

CHAPITRE 2: LES DIFFERENTES POLITIQUES DE MAINTENANCE

1. INTRODUCTION

Depuis que l'homme a réussi à fabriquer des outils, puis des machines, il a toujours été amené à réaliser des actions correctives. L'entretien traditionnel consistait majoritairement dans cette réalisation de dépannages et de réparations. Dans une logique de maintenance, nous déterminerons délibérément les actions préventives suivant la politique de maintenance choisie, alors que nous subirons les actions correctives de cette politique. Nous nommerons «risque α » la probabilité du correctif résiduel, complément inexorable de toute politique préventive.

La maintenance préventive à appliquer à un équipement relève d'un choix délibéré dont nous étudierons les critères. La figure 3.1. illustre la linéarité du coût du préventif en fonction du temps passé à le mettre en oeuvre. Dans l'hypothèse où le préventif est efficace, le temps passé à corriger les défaillances décroît, ainsi que les coûts associés au correctif résiduel. La somme des deux coûts est une «courbe en baignoire».

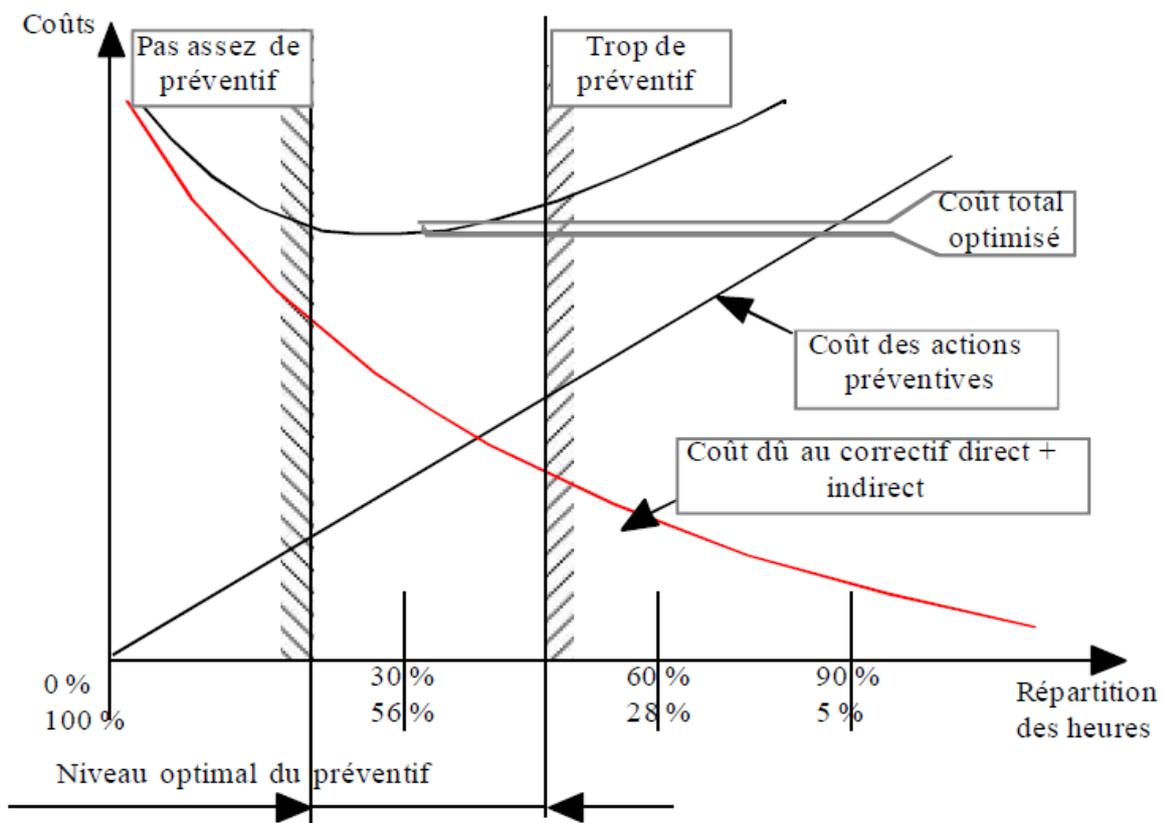


Figure 3.1. Coût économique de la complémentarité préventif/correctif

Le graphe illustre bien, pour un équipement donné, l'existence d'un optimum économique. Il prouve également que «faire de la maintenance, ce n'est pas forcément faire du préventif à tout prix».

La figure 3.2. illustre la variation de la charge totale de travail en fonction du pourcentage (préventif/correctif). Cette figure met en évidence la tendance décroissante de la charge de travail en fonction du préventif jusqu'à un certain seuil au-delà duquel le correctif devient quasiment incompressible.

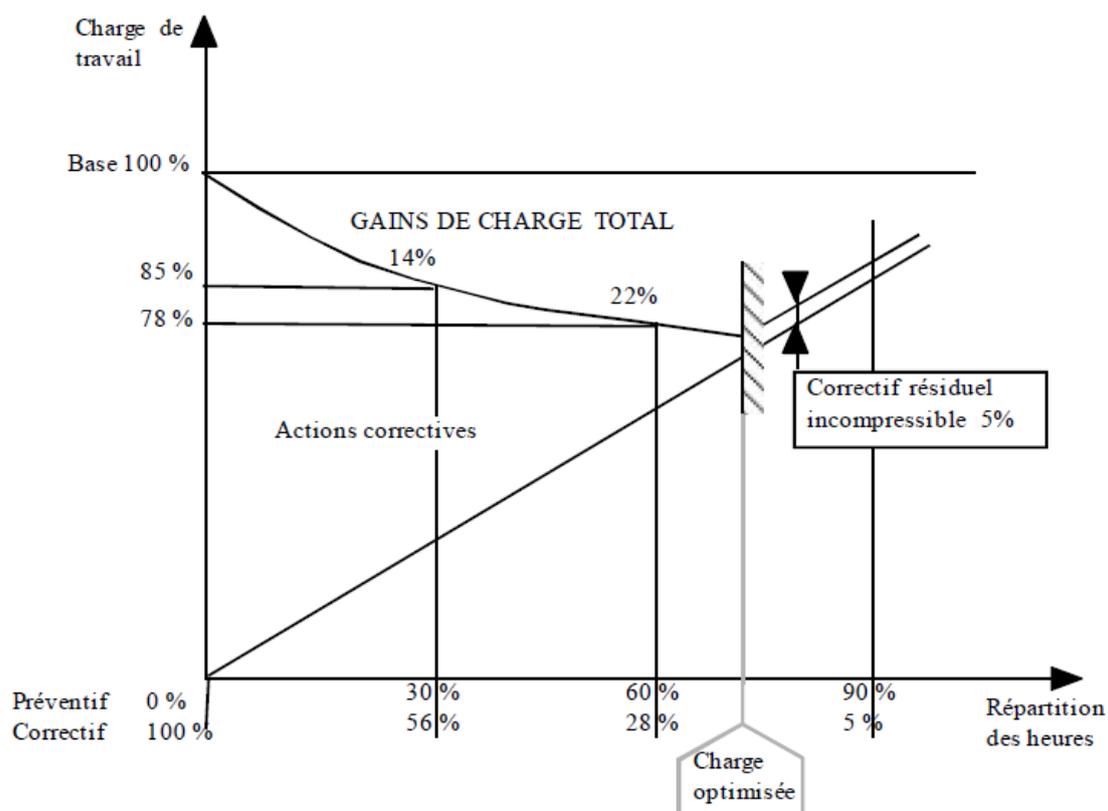
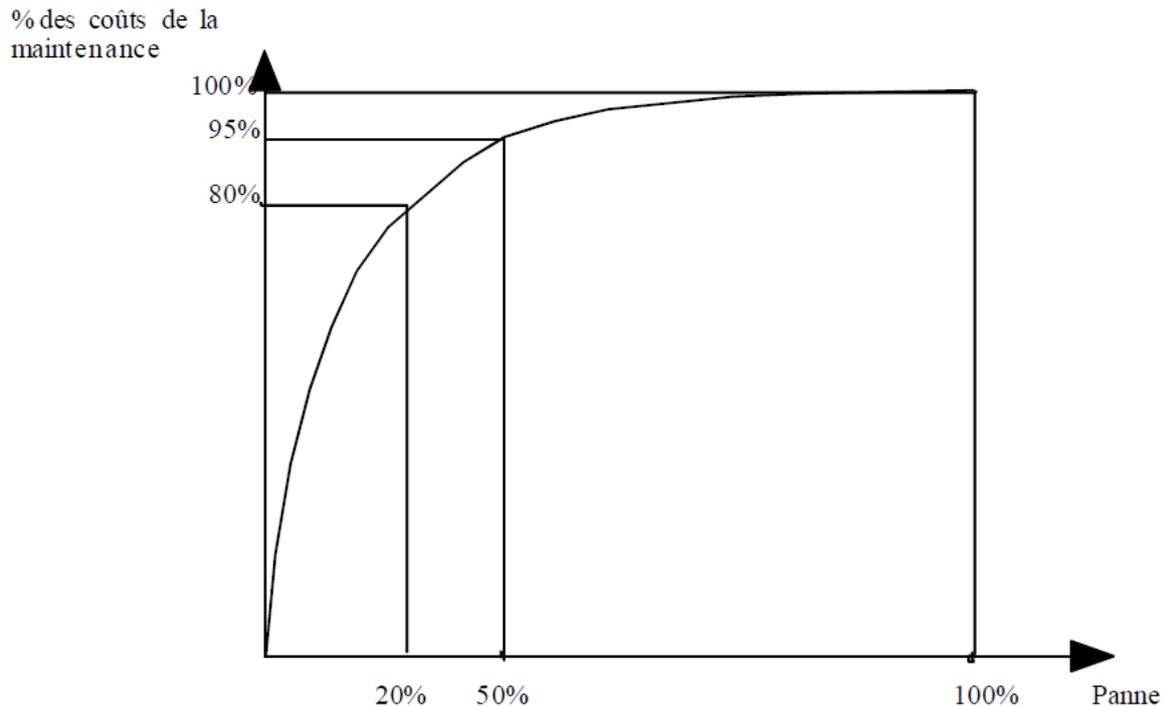


Figure 3.2: Promouvoir le préventif, c'est réduire la charge de travail

2. LA MAINTENANCE PREVENTIVE

Cette politique de maintenance s'adresse aux éléments provoquant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles classés comme importants pour l'entreprise. Ce sont les matériels appartenant à la catégorie A d'une courbe ABC (coûts/nombre de pannes, Figure 3.3).



