

**S.BENSAADA**

**D.FELLIACHI**

# ***LA MAINTENANCE***

## ***MAINTENANT***

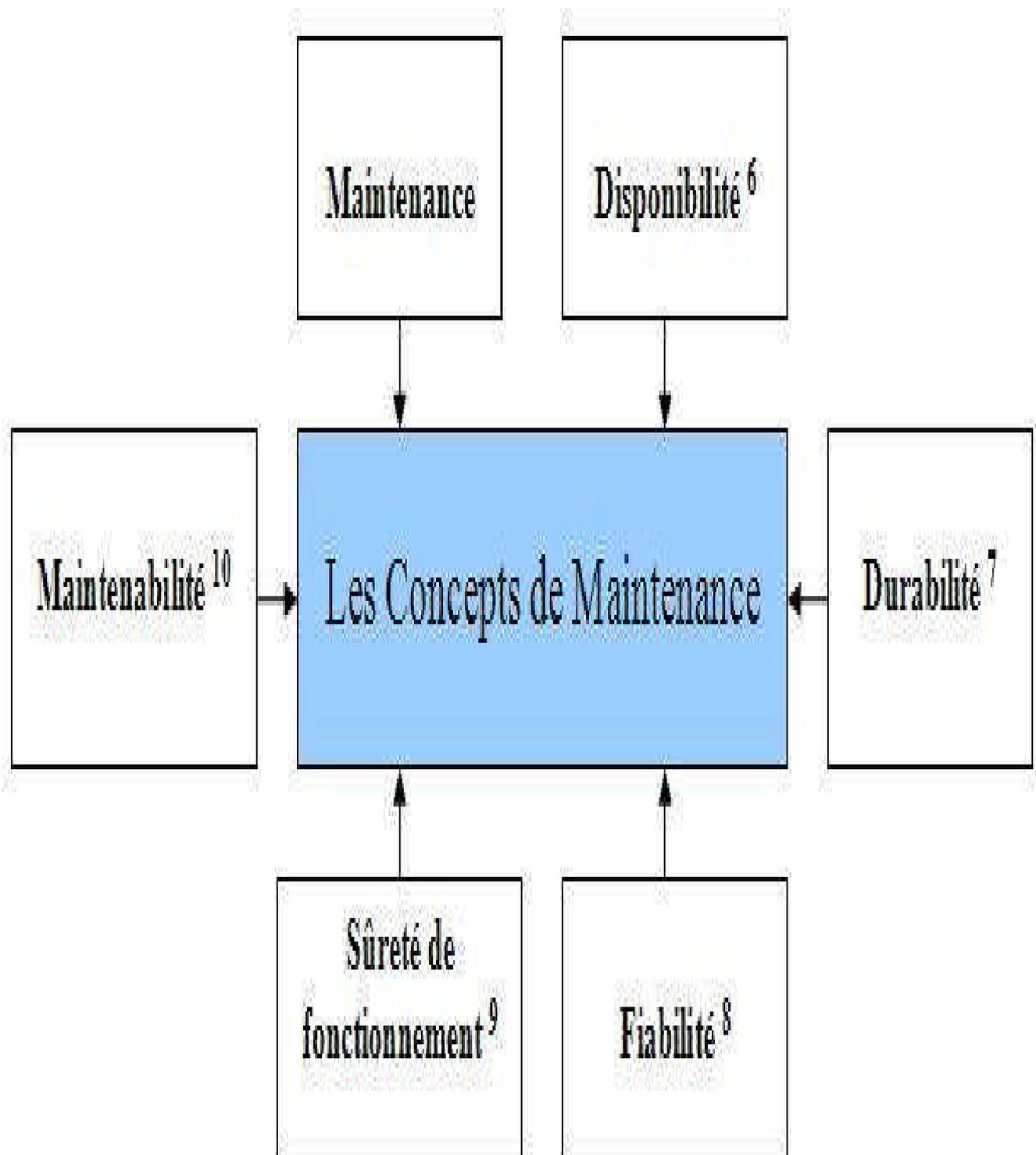


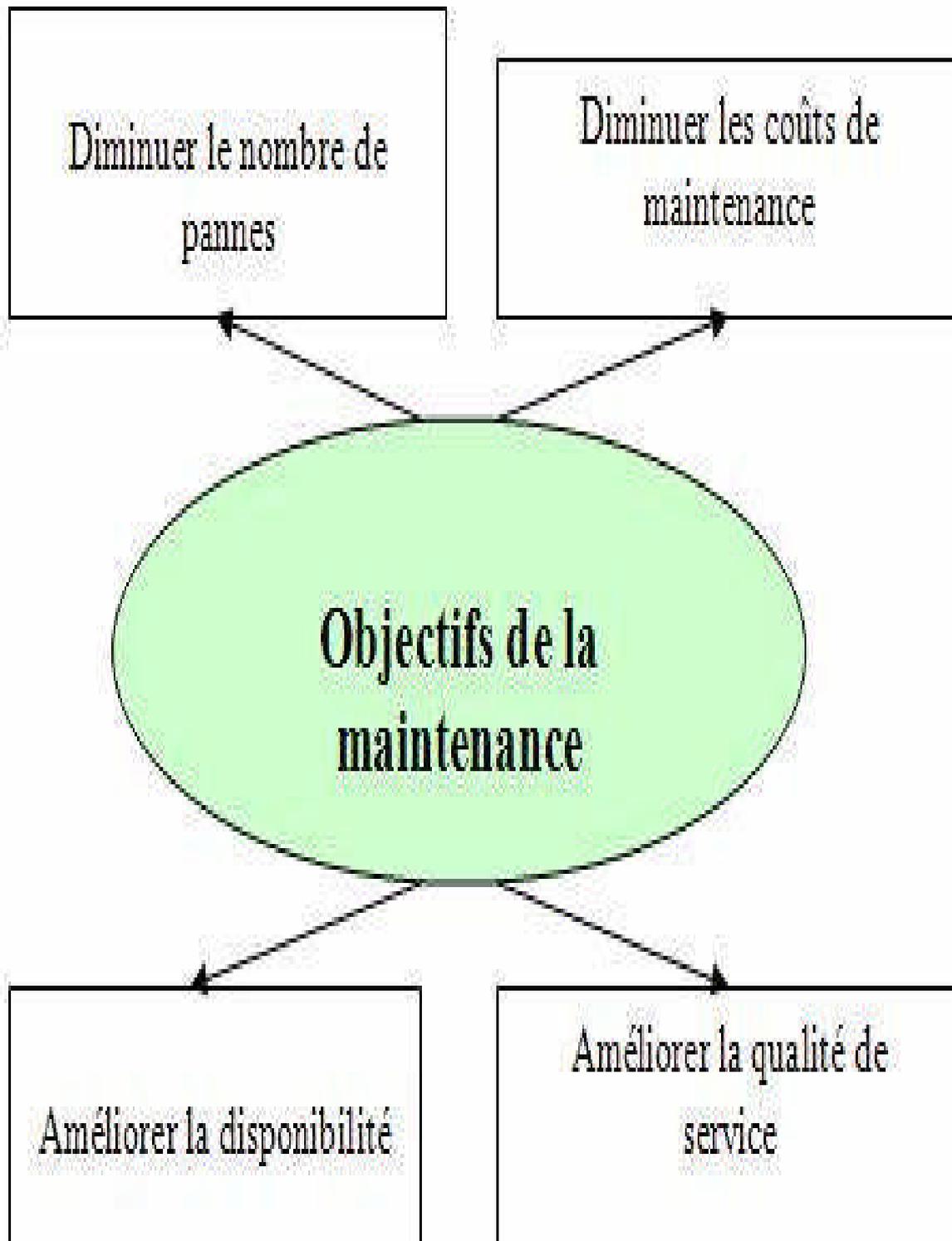
**S.BENSAADA**

**D.FELLIACHI**

***LA MAINTENANCE***

***MAINTENANT***





# LA MAINTENANCE MAINTENANT

## Sommaire

1. Généralités
2. Politiques de maintenance
3. La maintenance corrective
4. La maintenance préventive systématique
5. La maintenance préventive conditionnelle
6. La disponibilité et les concepts F.M.D.
7. La fiabilité
  - 7.1. Définition de la fiabilité
  - 7.2. Aspects probabilistes
  - 7.3. Définition théorique de la fiabilité
8. La maintenabilité
9. La disponibilité
10. Notions de FMD
11. Conclusion
12. Bibliographie

## **1. Généralités**

Le concept maintenance, considéré encore comme une fatalité éprouvée par les gestionnaires, est une approche ou plus une adéquation d'un ensemble d'activités visant à maintenir à un degré convenable les moyens de production à un prix optimum pour satisfaire la disponibilité et la sécurité des équipements.

La maintenance s'impose impérativement dans la fonction de la gestion de la production même et exige des décisions pour que ses objectifs, préalablement définis, soient atteints.

La maintenance est l'ensemble des opérations (dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration, ...) qui permettent de conserver le potentiel du matériel donc en état de stabilité pour assurer la continuité du matériel et la qualité de la production dans les conditions de sécurité. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global optimum.

La tendance scientifique que les technologues sont contraints de pratiquer pour maintenir à un degré appréciable et avancé la disponibilité quasi permanente des équipements industriels de production à des prix toniques s'oriente vers le défi zéro panne et zéro stock de pièces de rechange.

Généralement les gestionnaires de la fonction maintenance ne se rendent pas compte de sa portée et ne stimulent pas sa véritable signification par des traditions techniques souvent édictés qui nécessitent au contraire des actions à corriger avec un suivi rigoureux afin d'optimiser la fonction et tendre vers une forme de gestion pour satisfaire les prestations nécessaires et appréhender ou éviter un "gouffre financier".

