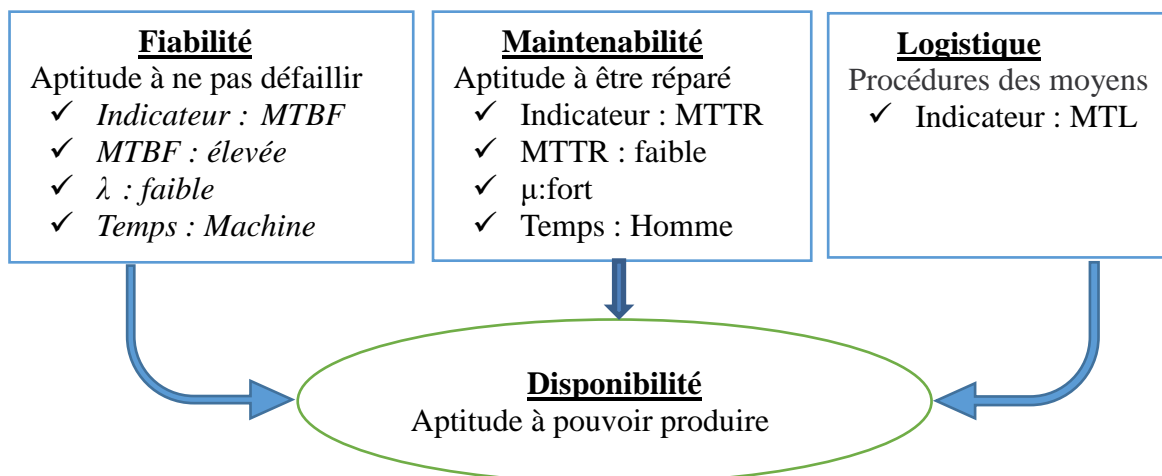


Figure 2 : composante de la FMD

5.3 Fiabilité d'un matériel

5.3.1 Introduction

- La fiabilité est l'étude de la durée de vie d'un matériel.
- la variable aléatoire qui à chaque matériel, associe son temps de bon fonctionnement. Son espérance mathématique et la moyenne des temps de bon fonctionnement ou MTBF.
- L'analyse d'un échantillon permet de justifier que cette variable aléatoire suit une loi exponentielle ou une loi de Weibull.

5.3.2 Les fonctions de fiabilité :

a) La fonction fiabilité $R(t)$: (La lettre R vient de l'anglais "Reliability").

$R(t)$ = probabilité pour un système d'être en "vie" à l'instant t (ou de ne pas avoir eu de panne). fig.3a. Cette fonction est très utilisée pour les organes d'usure (freins, roulements, engrenages ...) car la courbe est significative. En revanche, on ne l'utilise guère pour les systèmes réparables alors on préfère utiliser le taux de défaillance λ .

$$R(t) = e^{-\int \lambda(u) du}$$

b) La fonction de répartition $F(t)$:

$F(t)$ = probabilité pour un système d'être "mort" à l'instant t (ou d'être en panne) fig. 3b

$$F(t) = 1 - R(t)$$

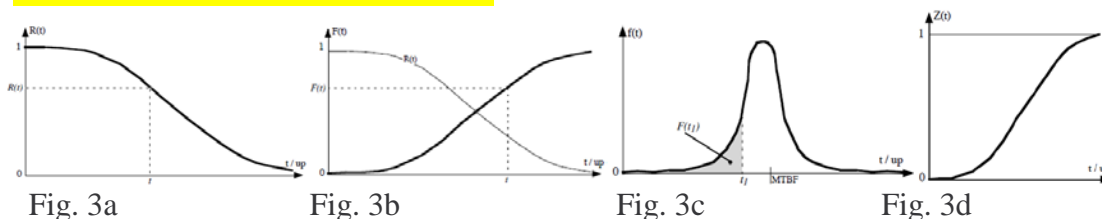
c) La fonction densité de probabilité $f(t)$:

$f(t)$ = quantité de défaillance(s) par unité ou période de temps, en % de l'effectif total fig. 3c

$$f(t) = \lambda(t)R(t) = \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(u) du}$$

d) La fonction taux de mortalité instantanée : $Z(t)$, fig.3d

$$z(t) = \frac{\text{nombre de défaillances}}{\text{nombre d'élément en service}}$$



e) La fonction taux de défaillance $\lambda(t)$:

$\lambda(t)$ est l'équivalent de $f(t)$ pour les systèmes réparables. Un système réparable en production stabilisée doit avoir un taux de défaillance constant.