Zone A : Elle correspond à la zone de priorité puisqu'elle contient 20% des pannes représentant 80% des coûts

Zone B : Dans cette tranche, les 30% des pannes ne coûtent que 15% supplémentaires

Zone C : Les 50% des pannes restantes ne reviennent qu'à 5% des coûts

Figure 3.3 : Coure ABC des pannes

Il convient donc d'organiser un système de maintenance visant à minimiser ces arrêts. Ainsi, on aura à pratiquer deux formes de maintenance dite préventive :

- **La maintenance préventive systématique** qui s'adressera à des éléments de la catégorie A et ne revenant pas trop cher en changement ; le but est de maintenir le système dans l'état de ses performances initiales. Pour cela, il est procédé lors de ces interventions à différentes opérations qui peuvent être : remplacement (de l'huile, des filtres, des roulements, des paliers..), réglage (des jeux, pressions, etc.)

- **La maintenance préventive conditionnelle** qui conviendra pour des matériels coûtant chers en remplacement et pouvant être surveillés par des méthodes non destructives (analyses de vibration, de l'huile, de la température, etc.). En effet, l'idée de la maintenance préventive conditionnelle consiste à ne changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement, ou d'usure mettant en danger ses performances.

La mise en pratique de cette maintenance nécessite de décomposer les sous systèmes ou machines en éléments maintenables. Ces éléments doivent être visités ou changés

régulièrement. La périodicité de ces visites s'établit par l'étude des lois de durée de vie. Des gammes d'entretien seront élaborées de façon à préciser le travail à exécuter par l'équipe de maintenance, un rapport sera rédigé mettant en relief les résultats des diverses mesures et les observations.

La mise en place de la maintenance préventive rend service :

- au service sécurité** (diminution des avaries en service ayant pour conséquence des catastrophes),
- au service maintenance** (meilleure planification, efficacité),
- au service fiabilité** (amélioration, connaissance des matériels),
- à la production** (moins de pannes en service).
- au gestionnaire** (action sur les coûts de non maintenance et ceux de maintenance).
- au client** (utilisation, moins de pannes),
- à l'enquêteur** (traçabilité, connaissance des avaries),
- au service qualité** (meilleurs service),
- au service logistique** (stock de rechanges),
- au service méthode** (meilleure planification de la production).

Elle agit sur :

- la planification des tâches dans le service maintenance** (moins d'imprévus, charge de travail plus régulière, moins de surcoûts dus à l'emploi de personnes intérimaires),

Gain = f (préventif)

- la sécurité** (moins de pannes ayant de conséquences catastrophiques),

Sécurité = f (préventif),

Cela implique une connaissance de $R(t)$ et $F(t)$

Sécurité = f ($R(t)$)

Pour un $F(t)$ donnée, on en déduit un temps d'intervention

- L'amélioration de la fiabilité**, $R(t)$ et de $\lambda(t)$, le taux de défaillance est artificiellement réduit.

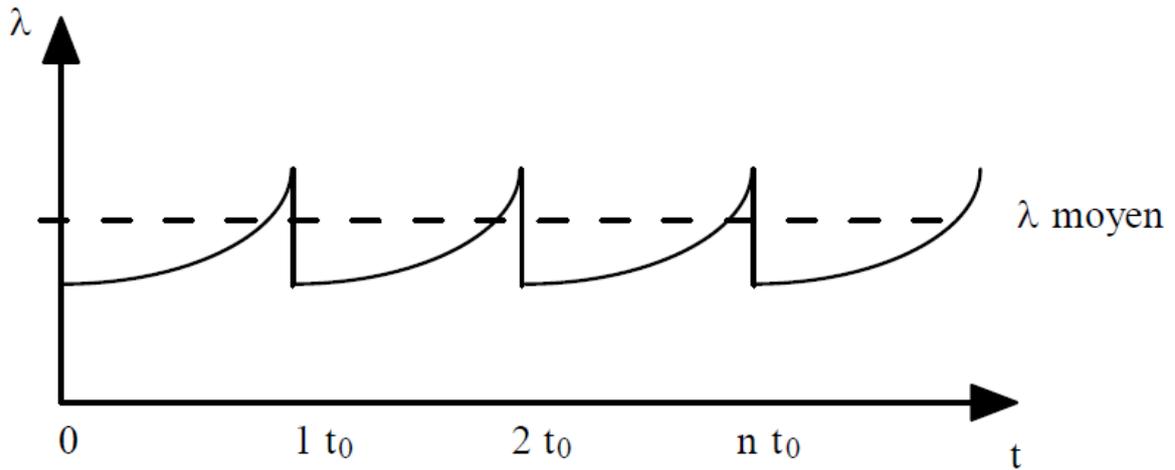


Figure 3.4: Amélioration de la fiabilité

Si on pratique une maintenance systématique toutes les « t_0 » heures de fonctionnement alors, la courbe de fiabilité aura l'allure suivante :

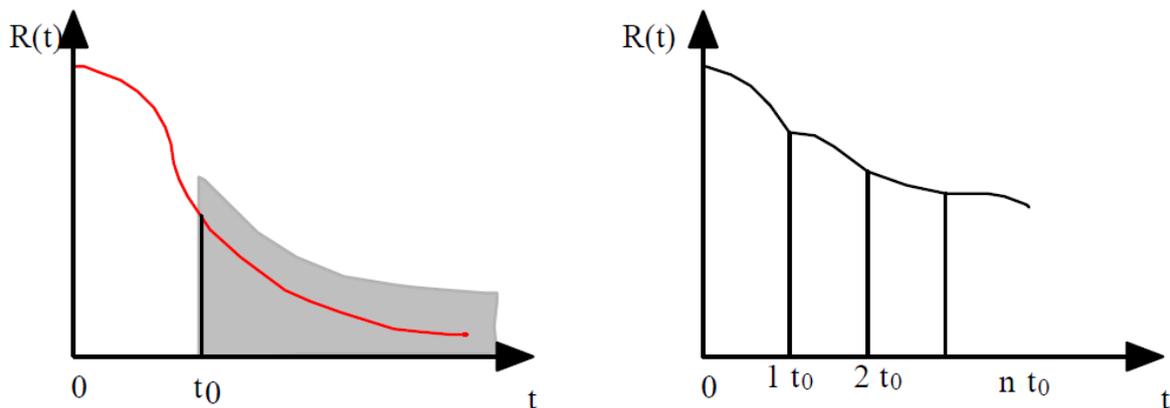


Figure 3.5: Action de la maintenance préventive sur la fiabilité

□ **sur les pannes** en production, diminution des arrête imprévus, meilleures MDT et MTTR ce qui implique une meilleure disponibilité « D_s »,

$$D_i = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (3.14)$$

D_s = disponibilité asymptotique d'un système «série»

$$D_s = \frac{1}{\sum \frac{1}{D_i} - (n-1)} \quad (3.15)$$

□ **sur les coûts**, augmentation des coûts directs de maintenance préventive.

Pour optimiser les politiques de maintenance, il est nécessaire de comparer le coût de maintenance préventive « C_P » aux coûts de la défaillance en service « C_D ».

Si on a une politique préventive, il faut décider de la fréquence des changements, de la planification, du renouvellement d'équipement.

□ **sur la qualité**, (*Régularité de la production*)

$Q = f(\text{préventif})$

Q : qualité de produit sortant d'un système maintenu.

Deux principales difficultés sont inhérentes à l'instauration de la maintenance préventive :

1. Intervenir sur un système en bon fonctionnement. Par nature, prévenir sur une panne implique d'intervenir sur un système en bon fonctionnement, inactif ou actif.

Dans ce dernier cas surtout, l'intervention est souvent mal perçue par les partenaires de production qui ont de «leur système» une perception à court terme (l'en-cours à livrer). D'où une indispensable concertation sur les modalités de l'intervention préventive.

2. La difficile justification économique de l'action préventive. L'intervention préventive a un coût noté C_P . La défaillance survenue a également un coût, notée C_d . Lorsque $C_d > C_P$, il est facile de justifier à posteriori une politique préventive.

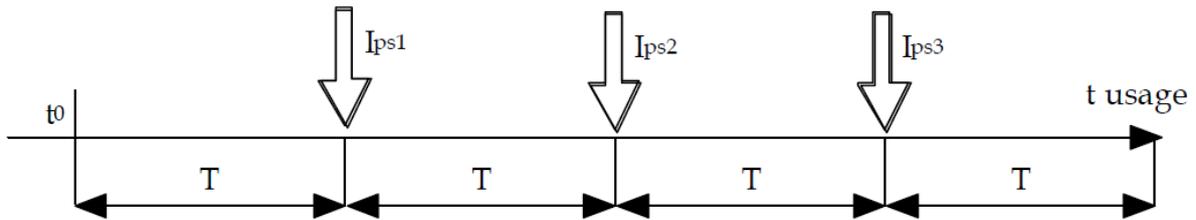
Mais à priori? Dans ce cas, la défaillance évitée devient virtuelle. Son coût également. Mais combien aurait coûté la défaillance que l'on a (probablement évitée) ?

D'où l'intérêt de mettre en mémoire, puis d'exploiter les coûts d'interventions correctives et préventives relatives à un équipement pour justifier la politique préventive à partir de graphes d'évolution annuels.

2.1 La maintenance préventive systématique

«[...] activités déclenchées suivant un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage» et aussi «les remplacements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leur état de dégradation, et ce de façon périodique».