La maintenance est beaucoup plus subie que gérée à proprement parler et ses coûts, dans les meilleurs cas, sont grossièrement calculés. Pourtant il suffit parfois d'un entretien périodique peu onéreux pour éviter un tel écueil quoique dompter les machines est une affaire sérieuse. Cependant il faudrait veiller à l'application de l'adage bien connu : "Mieux vaut prévenir que guérir".

Les coûts de la maintenance peuvent avoir toutes les proportions négatives possibles sans le souci et les efforts nécessaires pour palier à un niveau optimal qui, lui même est variable du fait que l'usure est une fonction exponentielle dans le temps. La non valorisation des actions de maintenance entraîne des coûts anarchiques.

A travers les notions élémentaires qui seront exposés ci-après il sera mis l'accent sur une mise au point pas même une sensibilisation parce que les gestionnaires ne manquent pas de pré-requis dans ce domaine.

Entretenir au jour le jour d'une manière aléatoire et l'optique des constructeurs et ou fournisseurs d'équipements industriels qui ne cessent d'avoir des relations commerciales étroites avec les pays en voie de développement jusqu'à leur préconiser des plans de développement et des achats d'équipements et de pièces selon un caractère purement commercial.

A l'époque où la maintenance se formalise lors de la conception même des équipements, les fournisseurs ne livrent que du matériel autre que spécial à l'exportation, ne répondant guère aux besoins et à toutes les conditions spécifiques du client, d'où la vulnérabilité des équipements acquis avec des cahiers de charges peu renseignés.

La pièce de rechange et la gestion des stocks demeure un volet indissociable de la fonction maintenance surtout dans les pays à environnement non industriel. Malgré que les techniques et les approches dans ce domaine sont très connus par les gestionnaire, la maîtrise des délais et coûts de gestion des stocks restent aléatoires.

Cependant il est très ambitieux d'arranger et harmoniser les outils de la maintenance souvent connue au sens de politiques, procédures, choix, analyses, coûts, prise de décisions, lesquels outils sont généralement mal perçus dont l'effet se répercute directement sur leur pratique.