$\lambda(t)$ = quantité de défaillance(s) par unité de temps :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{Lorsque le taux de défaillance est constant alors : } \lambda(t) = \lambda = \frac{1}{MTBF}$$

f) Causes et remèdes de défaillance

La figure de la courbe en baignoire ci-après explique les différentes causes et remèdes de défaillances liées aux trois phases de la durée de vie du matériel.

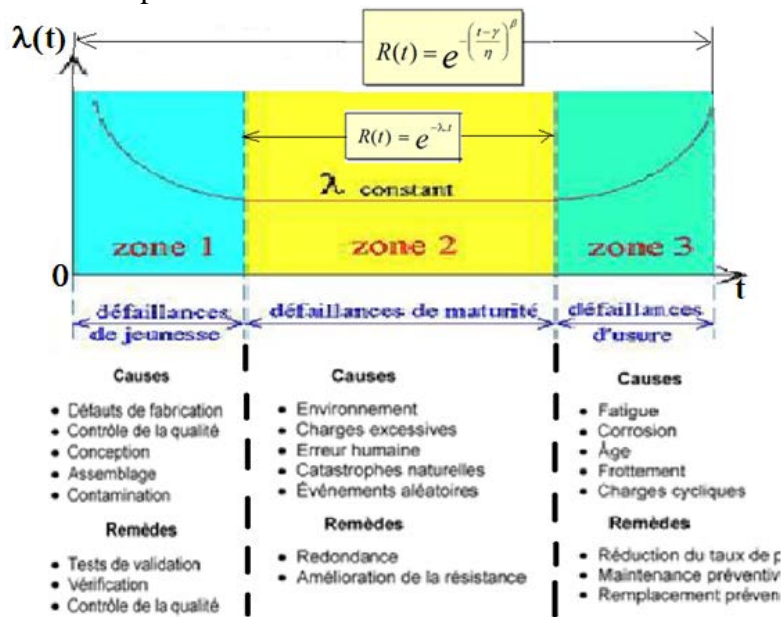


Fig.5 : courbe en baignoire (cause-remède)

Zone 1 : Période de défaillance précoce : c'est le début de la vie du produit. Le taux de défaillance λ décroît rapidement au cours du temps. La loi de Weibull (avec $\beta < 1$ et $\gamma = 0$) est utilisable pour décrire ce type de défaillance.

Zone 2 : période de défaillance à taux constant (ou sensiblement constant) : c'est la zone de pleine activité du produit pour laquelle le taux de défaillance λ est sensiblement constant. La loi de fiabilité adaptée à cette zone est la distribution exponentielle

Zone 3 : période de défaillance par vieillissement : c'est la période de fin de vie du produit. Le taux de défaillances λ croît rapidement avec le temps. Les lois de fiabilité adaptées à cette zone sont : les lois normale, Gamma, log-normale ou encore Weibull (avec $\beta > 2$ et $\gamma > 0$).

7.3.3 Méthodologie de l'analyse de fiabilité

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

✓ Si $N < 20$ méthodes des rangs médians $F(i) = \frac{i-0,3}{N+0,4}$

✓ Si $N > 20$ et $N < 50$ formule des rangs moyens $F(i) = \frac{i}{N+1}$

✓ Si $N \geq 50$ méthodes des rangs bruts $F(i) = \frac{i}{N}$, le nombre de classes : $k = N^{1/2}$

ou bien $k \approx 1 + 3,3 \log N$ et $k > 5$.