Ces définitions sont illustrées par la figure 3.6. Nous noterons T la période d'intervention préventive systématique.



Ips : Intervention préventive systématique

Figure 3.6: Périodicité des interventions préventives systématiques

Les interventions Ips consistent le plus souvent en un changement de composant, visites préventives, réglages, étalonnages, etc.

Souvent elles se rapportent :

- à l'unité de production (remise à niveau par arrêt annuel par exemple),
- à un système (révision limitée ou générale),
- à un module ou sous ensemble par échange standard (carte électronique, vérin moteur, moteur électrique, etc.).
- à un composant «sensible» (filtre, lampe, balai de moteur CC, joint flexible, etc.)
- à un fluide (lubrifiant dégradé, etc.).

En ce qui concerne les interventions «lourdes», elles sont précédées d'une expertise des points à prévision de défaillances potentielles.

L'avantage majeur de la maintenance systématique réside dans sa facilité de gestion. Un programme informatique peut sortir le vendredi soir le listing des Ips de la semaine suivante. La charge de travail est ainsi connue longtemps à l'avance. Les Ips sont programmées dans la mesure du possible pendant des temps de «non-réquisition» du matériel concerné. Quand ce n'est pas possible, elles doivent générer des arrête programmés de production minimum, par échange standard de modules par exemple.

La défaillance a lieu avant une échéance, nous pourrons soit fonctionner en dégradé jusqu'à l'échéance (gestion dite collective), soit refaire partir T de la fin de l'action corrective (gestion dite individuelle).

2.1.1 Détermination de la période T d'intervention systématique

Sous le même vocable de maintenance systématique, voire de maintenance préventive, sont regroupés les actions de nature très variable, que nous allons étudier en fonction de la valeur de T (période d'intervention)

Tableau 3.1: Périodicité des interventions de la maintenance préventive

Valeur de T	Nature des actions systématiques	Critères du choix de T
Période courte 1/2 jour à une semaine	- Surveillance "active" - Visite préventive, ronde - Consignes permanentes/poste	- Préconisation fournisseur - Expérience - Habitudes empiriques
Période moyenne T = k. MTBF compris entre 1 semaine et 1 an	- Echange standard de module ou de composant - Actions ponctuelles sur un composant "fragile"	- Réglementaires - Préconisation - T optimisé par calculs, essais ou expériences
Période longue 1 an à 10 ans	- Révision limitées générales décennales - Arrêts périodiques, annuels	- Réglementaire - Empiriques (Tliée aux contraintes sociales : congès annuels par exemple)

Les travaux ont tous en commun leur caractère systématique et préventif. Là on arrête la comparaison :

Les travaux à période courte concernent les opérateurs sur site.

La «surveillance active» comprend les nombreuses mini-interventions dont peut prendre l'initiative un opérateur vigilant : resserrer des écrous, compléter un niveau de lubrifiant, détecter une fuite, retendre une courroie, etc.

Ce «soin» de nature préventive évite bien des défaillances ultérieures;

Les travaux à périodes moyennes concernent les techniciens de la maintenance. C'est à ce niveau que la détermination des périodes T est importante;

Les travaux à période longue sont souvent pour partie sous-traités à plusieurs prestataires extérieurs, bien que gérés par les «méthodes-maintenance» en interne.

2.1.2. L'optimisation économique de la période T

C'est une réflexion sur la criticité économique d'une défaillance qui va faire choisir de la prévenir, à partir d'un historique de phase corrective par exemple.

Cette même criticité économique estimée permet d'optimiser le choix de T. Nous noterons θ_t la valeur de T optimisée suivant les critères économiques.

a. Première méthode : simulation économique

□ Prérequis

- Connaissance de la loi de distribution $f(t)$ des défaillances à prévenir, donc du taux de défaillance λ et du requis a associé à la période d'intervention T .
- Estimation du coût de l'intervention corrective C_{ic} et du coût de l'intervention préventive C_{is}

□ Méthode

- On choisit une durée d'application de la maintenance systématique (3 ans, par exemple).
- On fait varier T pour des valeurs réduites de la MTBF ($0.5 < k < 0.9$) et l'on calcule pour chaque valeur de T le nombre d' I_{ps} sur la durée choisie.
- Pour chaque valeur de T , on estime le coût direct des n interventions préventives ($n C_{is}$).
- Pour chaque valeur de T , on estime la probabilité $F(t)$ d'avoir n' interventions correctives de coût $n' C_{ic}$.
- Pour chaque valeur de T , on fait le total $n C_{is} + n' C_{ic}$

On choisit alors la valeur de $\theta = T$ optimisée induisant le coût minimal sur la durée considérée. A partir du taux de défaillance λ , il est possible d'évaluer le gain de cette politique préventive par rapport à une politique corrective (éventuellement pratiquée et évaluée dans une phase précédente).

b. Deuxième méthode : loi de Weibull et abaque d'optimisation

L'utilisation de la loi de Weibull permet de donner des éléments de réponse concernant le choix entre la mise en oeuvre d'une politique de maintenance corrective ou préventive systématique. En effet elle permet de répondre aux questions suivantes :

- existe-t-il une période d'intervention systématique T telle que la maintenance systématique soit plus économique que d'attendre la panne ?
- si oui, qu'elle est cette période optimisée θ_t

□ Situation du problème et prérequis :

Soit un système réparable dont un constituant «fragile» est interchangeable.

A qu'elle période θ doit-on effectuer son remplacement préventif sachant que l'on connaît :

- la loi de comportement $R(t)$ du constituant
- p , le coût direct de l'intervention corrective, qui est, par hypothèse, égal au coût de l'intervention systématique liée au remplacement du constituant défectueux
- P , le coût indirect des conséquences de la défaillance ?

On notera $r = P/p$ le ratio de «**criticité économique**» de la défaillance. Le domaine de validité de l'outil que nous présentons est $2 < r < 100$

✓ **Evaluation de chacun des coûts**

➤ *Coût C_1 d'une intervention corrective*

Le coût d'une intervention corrective est $p + P$.

Le coût moyen par unité d'usage (pour comparaison) devient :

$$C_1 = \frac{P + p}{m_\infty}$$

$m_\infty =$ MTBF de composant = $E(t)$ de la loi de Weibull connue.

m_∞ est la durée de vie moyenne des composants fonctionnant sans limite de temps.

➤ *Coût C_2 d'une intervention préventive*

Si θ est la période de remplacement systématique du composant, le coût aura deux termes :

- le coût de l'intervention p ;

- le coût du correctif résiduel lié au risque de défaillance avant θ et évalué par sa probabilité $F(t)$ avec $t < \theta$. Soit $P F(t)$ ou $P (1 - R(t))$

Le coût moyen par unité d'usage est donc :

$$C_2(\theta) = \frac{p + P \times (1 - R(\theta))}{m(\theta)} \quad (2.16)$$

$m(\theta)$ étant la durée de vie moyenne des composants ne dépassant pas θ , puisque changés à cette date :

$$m(\theta) = \int_0^\theta R(t).dt \quad (2.17)$$

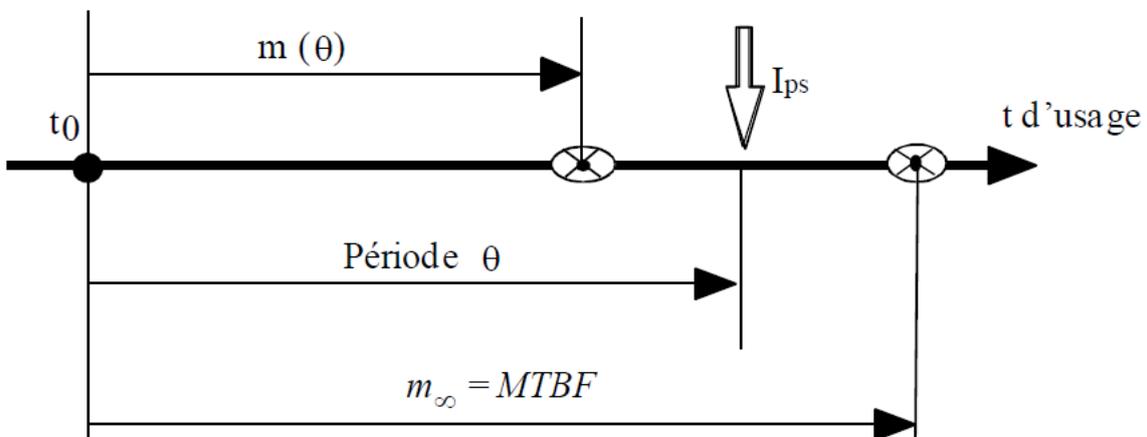


Figure 3.9: Périodicité optimale des interventions

✓ **Critères de choix d'une politique de maintenance**

Il est évident qu'il conviendra d'effectuer des opérations préventives si l'on trouve une solution telle que $C_2(\theta) < C_1$ que l'on étudiera sous la forme :

$$\frac{C_2(\theta)}{C_1} < 1 \quad (2.18)$$

✓ **Principe de l'optimisation de θ**

Le principe consiste à étudier les variations du rapport $C_2(\theta) / C_1$ lorsque θ varie :

- si le rapport reste > 1 , il n'y a pas de solution ;
- si le rapport a un minimum < 1 , la valeur de $t = \theta$ correspondant au minimum est la solution optimisée.

Formons le rapport et étudions ses variations :

$$\frac{C_2(\theta)}{C_1} = \frac{p + P \times (1 - R(t))}{m(\theta)} \times \frac{m_\infty}{p + P} \quad (2.19)$$

$R(\theta)$ est modélisable par une loi de Weibull à deux paramètres ($\gamma = 0$):

$$R(\theta) = e^{-\left(\frac{\theta}{\eta}\right)^\beta} \text{ et } m_\infty = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.20)$$

Posons :

$$x = \frac{\theta}{\eta} \text{ et } r = \frac{P}{p}$$

Après transformation le rapport devient :

$$\frac{C_2(x)}{C_1} = \frac{1 + r \times (1 - e^{-x^\beta})}{\int_0^x e^{-t^\beta} dt} \times \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}{1 + r} \quad (2.21)$$

$\frac{C_2(x)}{C_1}$ est dépendant de deux paramètres :

- β : paramètre technique, qui caractérise la forme de la distribution;

- r : paramètre économique, caractérise le rapport des coûts indirects/directs (criticité de la défaillance).