A titre de rappel, les moyens au sens large et notions des techniques et approches sont disponibles en sciences appliquées sauf qu'il faudrait savoir les appliquer et les combiner au mieux dans l'espace et les circonstances propres exigés.

L'insistance sur le degré de savoir ou la génération d'une culture de maintenance pour ne pas profaner la fonction maintenance avec toutes les initiatives, formulations et analyses, dépend d'un facteur des plus remarquables et prépondérant dans ce domaine qui est le génie et l'intuition humains qui méritent d'être orientés.

Généraliser et banaliser l'outil informatique aux techniciens de maintenance et les initier aux méthodes prédictives suffiraient pour réaliser l'exploit et relever le double défi, lié à la notion de transfert de technologie et à la dépendance, de savoir et appliquer au vue des potentiels et amples qualifications acquises.

La notion importante qui se pose immédiatement est celle de l'adoption ou pas de la spécialisation fine et poussé pour ce corps de métier. L'assimilation unanime dans les pays expérimentés dans ce domaine préfèrent une qualification polyvalente et pluridisciplinaire pour que les "maintenanciers" soient des technologues. L'investissement dans le domaine de la formation se justifie largement étant donné la variété de nos équipements pour pouvoir capitaliser non seulement un transfert de technologie mais une maîtrise de la technologie.

Le degré d'efficacité en maintenance n'est appréciable et n'a de sens que si la succession des tâches, ordres, exécutions et retour (feed-back) est clairement définie dans l'espace et le temps avec injection de procédés scientifiques et d'évaluation tant financière que technique d'une manière systématique et permanente.

L'objectif premier attendu est l'optimisation de ses propres performances, c'est à dire qu'il faudrait essayer de corriger et rationaliser à chaque période ou exercice les résultats antérieurs des périodes précédentes jusqu'à pouvoir déboucher à ses propres normes que l'on pourra par la suite les comparer aux standards reconnus.

La rationalisation des coûts de maintenance ne doit pas rechercher seulement une maximisation du profit à court terme, mais la préservation de ce profit à long terme. Pour ce faire il y a lieu d'adopter une politique si non une stratégie d'entretien pour pouvoir penser maintenance et le matériel sera suivi par période de sa naissance et ses différentes maladies.

Il est vital de préciser ici l'essence de la notion maintenance tel que définie de nos jours dans les grandes écoles et universités spécialisées. Ces dernières préfèrent le terme technologie en remplacement du vocable maintenance. Dès lors on appellera plus les instituts de maintenance mais les instituts de technologie en préservant toujours les mêmes objectifs.

Ceci est dû à ce que les techniques de maintenance ont évoluées et par nécessité l'introduction de l'outil informatique (MAO : Maintenance Assistée par Ordinateur ou GMAO : Gestion Assistée par Ordinateur). De ce fait une grande capacité de traitement d'informations complexes qui aident aux analyses permettant en temps réel d'indiquer le comportement réel des machines.

Pour palier aux aléas de fonctionnement, la maintenance s'est développée pour arriver à rechercher un certain degré de disponibilité lequel a conduit à résoudre un grand nombre de problèmes qu'il a fallu d'abord identifier, formuler et traiter grâce à l'application du tissu scientifique.

En outre les diagnostics d'équipements industriels nécessitent des connaissances poussées des sciences fondamentales comme la mécanique, l'électricité, la régulation, l'acoustique, la physique, la chimie et les mathématiques appliquées en technologie pour pouvoir établir des modèles pratiques et suivre leur comportement telles que les modes vibratoires, les régimes de fonctionnement, les degrés d'usure, les bilans énergétiques, les systèmes thermodynamiques, les vieillissements et caractéristiques de fiabilité, ...

La pratique de la maintenance ne se limite pas uniquement à l'appréciation et l'observation traditionnelle par l'acceptation d'une maintenance classique mais à des règles scientifiques ou précisément des systèmes et comportements non aléatoires basés sur des simulations et modélisations de diagnostics à travers :

- les essais, test, mesures et contrôle de paramètres et ou d'équipements en fonctionnement
- l'analyse des comportements par comparaison et expérimentation en simulation et modélisation dynamiques
- l'usage des commandes numériques et traitement par MAO

Ce qui a donné naissance à une variante de maintenance maîtrisée et performante grâce à la technologie pour prétendre enfin vers le zéro panne par la maintenance prédictive ou conditionnelle.

## **2. Politiques de maintenance**

En dépit des différentes appellations et modes d'entretien classiques préconisés par les uns et les autres, deux formes de maintenance à retenir, celle curative et préventive pour pouvoir formuler les trois seuls types de maintenance que stipule la norme AFNOR NF X 60-010:

- A. la maintenance corrective
- B. la maintenance préventive systématique
- C. la maintenance préventive conditionnelle

Pratiquement tous les autres modes de maintenance ne seront que des sous classes de ces trois types principaux. Avant de donner les différentes définitions, l'exemple simple d'usure et de changement des plaquettes de frein d'un véhicule illustre clairement la configuration spécifique de chaque type de maintenance.

#### A. Maintenance corrective

Le conducteur ne remplace pas ses patins jusqu'à la perte totale de freinage par usure complète des garnitures de frein. A ce moment aléatoire, on est obligé de les remplacer sans pour autant savoir les conséquences sur les autres organes du système ou sur l'incident.

#### B. Maintenance préventive systématique

Selon l'expérience pour ne pas dire les statistiques, les patins de frein du véhicule devront être changés par exemple toutes les 20.000 kilomètres de fonctionnement avant d'arriver à l'usure complète et éviter la panne. Les garnitures de frein ne sont pas consommées en totalité et l'on tolère de rejeter un certain pourcentage qui aurait pu servir.