5.3.4 Analyse des fonctions à partir d'un historique

a) loi exponentielle

➤ Définition

La loi exponentielle est la loi de suivi par la variable aléatoire Z lorsque le taux d'avarie λ est constant, autrement dit, pour tout $t \geq 0$ on a $\lambda(t) = \lambda$ est λ est une constante réel strictement

positive. Ce modèle est régulièrement utilisé lorsque le taux de défaillance λ est constant (cas courant des composants électroniques) ou sensiblement constant. Ce dernier modèle, peut être utilisé pour les historiques de systèmes réparables en période d'exploitation stabilisée. Dans tous les autres cas, on lui préfère la fonction de Weibull, plus adaptée

➤ **Propriété**

Si la variable aléatoire Z suit une loi exponentielle de paramètre λ , alors on aura $\ln R(t) = -\lambda t$, et la présentation graphique $Y = R(t)$ sur un papier semi-logarithmique sera une droite

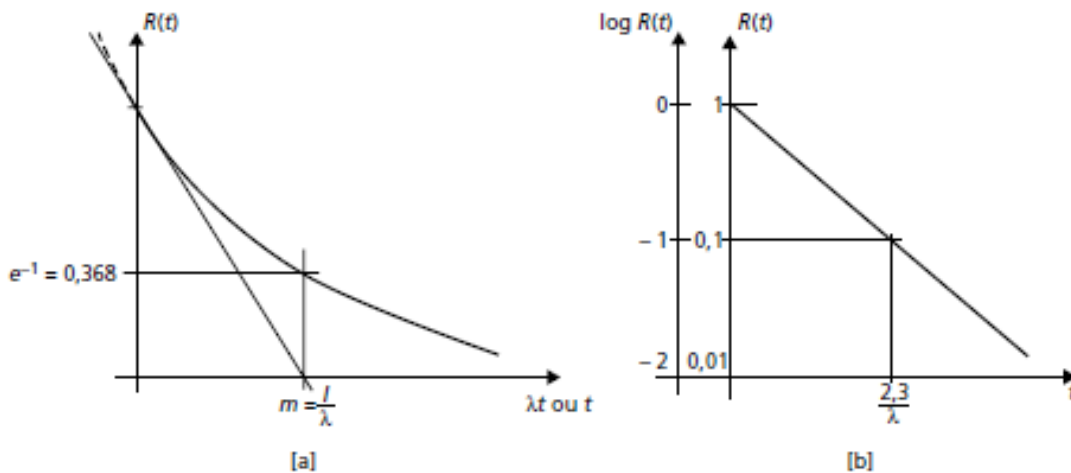


Figure 6 : Représentations graphiques de la loi exponentielle :
(a) en échelles linéaires ; (b) sur papier semi-logarithmique

➤ **Estimation du taux de défaillance :**

- ✓ Porter sur papier semi logarithmique les N points formés des couples (t_i, R_i)
- ✓ Tracer la courbe de régression des N points
- ✓ Si les N points sont sensiblement alignés, alors la loi de fiabilité est exponentielle
- ✓ Déterminer λ par la pente de la courbe
- ✓ En déduire $MTBF = 1/\lambda$
- ✓ En déduire $R(t) = e^{-\lambda t}$

b) Analyse de la fiabilité par la méthode de Weibull

Weibull a choisi une loi sous forme de puissance avec 3 paramètres qui permettent d'obtenir les diverses situations : décroissante, constante et croissante.

➤ **Définition :** On dit que la variable aléatoire T suit la loi de Weibull lorsque son taux d'avarie est :

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

Pour $t > \gamma$; β, γ, η sont des constantes avec $\beta > 0$; $\eta > 0$;

γ : est le paramètre de repérage qui fixe l'instant à partir duquel on étudie la fiabilité.

Si $\gamma = 0$: on étudie la fiabilité dès la première utilisation de la machine.