✓ **Exemple de courbe de variation du rapport $C_2(x)/C_1$**

Nous allons tracer la courbe représentative des variations du rapport dans le cas suivant :

- données de fiabilité (Weibull) : $\beta = 3$, $\gamma = 0$, $\eta = 10$ mois (avec une MTBF = 8.9 mois);

- données économiques estimés : $r = P/p = 10$ puis 5 et 3.

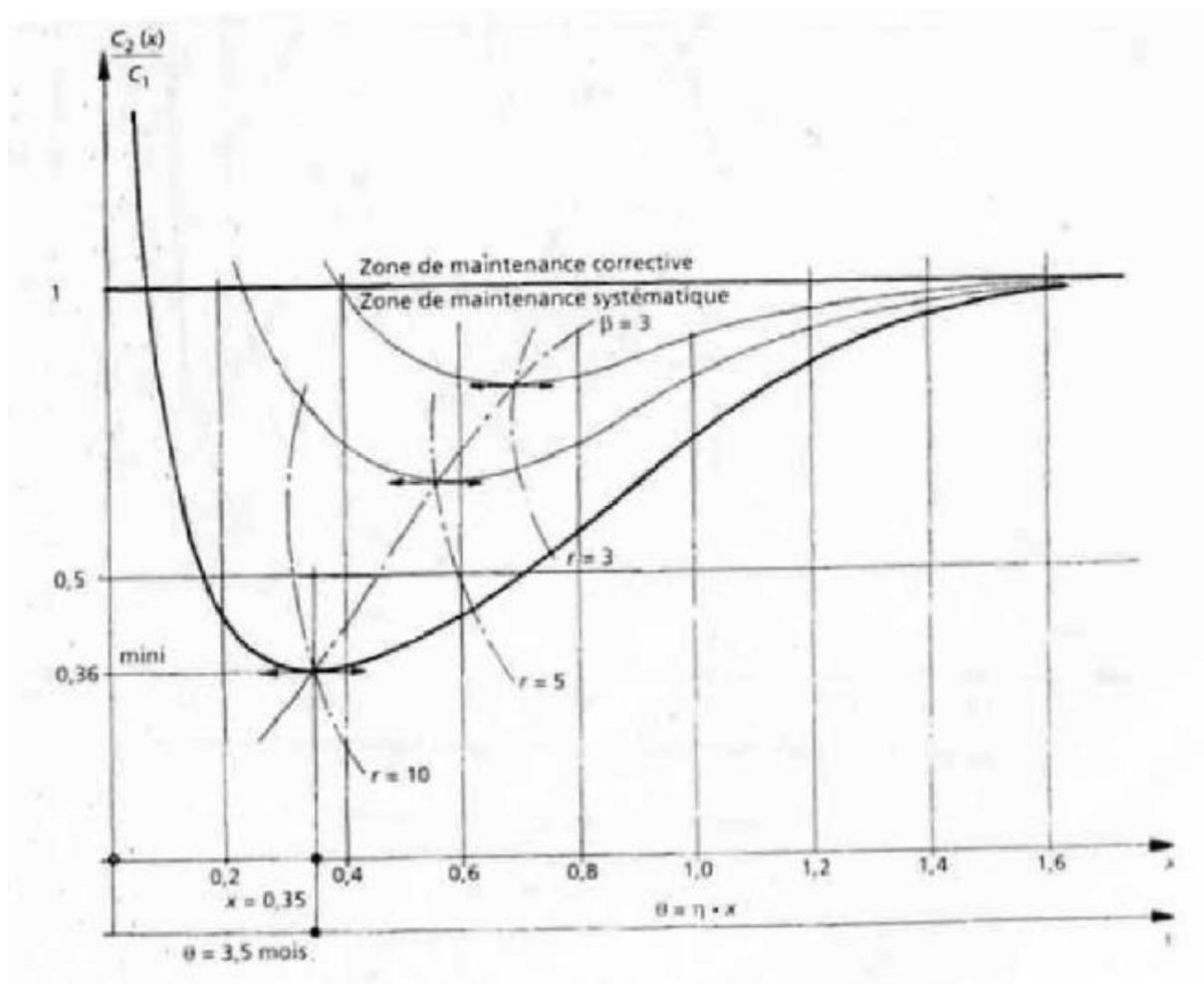


Figure 3.10: Variation du rapport $C_2(x)/C_1$

La valeur $\text{mini} = 0,36 < 1$ exprime le gain d'une politique de maintenance préventive effectuée à $x_0 = 0,35$, donc à la période d'intervention systématique mois $\times 0,35 = 3,5$ mois.

Rappelons que la MTBF de cet exemple était de 8,9 mois, ce qui montre que **le défaut majeur de la maintenance systématique même optimisée reste l'importance «gaspillage de potentiel» d'utilisation du composant changé.**

✓ **Abaques d'optimisation de la période d'intervention systématique**

➤ principe de l'établissement de l'abaque :

La courbe précédente ne nous intéresse que par son minimum, repéré par ses coordonnées x et $C_2(x)/C_1$ et paramétré par les deux variables de β et r . Nous allons donc ne tracer que chaque point minimum obtenu pour des séries de valeurs de β (1,2 à 4) et de r (2 à 100). Il restera à interpoler ces courbes en fonction des deux paramètres de l'étude à mener.

➤ abaque (r, β) en gestion individuelle (Figure 3.11)

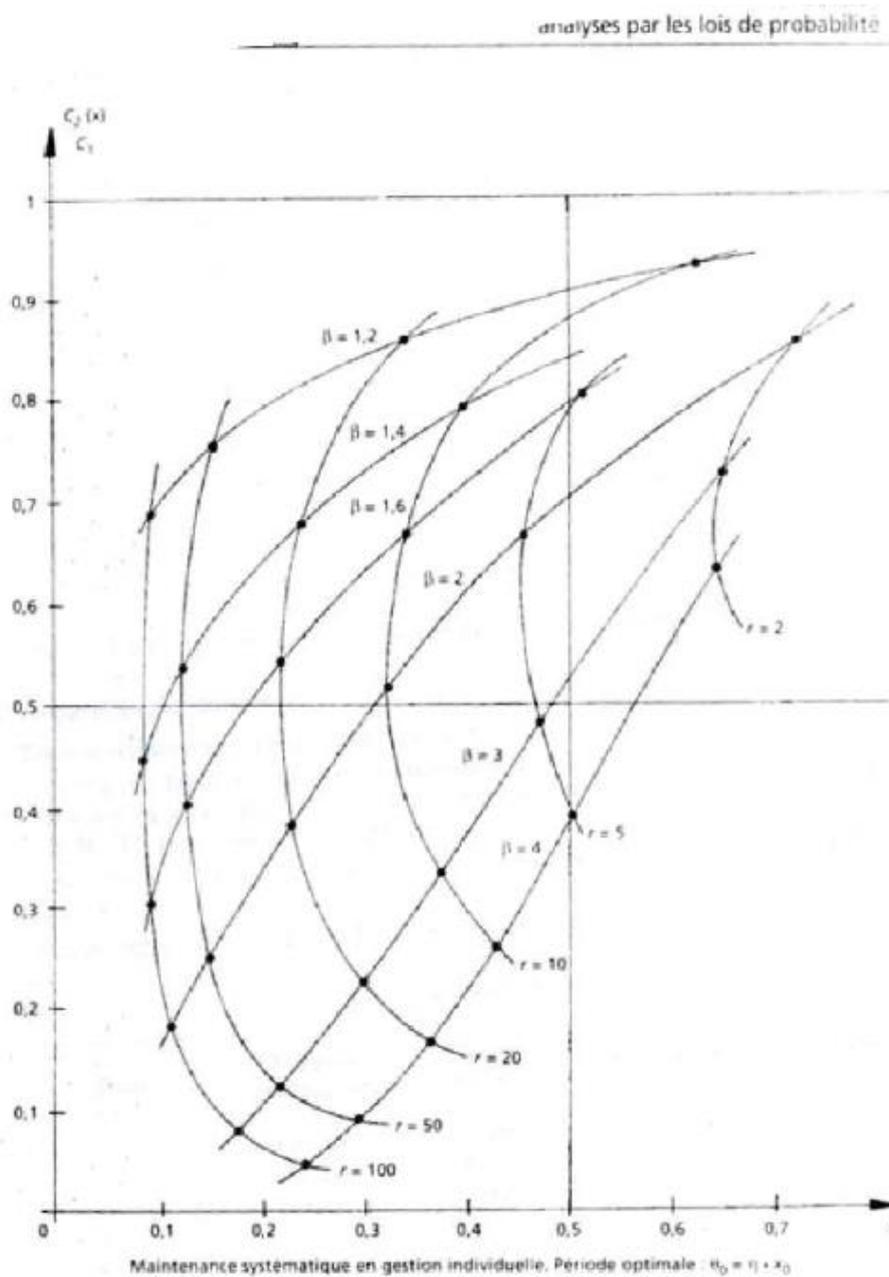


Figure 3.11: Abaque d'optimisation de la maintenance systématique (gestion individuelle)

➤ Utilisation de l'abaque

L'intérêt de cet outil réside dans sa rapidité d'utilisation. A partir de r et de β , par interpolation des courbes du réseau, nous déterminons graphiquement les coordonnées du point «mini» à l'intersection des deux courbes interpolées :

- L'ordonnée C_2/C_1 donne la valeur du gain par rapport à une politique corrective ;
- l'abscisse x_0 se corrige par la formule de changement de variable : $\theta = \eta \cdot x_0$

➤ Remarque : gestion individuelle et gestion collective

L'étude précédente a été menée dans le cas le plus fréquent de la gestion individuelle de la maintenance systématique. Ce qui signifie qu'en cas de défaillance résiduelle, le remplacement correctif du composant défaillant initialise une nouvelle période θ .