#### C. Maintenance préventive conditionnelle

Le système de freinage et spécialement les garnitures de frein sont contrôlées périodiquement ou continuellement à l'aide d'un système de mesure de l'état d'usure de l'épaisseur des garnitures en fonction du temps et des conditions de fonctionnement du véhicule, avec des seuils de tolérance ou d'alarme. A chaque instant les paramètres de mesure et ou contrôle montrent comment s'usent et se comportent les plaquettes.

Là le jugement du remplacement des patins est conditionné par l'état, en temps réel des garnitures, édicté par les paramètres donnés par le système de mesure. La consommation de l'épaisseur des garnitures est ni totale avec dégâts, ni minime avec perte d'épaisseur utilisable mais maximale tout en assurant la sécurité de ne pas avoir la panne.

### Tableau récapitulatif

MAINTENANCE		
CORRECTIVE	PREVENTIVE	
	SYSTEMATIQUE	CONDITIONNELLE
Effectuée après la panne	Effectuée à inter-valle régulier de façon systématique.	Effectuée en fonction de l'état du matériel

### 3. La maintenance corrective

Elle est appelée aussi maintenance fortuite, accidentelle ou curative. C'est l'action d'une maintenance consécutive à une panne. On attend la panne pour agir et l'entretien devient synonyme de dépannage ou de réparation. Il y a lieu d'intervenir rapidement parce que le besoin de la machine est urgent du fait qu'elle se trouve subitement arrêtée et que cet arrêt n'étant pas programmé.

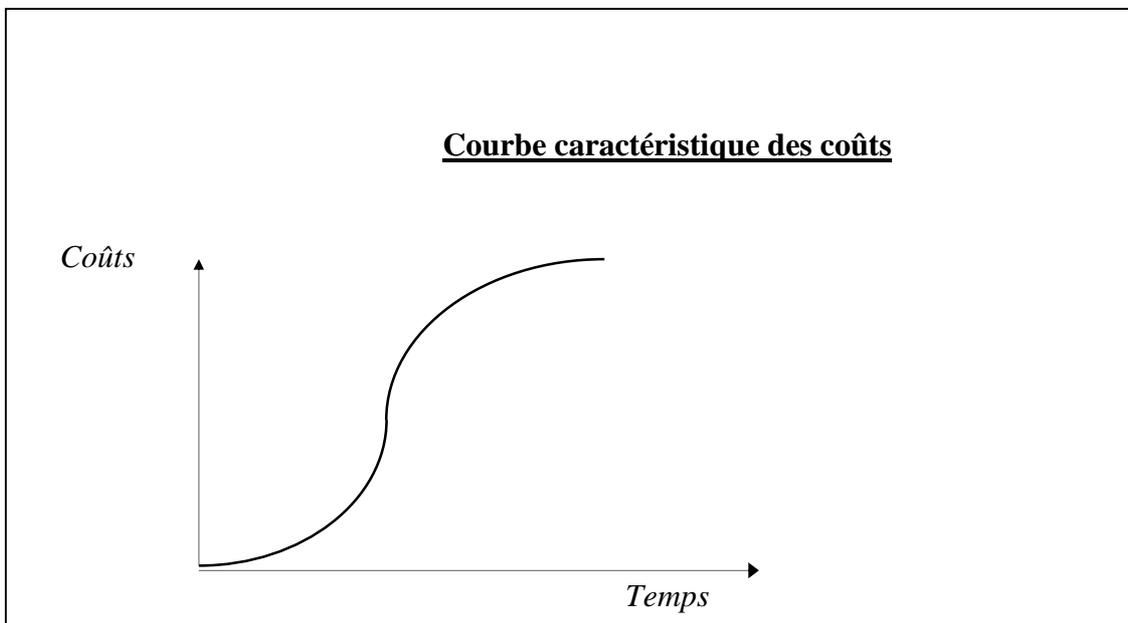
Il en résulte des détériorations profondes alors qu'un arrêt préalable le plus souvent aurait limité la panne en importance d'où les coûts sont conséquents d'autant plus que les coûts augmentent rapidement et d'une façon brutale avec l'âge des appareils.

C'est une politique de maintenance (dépannage et réparation) qui correspond à une attitude de réaction à des événements aléatoires et qui s'applique après la panne, donc qu'elle n'a pas été "pensée" puisque effectuée après défaillance.

Pour en diminuer les conséquences, on est conduit à :

- procéder à l'analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), méthode que nous exposons plus tard, permettant de mettre en évidence de façon prospective un certain nombre d'organes ou de machines critiques pour la sécurité ou la fiabilité d'un système après l'inventaire des défaillances possibles.
- Installer des éléments de secours par redondance de matériels
- utiliser des technologies plus fiables
- rechercher des méthodes de surveillance les mieux adaptées aux points névralgiques

La maintenance corrective devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines dites catalectiques, comme par exemple la rupture brusque d'une pièce mécanique ou le court circuit d'un système électrique. Hormis ce cas, ce type de maintenance sera réservé à du matériel peu coûteux, non stratégique pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité. La panne est un mal qu'il faudrait de moins en moins subir.



Les coûts augmentent de façon brutale avec l'âge des appareils.

#### **4. La maintenance préventive systématique**

La maintenance préventive est effectuée selon des critères prédéterminés dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien. On distingue deux cas de maintenance préventive, celle systématique et celle conditionnelle.