Si $\gamma > 0$: on étudie la fiabilité un certain temps après la première utilisation de l'appareil.

➤ **Relations fondamentales :**

On retrouve, pour tout $t > \gamma$

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

- ✓ Fonction de fiabilité :
- ✓ Durée de vie associée à un seuil de fiabilité : Il est intéressant de savoir à quel instant la fiabilité atteindra un seuil déterminé

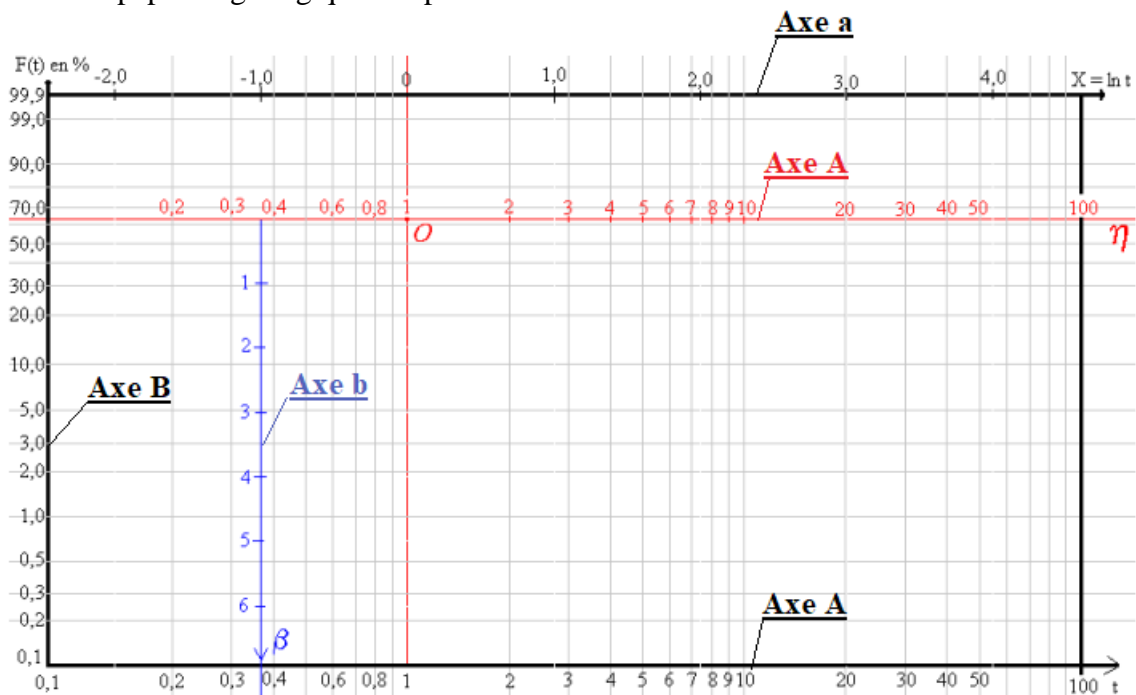
$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \Rightarrow \ln R(t) = -\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \Rightarrow \ln \frac{1}{R(t)} = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta \Rightarrow \frac{t-\gamma}{\eta} = \left(\ln \frac{1}{R(t)}\right)^{1/\beta} \Rightarrow t = \eta \left(\ln \frac{1}{R(t)}\right)^{1/\beta} + \gamma$$

- ✓ Fonction de défaillance : $F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$
- ✓ Densité de probabilité : $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$ car $F'(t) = f(t)$.
- ✓ taux d'avarie $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$
- ✓ $MTBF = E(t) = A\eta + \gamma$
- ✓ L'écart type $\sigma = B\eta$

A, B Où A et B sont des paramètres issus de tables (voir exercice 4)
 L'utilisation du papier imaginé par Weibull pour représenter $F(t)$ permet de déceler une loi de Weibull. Les points de coordonnées $(t_i ; F(t_i))$ sont alignés lorsque $\gamma = 0$.
 On retrouve alors graphiquement les valeurs de β et de η