En gestion collective, par opposition, l'échéancier primitif subsiste: il n'est pas corrigé en cas de défaillance résiduelle. Dans ce cas, l'expression du coût de la politique préventive devient :

$$C_2(\theta) = \frac{p + (p + P) \times E(\theta')}{\theta'} \quad (2.22)$$

La démarche d'établissement de l'abaque «gestion collective» est identique à la précédente

➤ Abaque (r, β) en gestion collective (voir figure 3.12)

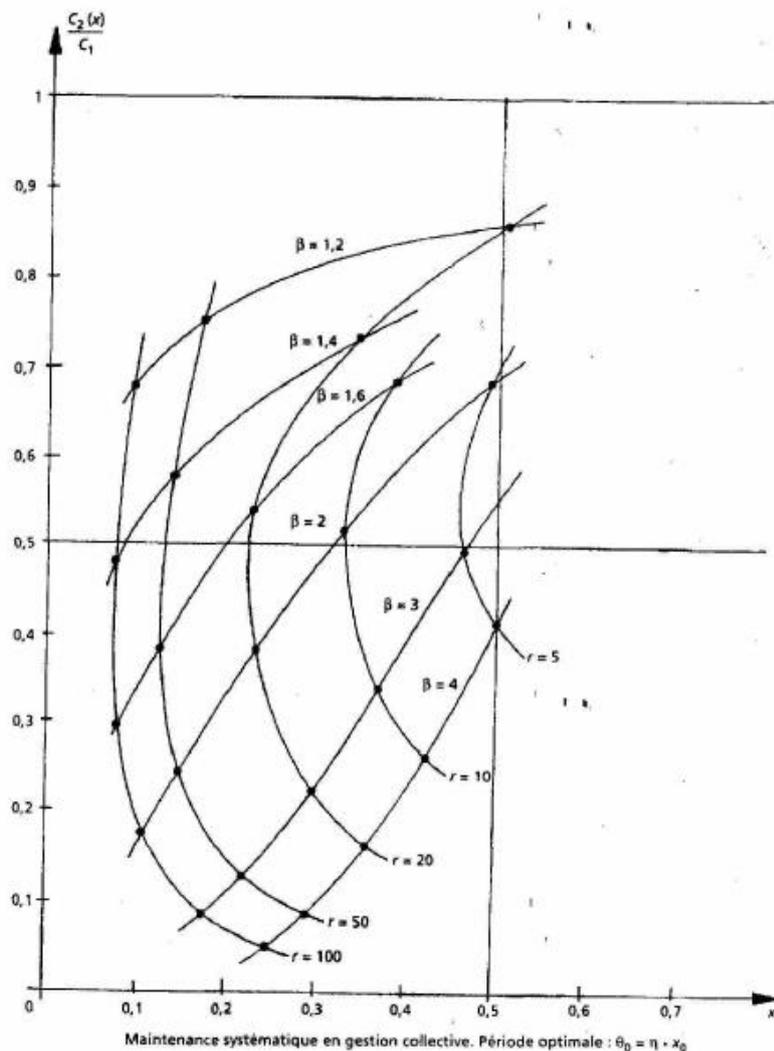


Figure 3.12: Abaque d'optimisation de la maintenance systématique (gestion collective)

➤ Incidences du choix de la valeur de T

Si T décroît, nous intervenons plus souvent, donc nous avons :

- plus de consommation des modules, plus de coûts directs (pièces et main d'oeuvre),
- plus d'occasion de gêner la production,
- plus de gaspillage de potentiel d'utilisation du module

Mais aussi moins de risque de défaillance avant T, donc une plus faible probabilité de subir les coûts indirects (conséquences économiques d'une défaillance fortuite).

Si T croît, les implications précédentes sont naturellement inversées. D'où une méthode «de bon sens» pour déterminer T en fonction du risque α de correctif résiduel.

Remarquons que le raisonnement relatif à l'incidence économique du choix de T est le même que celui de la détermination d'une période de garantie.

2.1.3. Gestion de la maintenance systématique par la méthode ABAC – ABAD

➤ Problème à résoudre :

Rappelons que l'avantage majeur de la maintenance systématique est d'être facile à gérer. Or nous venons de voir comment l'on peut optimiser une période d'intervention systématique «individualisée». Si l'on applique à un système les n périodes T optimisées trouvées pour chaque composant et pour chaque module, l'on arrive à une planification aberrante, car contraire à l'objectif initial de simplicité !

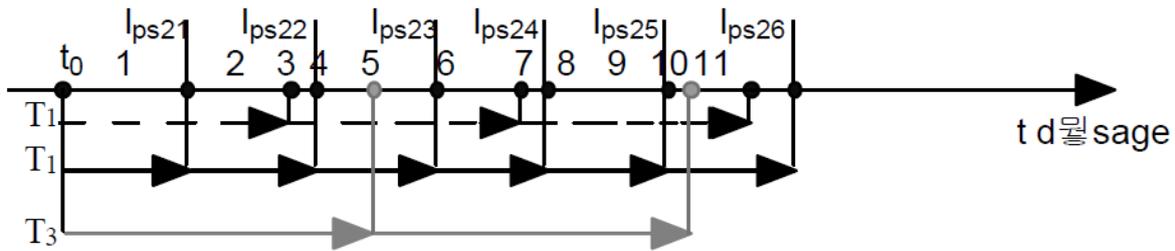


Figure 3.13: *L'individualisation de la maintenance systématique par la méthode ABAC-ABAD*

Cette figure calculatrice, construite à partir de seulement trois périodes T_1 , T_2 et T_3 montre des interventions préventives incessantes, perturbant la production.

➤ Solution : la méthode ABAC-ABAD

L'idée de base est de regrouper ces différentes I_{ps} , à partir d'un «pas» sous multiple d'une durée de cycle prédéterminée : 1 an ou 52 semaines en unités calendaires, ou 8.000 heures en durée d'usage par exemple, cela afin de limiter le nombre des interventions. Ces regroupements de périodes à des échéances prédéterminées implique de modifier légèrement les périodes T que l'on a individuellement optimisées.

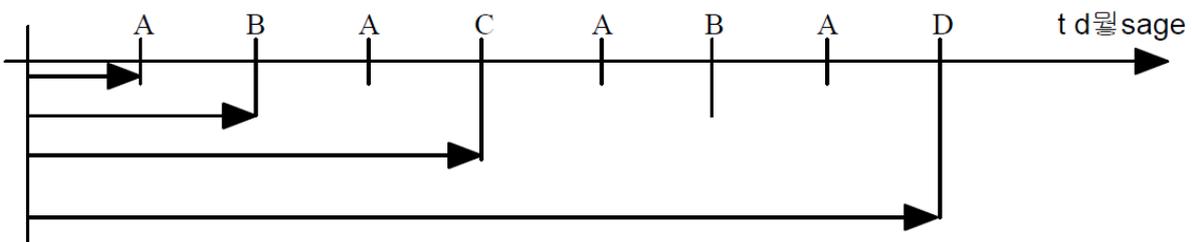


Figure 3.14: *Principe de la méthode ABAC – ABAD*

Nous avons ainsi des programmes à 4 (ou 8, ou 16) types d'intervention.

OA correspond au «pas», OD correspond souvent à un cycle de révision générale ou limitée.

- Ips de type A : listing du regroupement des périodes T voisines de OA
- Ips de type B : A + regroupement des périodes voisines de OB
- Ips de type C : A+ B + regroupement des périodes voisines de OC
- Ips de type D : A + B + C + regroupement des périodes voisines de OD.

Il est toujours possible d'individualiser (par exception à une règle) la prise en charge préventive d'un module ou d'un composant «sensible» dont le comportement est bien connu. L'objectif en la matière étant de réduire le nombre d'interventions Ips, surtout s'il s'agit d'arrêts programmés.

Exemple :

Les visites préventives d'un équipement sont fixées ainsi :

- opération 1 : toutes les 500 heures de fonctionnement relevées sur le compteur ;
- opération 2 : toutes les 1000 heures ;
- opération 3 : toutes les 2000 heures ;
- opération 4 : toutes les 4000 heures ;
- opération 5 : toutes les 8000 heures ;

Tableau 3.2: *Echéancier de visites préventives systématiques*

Heures de marche	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	...	8000
Type de visites	A	B	A	C	A	B	A	D		E
Opérations	1	1+2	1	1+2+3	1	1+2	1	1+2+3 +4		1+2+3 +4+5

2.1.4 Synthèse : avantages et inconvénients

La maintenance systématique a un grand avantage : elle est facile à gérer par le fait que les activités sont programmées. La charge de travail est ainsi connue à l'avance, ainsi que la nature des travaux préventifs et de consommations s'y rapportant (gestion des stocks). Les arrêts de production, s'ils s'avèrent indispensables, sont également «négociables» à l'avance avec la production.

Contrairement à la maintenance conditionnelle, elle s'applique à des défaillances «catalectiques» (soudaines et complètes) aussi bien qu'aux dégradations, à condition d'exploiter un historique de ces défaillances. En diminuant le nombre des événements «fortuits», elle est aussi un facteur de régularisation des activités dans l'entreprise (moins d'improvisation = plus de sécurité). Toutefois, elle présente également des inconvénients :

- de façon inhérente à la méthode, elle génère un inévitable «gaspillage de potentiel» d'utilisation d'un module ou d'un composant. Pour une courroie de transmission ou un joint, ce n'est économiquement pas grave. Lorsqu'il s'agit d'un sous-ensemble coûteux, c'est plus discutable. Nous verrons au paragraphe suivant «la maintenance conditionnelle» un meilleur moyen de résoudre ce problème ;
- le risque de «correctif résiduel» n'est pas toujours facile à évaluer. Faute de données opérationnelles suffisantes, les agents des méthodes sont souvent réduits à fixer les périodes d'intervention par empirisme, sans réellement maîtriser le risque de panne fortuite. Qui, dans tous les cas, est «non nul» !
- comme toute action préventive, l'intervention sur un bien «qui marche» peut être mal perçue
- enfin ce que coûte un plan de préventif systématique est visible. Ce qu'il apporte l'est moins...