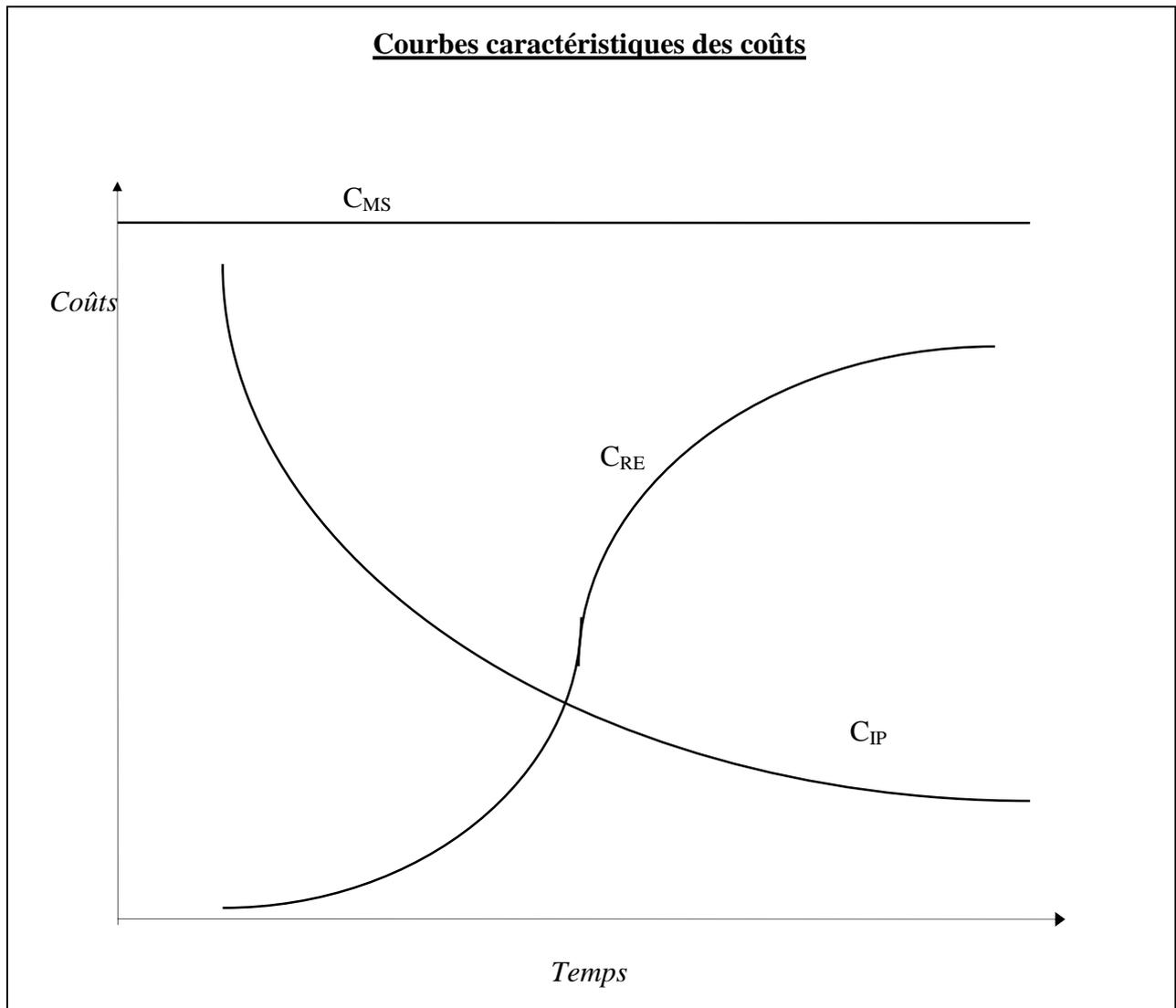
En maintenance systématique, la visite des équipements est dictée par des données statistiques à intervalles réguliers et fixes. Les éléments constitutifs des équipements étant renouvelés avant l'épuisement total de leur vie utile. L'intervention est provoquée avant l'avarie. Ces intervalles sont souvent déterminés statistiquement comme étant la période (à partir de l'état neuf ou rénové) à la fin de laquelle le taux de pannes cumulées n'excède pas les 2,5 % par prudence ou méconnaissance parfaite et précise des effets d'usure et comportement des machines.

Là on est conduit à changer ou à réparer des pièces qui auraient très bien pu fonctionner encore pendant un certain temps.

Dans une politique prévisionnelle bien adaptée, l'on ne subit pas la panne car elle est prévue, et le budget est donc la conséquence de prévisions calculées et prévues.

Le contrôle budgétaire reste un contrôle normal. Une fois que les choix sont faits au départ, donc rentabilisés, toute économie devient une dépense ou correspond à une mauvaise prévision.

Cependant ce type de maintenance est déjà mieux adapté pour les équipements vitaux de production que celle curative. Néanmoins le seuil de sécurité exigé est un seuil en dessous duquel on ne désire pas descendre et la multiplication intolérable des indisponibilités.



$C_{MS}$  : Coût de Maintenance Systématique

$C_{IP}$  : Coût Intrinsèque de la Prévention

$C_{RE}$  : Coût des Réparations Evitées

$$C_{IP} = C_{MS} - C_{RE}$$

Le tribut à payer pour assurer la disponibilité de l'outil de production diminue avec le temps lorsqu'on lui soustrait le coût des réparations évitées.

## **Avantages**

- le coût de chaque opération est prédéterminé et la gestion financière du service en est facilitée
- les opérations et les arrêts sont programmés en accord avec la production