➤ **Papier Weibull ou graphique d'Allen Plait :**

C'est un papier log / log qui comporte 4 axes



Axe A : Axe des temps sur lequel on porte les valeurs t des TBF

Axe B : valeurs des probabilités de défaillance F_i calculées par l'une des méthodes (rangs moyens, rangs médians, rangs bruts), On estime $R(t)$ par $R(t) = 1 - F(t)$

Axe a : axe des temps en logarithmes népériens : $\ln(t)$

Axe b : axe qui permet l'évaluation de β

➤ **Méthodologie de l'analyse de fiabilité**

- a. Consulter les historiques de pannes et dresser la liste des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances.
- b. Classer ces temps par ordre croissant.
- c. Cumuler le nombre de défaillances (rang). Au premier temps il y a 1 avarie, au deuxième temps, il y en a 2, etc.
- d. Calculer les fréquences des avaries $F(i)$, en fonction de la taille N de l'échantillon :
- e. Reporter les points ainsi trouvés sur le papier de Weibull en plaçant les TBF en abscisse et les $F(i)$ en ordonnée
- f. Tracer la droite passant au mieux par les points obtenus. Si les points sont alignés sur une droite, on a $\gamma = 0$.
- g. Détermination des paramètres η , β et γ :
- h. Détermination de la MTBF
- i. Exploitation des résultats.

6. LA MAINTENABILITE

Dans les conditions d'utilisation données pour lesquelles il a été conçu, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits. (NF EN 13306).

La maintenabilité caractérise la facilité à remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement. Cette notion ne peut s'appliquer qu'à du matériel maintenable, donc réparable. « Les moyens prescrits » englobent des notions très diverses : moyens en personnel, appareillages, outillages, etc.

Soit (TR) la variable aléatoire qui désigne la durée de réparation

$$M(t) = P(TR \leq t) = \int_0^t g(t)dt$$

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR (Mean Time To Repair)

$$MTTR = E(TR) = \int_0^{\infty} t \times g(t)dt$$

$$MTTR = \frac{\sum \text{Temps d'intervention pour } n \text{ pannes}}{\text{Nombre de pannes}}$$

Taux de réparation : $\mu = \frac{1}{MTTR}$

7. LA DISPONIBILITE

La 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 la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée.

Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance. Les moyens extérieurs nécessaires autres que la logistique de maintenance n'affectent pas la disponibilité du bien (NF EN 13306).

$$D_{\text{moy}} = \frac{TMD}{TMD + TMI} = \frac{\text{Temps moyen de disponibilité}}{\text{Temps moyen de disponibilité} + \text{temps moyen d'indisponibilité}}$$

$$\text{Équipement disponible} = \text{le moins possible d'arrêts de production} + \text{remise en bon état rapide en cas de panne}$$

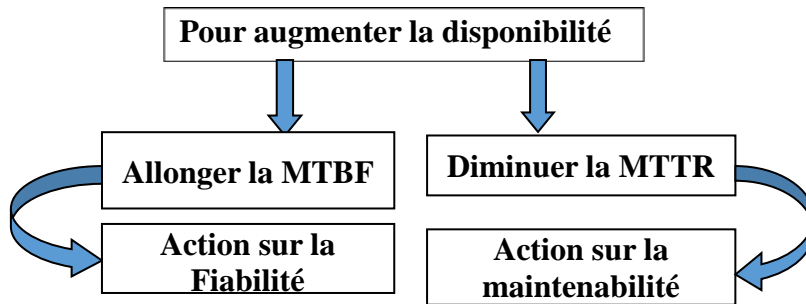


Figure 8 : variation de la disponibilité en fonction de la fiabilité et maintenabilité

$D(t) = P$ (le bien est en bonne état à l'instant t)

On montre que

$$D(t) = (\mu / (\mu + \lambda)) + (\lambda / (\mu + \lambda)) \exp[-(\mu + \lambda)t]$$

De manière usuelle

$$D(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$