2.2 La maintenance conditionnelle et prévisionnelle

2.2.1 Définition (Norme AFNOR):

« Les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées [...] suivant des critères prédéterminés **significatifs de l'état de dégradation** du bien ou du service.»

Maintenance préventive conditionnelle : « Les remplacements ou les remises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise d'effectuer les remplacements ou les remises nécessaires.»

Maintenance prévisionnelle : « maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de **retarder** et de **planifier** les interventions. Elle est parfois improprement appelée maintenance prédictive».

La figure 3.15. illustre le principe de la maintenance conditionnelle. Elle se rapporte au suivi par mesures périodiques d'une dégradation jusqu'au seuil d'alarme qui déclenche une intervention préventive conditionnelle (notée Ipc).

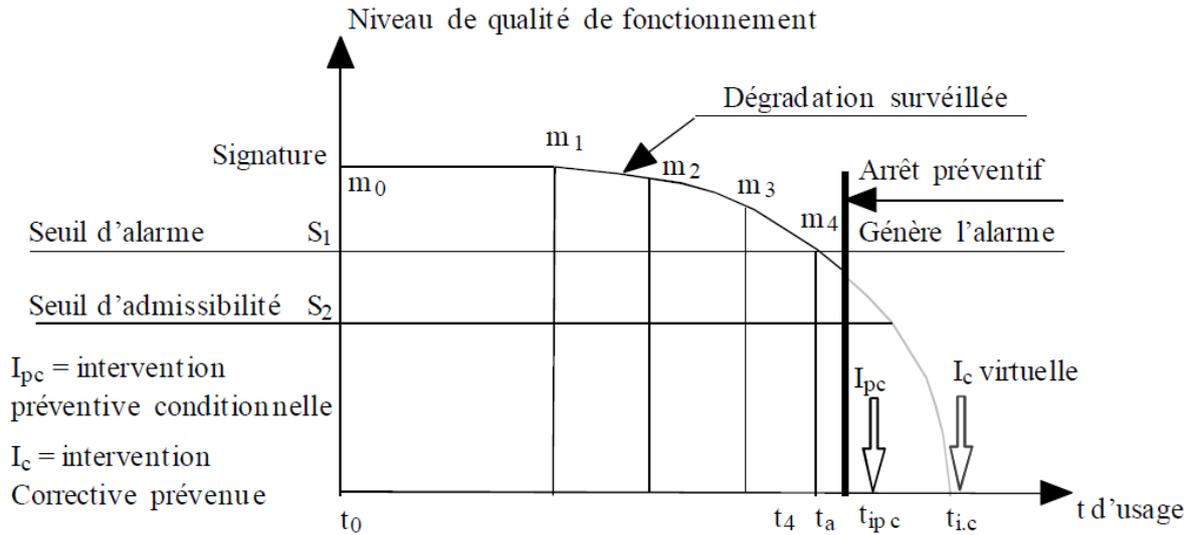


Figure 3.15: Principe de la maintenance conditionnelle

- La «signature» est une prise de référence de l'état de «bon fonctionnement» à l'origine
- Les mesures (cas le plus fréquent) peuvent être de simples observations visuelles (état constaté), des images (spectres, radios, etc.). Elles peuvent être remplacées par des alarmes pré-réglées (fusible, etc.), ou des inspections préventives in situ. Les mesures m_i peuvent être continues ou périodiques, espacées de Δt de telle manière que la dégradation à prévenir ne puisse échapper à la surveillance :

$$\Delta T < t_{\text{admissibilité}} - t_{\text{alarme}}$$

- Les mesures peuvent ne pas commencer à t_0 (sauf signature) si l'on connaît la loi de dégradation. Les mesures peuvent être collectées par rondes ou «monitorées» à la centrale surveillance.
- L'arrêt sera généré automatiquement par l'alarme (cas d'un fusible), ou différé par décision volontaire jusqu'à l' I_{pc} programmé et organisée.
- L'intervention I_{pc} sera programmée à partir de l'alarme, suivant un temps de «réaction» du service maintenance à prédéterminer. Son coût direct C_{Ipc} sera par nature (choix de dégradation à prévenir) très inférieur au coût (direct + indirect) de la défaillance évitée :

$$C_{Ipc} \ll C_{ic}$$

2.2.2 Méthodologie de la mise en oeuvre

La méthodologie est proposée en neuf étapes successives qui permettent de poser le problème de la maintenance conditionnelle à partir d'une défaillance à prévenir avant de choisir les matériels nécessaires, d'organiser la surveillance et de préparer l'Ipc

1. Sélection des défaillances à prévenir
2. Sélection d'un (ou n) paramètre physique
3. Choix des capteurs
4. Choix du mode de collecte des informations
5. Détermination des seuils
6. Choix du traitement de l'information
7. Définition des procédures après alarme
8. Organisation de l'intervention conditionnelle Ipc
9. Bilan d'efficacité de retour d'expérience

2.2.3 Les outils de la maintenance conditionnelle

Un démontage, un remplacement des pièces ou de sous-ensembles coûtent cher. Il constitue une perte de temps productif, un coût d'intervention du personnel de maintenance, un coût de pièce ou de sous-ensemble, un risque de mauvais montage, ...

La maintenance conditionnelle vise à en réduire au maximum la fréquence, tout en limitant les risques de défaillance. Le principe de la maintenance conditionnelle est de ne changer un élément que lorsqu'il présente des signes de vieillissement ou d'usure tels qu'ils mettent en cause, à brève échéance, ses performances.

Même si les interventions sont ainsi retardées, elles sont programmées en tenant compte des impératifs de production.

On s'appuie sur des mesures physiques qui sont :

- Mesure des vibrations et du bruit.
- Mesure des températures.
- L'analyse des huiles.

➤ Analyse des vibrations

Lorsque les machines sont en bon fonctionnement elles vibrent avec une fréquence bien déterminée. Ainsi leur spectre de fréquence de leurs vibrations a un profil particulier lorsqu'elles sont en état de «bon fonctionnement». Par ailleurs, dès que les phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement apparaissent ces fréquences se modifient. L'analyse de vibration permet de détecter les perturbations du système.

Ainsi elle devient un élément important de la maintenance conditionnelle.

Lors de l'analyse de vibration plusieurs paramètres peuvent être mesurés et sont porteurs de renseignement, tels que l'amplitude de vibration, la vitesse et l'accélération.

Amplitude : Cet indicateur sert à mesurer le faux rond de rotor des machines tournantes à l'aide des capteurs de proximité, véritables indicateurs de vibrations de l'arbre plutôt que des capteurs de contact fixés sur l'enveloppe extérieurs.

Fréquences : L'analyse de la fréquence permet d'identifier la provenance du défaut. Une modification dans le temps de certaines fréquences est un signe de défaut.

Cette analyse peut se pratiquer à l'aide d'un analyseur de fréquence à balayage par exemple.

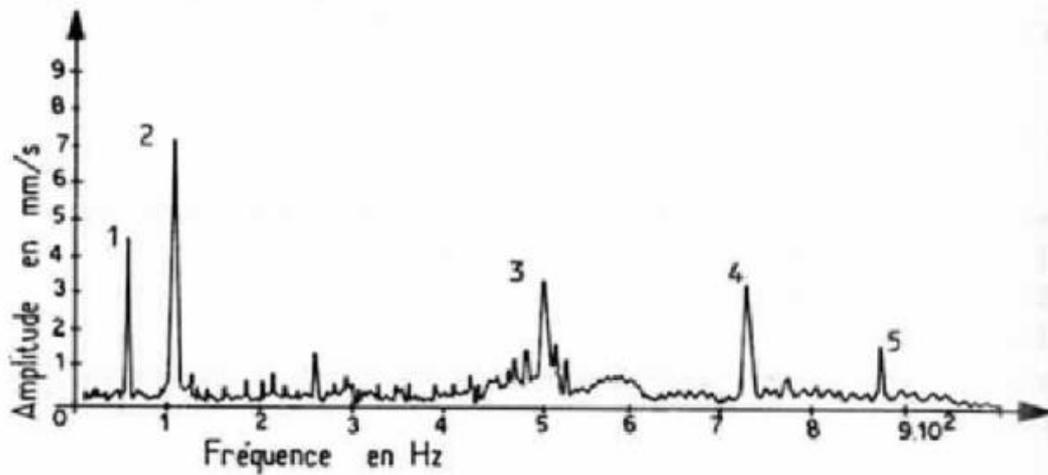
L'angle de phase : L'angle de phase permet de déterminer les positions du point haut du rotor et par suite, les positions de déséquilibre résiduel de ce dernier. Ainsi l'angle de phase constitue un paramètre important de diagnostic et de l'équilibrage des machines tournantes.

On distingue trois types des capteurs de vibrations permettant de suivre d'une façon permanente des divers indicateurs de l'état de fonctionnement des machines (voir tableau 2.3).