## **Inconvénients**

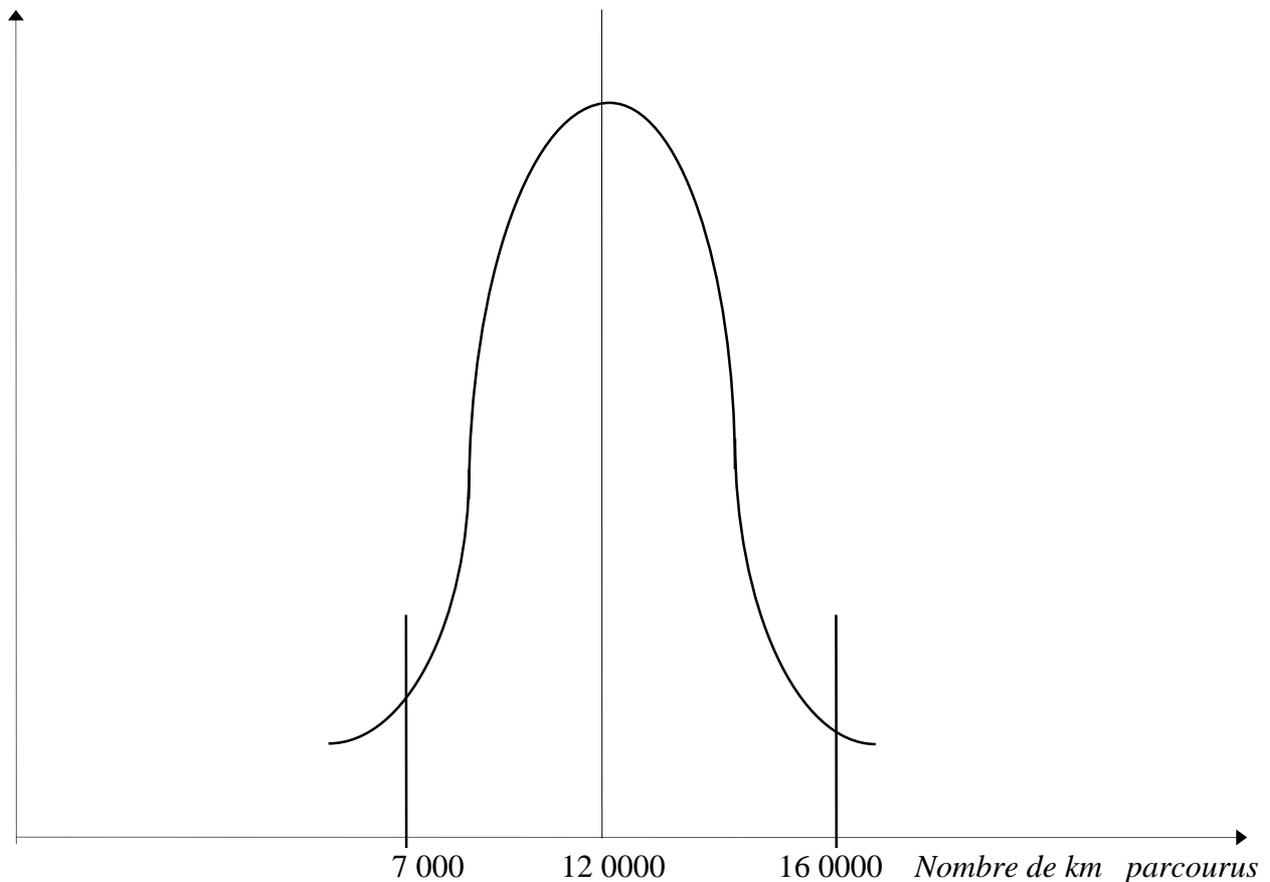
- le coût des opérations est élevé car la périodicité est calée sur la durée de vie d'un composant
- l'intervention est anticipée pour rester en phase avec d'autres arrêts
- le démontage même partiel d'un appareil incite aux changements de pièces par précaution
- la multitude des opérations de démontage accroît le risque d'introduction de nouvelles pannes dites "de jeunesse" ou "de rodage". La fiabilité des machines après remontage se trouve réduite ou fragilisée du fait d'erreurs humaines

## **Exemples**

### 1. Vidange d'huile d'un véhicule

Selon la courbe caractéristique du nombre de véhicules identiques d'un parc dont l'huile moteur atteint strictement (ni plus ni moins) un taux de dégradation nécessitant une vidange en fonction du nombre de kilomètres parcourus. Cette courbe est basée sur l'observation de la moyenne et de l'écart type qui servent le plus souvent de référence pour déterminer la périodicité des opérations en maintenance systématique.

*Nombre de véhicules nécessitant  
au sens strict une vidange*



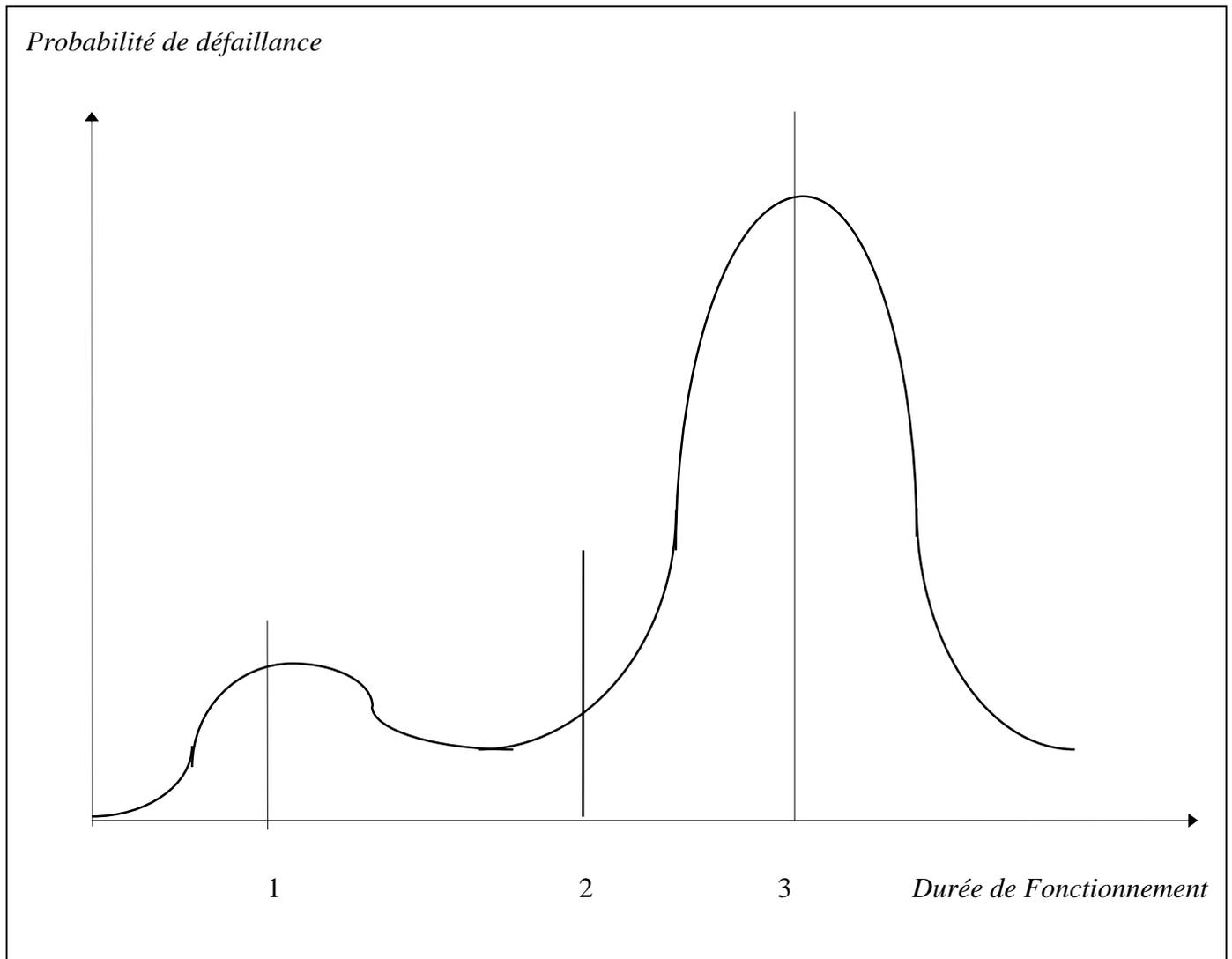
Supposons que le constructeur fixe la vidange à 7000 km alors qu'on constate bien que :

- seulement 2,5 % des véhicules en ont réellement besoin à 7000 km.
- la plus part des véhicules auraient pu atteindre 12 000 km.
- Quelques uns même auraient pu aller jusqu'à 16 000 km.

Et pourtant par sécurité, dans ce type de maintenance, tous les véhicules seront vidangés à 7000 km.

## 2. Le remplacement systématique de roulement

De même sur la courbe de probabilité des défaillances d'un roulement en fonction de la durée de fonctionnement selon la courbe ci-après :



1. Panne de jeunesse
2. Périodicité de remplacement
3. Vie moyenne

On s'aperçoit que la périodicité de remplacement étant déterminée pour que le risque de défaillance soit très faible. De nombreux roulements ou autres pièces qui auraient pu tourner beaucoup plus longtemps sont gaspillées et l'on jette en définitive du matériel en bon état.

Il est important de conclure que l'intérêt de la maintenance systématique probant par rapport à celle corrective sur les coûts de production lui ont valu de belles années mais aujourd'hui :

- le remplacement systématique du matériel doit disparaître progressivement sauf pour du petit matériel peu coûteux (graissage, filtres, joints, petites pièces d'usure, ...).
- l'auscultation périodique, aujourd'hui encore très répandue, doit céder la place à des méthodes de maintenance conditionnelle.

## **5. La maintenance préventive conditionnelle**

La maintenance conditionnelle dite aussi prédictive est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé par un auto-diagnostic, une information d'un capteur, d'une mesure d'une usure ou un autre outil révélateur de l'état de dégradation actuel et prématuré du bien.

L'intervention est conditionnée non pas par un échéancier mais par la mesure d'un paramètre de fonctionnement représentatif de l'usure ou de la dégradation de différents composants. Somme toute il s'agit ici de prévenir la dégradation même par une auscultation continue, périodique ou programmée. Les équipements vitaux d'une installation exigent l'utilisation au maximum la vie utile des éléments constitutifs.

La recherche d'un moyen pour parfaire un double défi :

- augmenter la productivité par une disponibilité accrue des moyens de production
- ne pas entraîner une inflation du budget de maintenance

a conduit à l'approche par la maintenance conditionnelle qui permet sans démontage ou arrêt de production de prévenir, d'en amoindrir les effets et d'en programmer la réparation en dehors des pointes de production.

Tout l'intérêt est porté à la surveillance de paramètres et ses corollaires par l'analyse de tendance et détection d'événements avec l'utilisation indispensable et exigée de l'informatique ou la gestion de la maintenance assistée par ordinateur.

Le fait de pouvoir détecter rapidement les anomalies, sans même démonter l'appareil, ainsi que pouvoir prévenir la panne et en prévoir la réparation le plus tard possible, en fonction des impératifs de production, ce qui fait de la maintenance conditionnelle une technique efficace permettant une augmentation perceptible de la productivité.

En d'autres termes, l'intervention n'aura lieu que si nécessaire en établissant au préalable un diagnostic avant de programmer la réparation.

La pratique de la maintenance conditionnelle consiste à ne changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure mettant en cause à brève échéance ses performances et comporte trois phases :

1. la détection du défaut qui se développe
2. l'établissement d'un diagnostic
3. l'analyse de la tendance

#### 1. la détection du défaut qui se développe

A la mise en route de chaque équipement, les principales caractéristiques de base des appareils sont enregistrées notamment la signature vibratoire (si le paramètre vibratoire s'avère être un paramètre intéressant de surveillance comme par exemple pour les machines tournantes) et les divers paramètres de fonctionnement (température, usure, performances, ...).