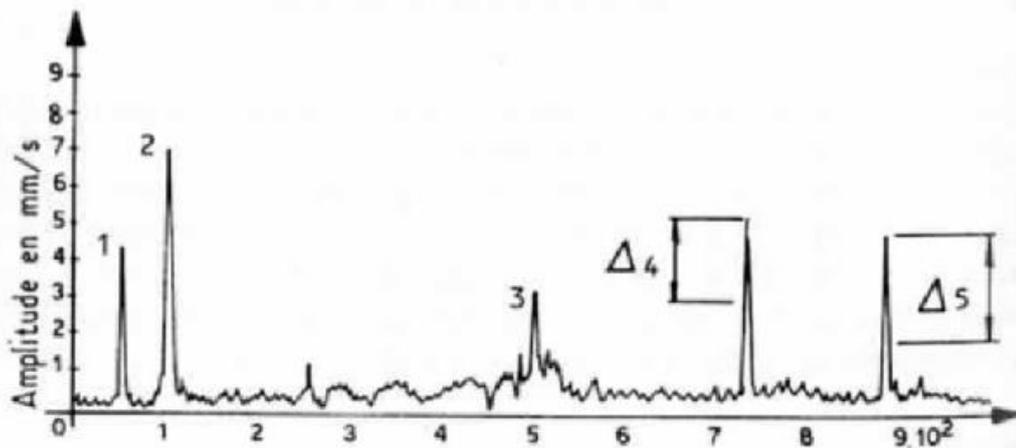
Tableau 3.3: *Les différents capteurs de vibration*

Capteur	Fonction	Avantages	Inconvénients
Les capteurs de proximité	Les capteurs de proximité permettent de mesurer le mouvement de l'arbre ainsi déterminant la provenance de vibrations	<ul style="list-style-type: none"> - Mesurer par moyen sans contact qui n'influence pas le mouvement vibratoire. - Le système modulaire, partie la moins coûteuse, le capteur n'exige pas son remplacement qu'en cas d'erreur mécanique. - Excellente réponse en fréquence, convient pour la plupart des environnements des machines. 	Le capteur de proximité est très sensible à la composition spécifique du matériau constituant l'arbre du moteur et il exige une alimentation extérieure, quelquefois difficile à installer.
Les capteurs de vitesse		<ul style="list-style-type: none"> - Signal élevé dans les fréquences moyennes en fonction des environnements et de la température. - Absence d'alimentation extérieure. 	<ul style="list-style-type: none"> - encombrement important - l'aspect de l'appareil compact nécessite un remplacement intégral en cas d'incident : - la présence des pièces mobiles dans l'appareil mécanique risque de se détériorer même par un usage normal - ne mesure que le mouvement dynamique.
Accéléromètre		<ul style="list-style-type: none"> - facile à installer, il indique une bonne réponse en hautes fréquences - léger et petit - fort signal avec les hautes fréquences. 	<ul style="list-style-type: none"> - grande sensibilité à la fréquence d'entrée - étalonnage difficile et un coût élevé - alimentation extérieure nécessaire - exige un certain filtrage pour les applications lors du suivi des indicateurs de l'état de fonctionnement des machines.

◇ Exemple d'analyse de signature



Spectre d'une machine en bon état



Spectre de la même machine qui a un roulement présentant des défauts sur la piste de la bague extérieure

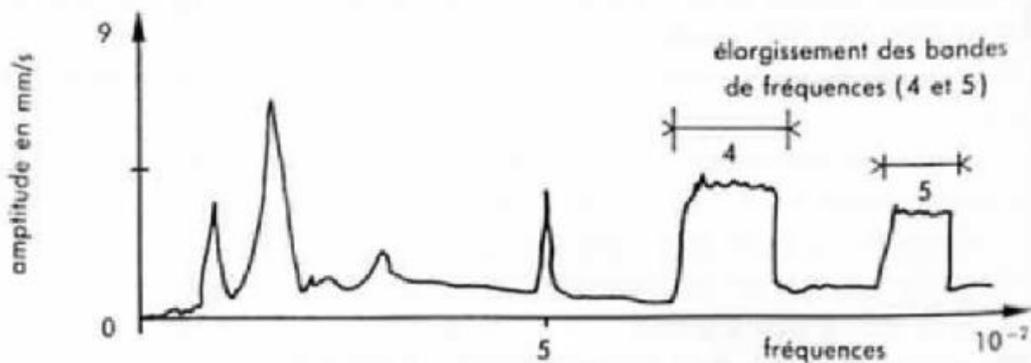


Figure 3.16: Exemple d'analyse de signature

➤ Analyse des températures

La mesure de la température d'une machine est importante car une variation de la température sur une machine tournante est souvent signe d'une dégradation et peut donc provoquer l'arrêt de fonctionnement et même la détérioration de la machine.

Plusieurs techniques permettent de déterminer ces mesures telles que la thermographie infrarouge.

La thermographie infrarouge est une technique qui permet de mesurer les luminances aux grandeurs radio métriques, d'établir la cartographie et de suivre son évolution au cours de temps. Le principe consiste à mesurer le rayonnement électromagnétique émis spontanément par les objets dès que leur température dépasse 0.

La thermographie infrarouge est utilisée en maintenance industrielle lorsque les dégradations du matériel est au niveau de l'utilisation. Cette technique a pour objectif principal de quantifier l'urgence de l'intervention.

Les avantages de cette méthode sont :

- une analyse rapide.
- absence de contact physique avec les objets à mesurer : objets chauds, en mouvement, sous tension électrique, inaccessible et polluants.

Les secteurs d'application de la thermographie sont :

- la pétrochimie
- l'électricité.
- le nucléaire.
- l'automobile.
- la verrerie,
- la papeterie
- Analyse d'huile

Les analyses d'huiles en service permettant d'une part de déterminer les moments adéquats de renouvellement d'un organe lubrifié en étudiant l'évolution et le degré de dégradation ou de la contamination d'huile entre deux vidanges, d'autres part de détecter sans démontage ni arrêt de matériel, les premiers symptômes de l'usure anormale d'un organe en étudiant les particules d'usures par le frottement des pièces en contact.

Deux facteurs principaux interviennent pour modifier les caractéristiques d'un lubrifiant et le rendre inapte à sa fonction :

1. La dégradation qui se produit généralement par oxydation ou usure sous l'action de la température et de l'oxygène ou de la cassure de la chaîne moléculaire entraînant une altération des caractéristiques de lubrifiant ainsi la formation des dépôts donc pour améliorer la durée de vie de lubrifiant on doit maintenir les réservoirs d'huiles à une température bien déterminée.

2. La contamination qui est provoquée soit par des débris d'usures, soit par des particules solides ou par des polluants solubles tels que les hydrocarbures et les solvants capables d'altérer les propriétés physiques et chimiques du lubrifiant.

La méthode d'analyse de la contamination des huiles présente plusieurs avantages :

- La réduction des vidanges en vérifiant périodiquement la qualité du lubrifiant et en contrôlant son taux de contamination.
- L'optimisation de la consommation d'huile.
- La minimisation du coût des pièces de rechanges.

3 LA MAINTENANCE CORRECTIVE

La maintenance corrective est, d'après la norme AFNOR X60-010 (AFNOR [1]), la maintenance effectuée après apparition d'une défaillance. Celle-ci étant de nature aléatoire, les tâches correspondant à cette forme de maintenance sont subies, et ne sont pas planifiables.

Ces tâches comprennent les opérations suivantes :

- détection et signalisation des anomalies,
- localisation de la panne (effet) et diagnostic (cause),
- réparation,
- test, puis remise en production,
- rapport d'intervention (éventuellement à l'aide d'un outil informatisé de saisie). Ce rapport est indispensable pour renseigner les bases de données sur les statistiques de fiabilité / disponibilité et sur les coûts.

L'efficacité des actions de maintenance corrective est liée à de nombreux facteurs, touchant à la fois à la **maintenabilité** des équipements, à la **compétence** et à la **disponibilité** des personnes, et à l'**organisation** de la **logistique de maintenance**.

Toute faiblesse dans ces facteurs se traduit par une perte de temps d'intervention, donc par une perte de production et un surcroît de coût.

En ce qui concerne la localisation des pannes et le diagnostic, quelques observations essentielles peuvent être formulées :

- une bonne analyse est basée sur une méthode de diagnostic préalablement définie, et nécessite une qualité d'information élevée (documents techniques, outils de recherche des pannes, etc.).
- la logique de recherche des défaillances d'un équipement n'est pas la même que sa logique de fonctionnement.
- pour un dépannage rapide, les informations suivantes sont notamment nécessaires :

- visualisation des états en cours de la machine
- visualisation des états antérieurs à l'anomalie
- historique des interventions déjà effectuées sur cette machine
- documentation technique et fonctionnelle de la machine
- outils d'aide au diagnostic et / ou procédures d'intervention préétablies, voire logiciel du type système expert.

Ces informations et ces outils doivent être mis à la disposition de l'agent de maintenance autant que possible « au pied de la machine défaillante » : c'est pourquoi des systèmes de terminaux associés à des réseaux locaux sont aujourd'hui mis en place dans les ateliers où une haute disponibilité est nécessaire (assemblage automobile, production de grande série en flux continu, etc.).

Enfin, un langage commun entre agents de maintenance et opérateurs de fabrication est essentiel pour un dépannage rapide.

Tableau 3.4: *Besoins associés à la réparation d'une machine*

Opération de maintenance	Besoin associé	Nature du besoin		
		Information	Matériel	Organisation
Identification de la machine en panne + Diagnostic de la panne	Localisation de la machine	X		
	Dossier technique	X		
	Outil de diagnostic		X	
Recherche des opérations de maintenance déjà effectuées sur cet équipement	Historique des incidents et opérations effectuées.	X		
	Pièces de rechange utilisées			X
Consultation de la gamme des opérations de maintenance (estimation du travail)	Manuel de maintenance de la machine	X		
Recherche des pièces de rechange dans le stock Actualiser l'inventaire	Pièces de rechange		X	
	Système de gestion de stock	X		X
Procéder à la réparation (après diagnostic), tester, remettre en route	Outillage de dépannage et de test		X	
Actualiser le dossier d'entretien machine. Réapprovisionner des pièces	Dossier d'entretien machine	X		X
	Système de gestion de stock	X		X

La maintenance corrective ne consiste pas nécessairement à effectuer la réparation complète d'un équipement défectueux (**maintenance curative**). En effet, une défaillance peut être partielle, et provoquer seulement l'altération d'un bien à accomplir la fonction requise, et non sa cessation (panne). D'autre part une réparation peut être parfois différée, pour diverses raisons.

C'est pourquoi une action peut être entreprise en vue de remettre l'équipement défaillant provisoirement en état de fonctionner. Il s'agit alors de dépannage, plutôt que de réparation, et l'action entreprise relève alors d'une opération de **maintenance palliative**.

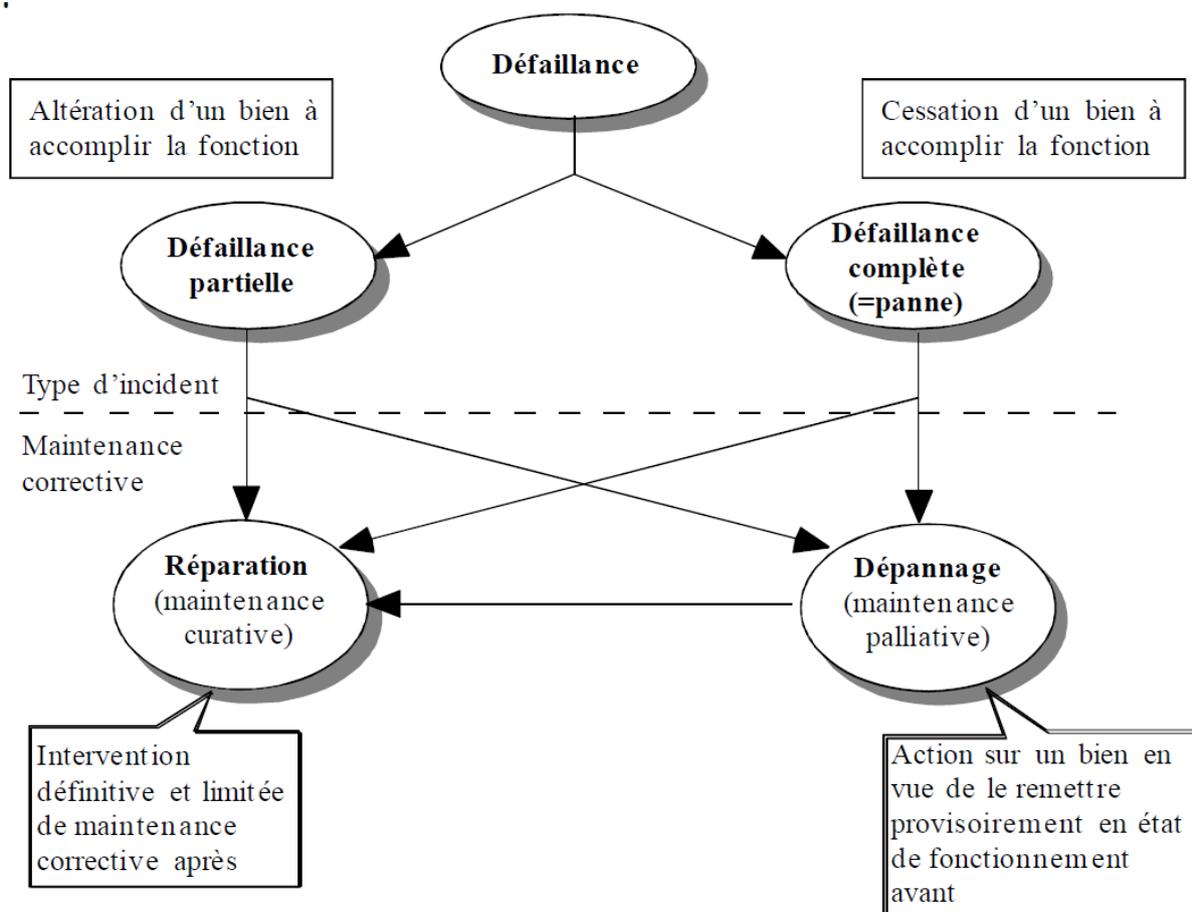


Figure 3.18 : Les différentes formes de la maintenance corrective (palliative et curative)

Bien que la maintenance préventive attire plus d'intérêt aux industriels, il est évident qu'on aura toujours des pannes donc on fait toujours recours à la maintenance corrective.

On a vu ici que la maintenance corrective peut être organisée d'une façon rationnelle et logique, certainement pas autant que la maintenance préventive, puisqu'elle ne peut pas être programmée à une date t comme le cas de la préventive.

4 CHOIX D'UNE POLITIQUE DE MAINTENANCE OPTIMISEE

La maintenance corrective engendre une perte importante d'heures de production, que pour être variable cela nécessite d'avoir des pièces de rechanges en stock, que les équipes de maintenance attendent la panne et sont rapidement disponible. En général ce type de gestion de la maintenance occasionne des coûts importants, diminue la disponibilité ainsi que la sécurité.

Par conséquent il doit être utilisé que lorsque d'autres méthodes préventives ne peuvent pas être appliquées, c'est en particulier le cas pour la prévention de panne dite «aléatoire» à taux de défaillance constant. Dans ce cas il est impératif de tout mettre en oeuvre pour réduire la conséquence de la défaillance, les règles de bonne maintenabilité doivent être utilisées (Figure 3.18 et Figure 3.19).

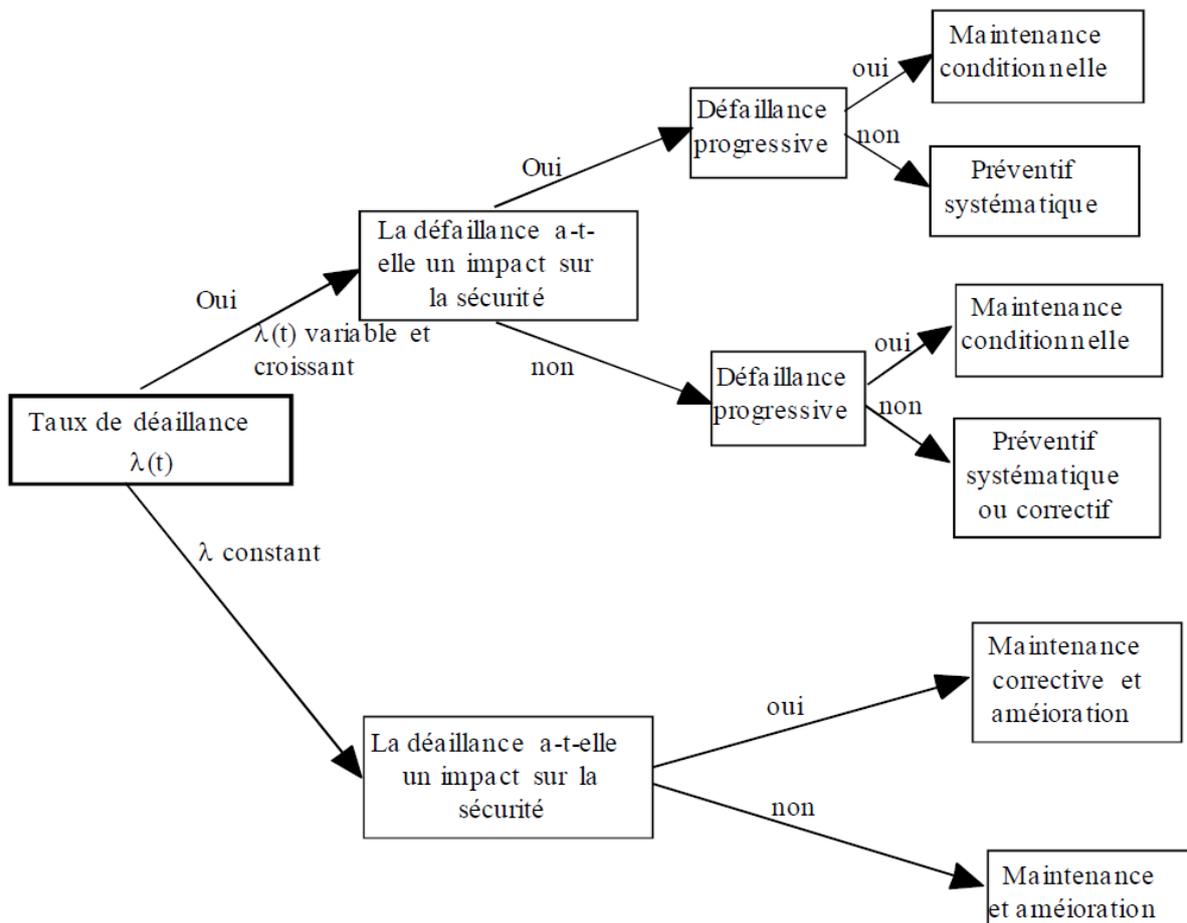


Figure 3.18: Arbre de décision d'une politique de maintenance

4.1. LES CRITERES D'OPTIMISATION

Il y'a plusieurs critères d'optimisation de la maintenance (sécurité, disponibilité, Maintenabilité, etc.). Toutefois, c'est souvent le critère coût qu'on cherche à optimiser en premier, à moins qu'il y ait d'autres priorités (sécurité) ;

$$C_{tm} = \text{Coût total de maintenance}$$

Ce coût intègre les dépenses liées au changement préventif, au stock de sécurité, à la logistique maintenance en général, et aussi les coûts induits par un dysfonctionnement, une panne, enfin toute conséquence de mauvaise maintenance (Voir paragraphe 2.1.1.).

De cette analyse, il se dégage certains critères qui peuvent aider à choisir une politique de maintenance convenable.

4.2. Politique de changement et critères :

On se rend compte que l'on ne pourra pas tout optimiser à la fois. Il y aura des choix et des décisions à prendre.

En effet, pour un élément donné, si on veut maximiser la fiabilité (Problème de sécurité), le temps moyen d'utilisation ne sera pas optimum.

Une politique (P) de maintenance pourra être choisie suivant un ou plusieurs critères à optimiser.

En final, on peut dire que :

$$P=f(Q, GdS, Lcc, CT, D, S)$$

Où :

S: critère de sécurité

CT: critère coût lié à la maintenance et à la non maintenance

Lcc : coût du cycle de vie,

D : critère disponibilité, Di et Ds

Q : qualité de produit sortant d'un système maintenu.

GdS : gestion des stocks de rechanges.

4.3. Etude de cas :

Cette étude a pour but de choisir une politique de maintenance parmi les 4 options proposées.

Voir Annexe 1 pour l'étude de ce cas