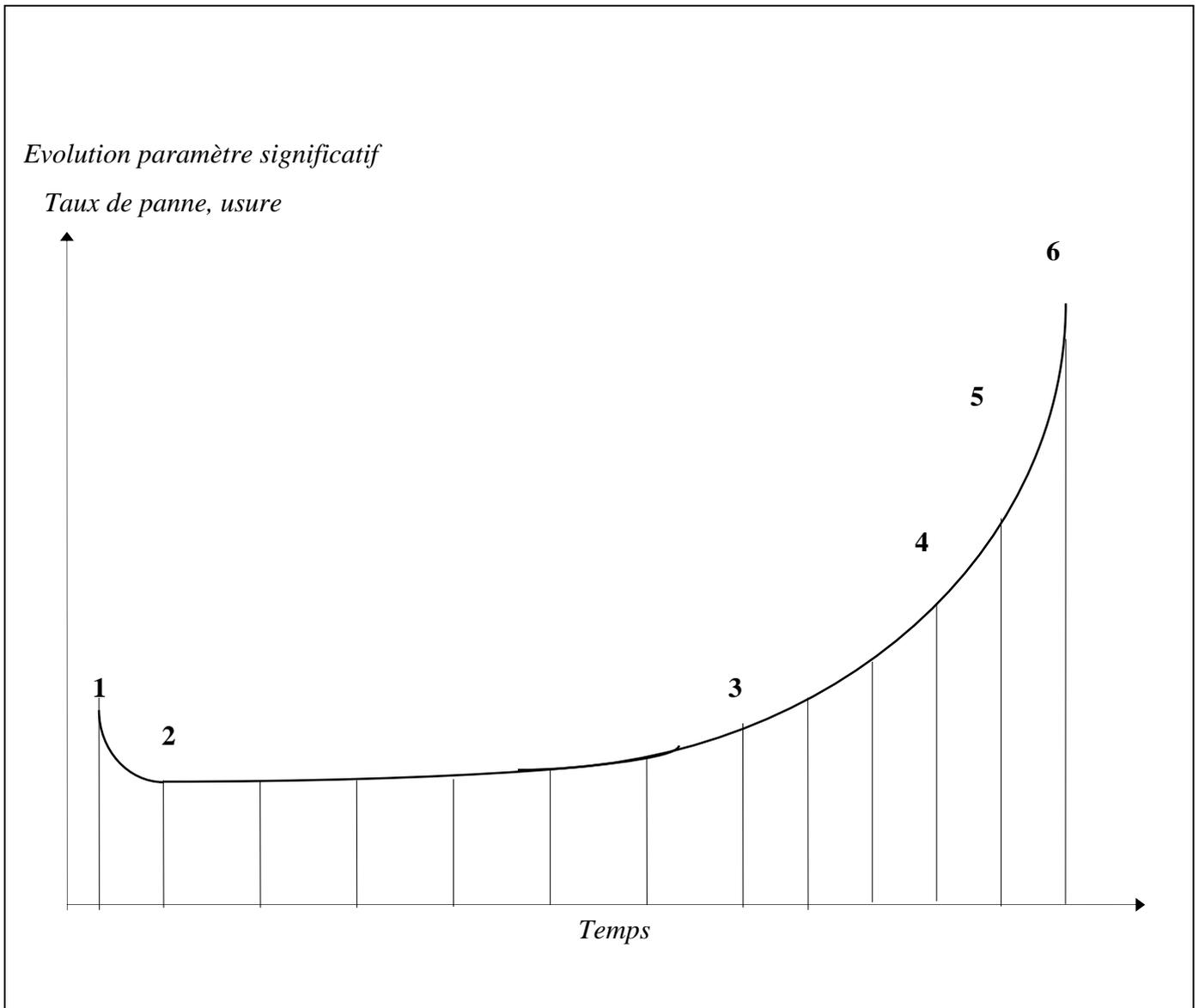
Ces caractéristiques ou signatures, serviront de référence pour suivre, par comparaison, l'évolution d'éventuels défauts ultérieurs.

#### 2. l'établissement d'un diagnostic

Dès qu'une anomalie est détectée par les outils caractéristiques, au sens d'analyse de paramètres, un diagnostic concernant l'origine et la gravité du défaut constaté sera établie.

### 3. l'analyse de la tendance

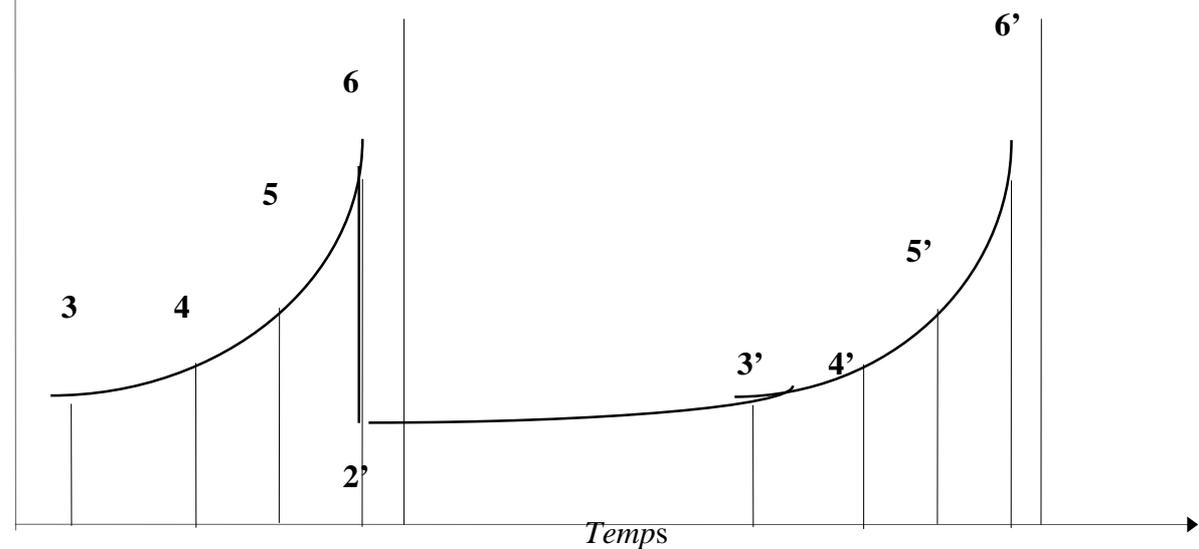
L'établissement du diagnostic permet de préjuger du temps dont on dispose avant la panne pour laisser l'appareil fonctionner mais sous surveillance renforcée et prévoir d'ores et déjà la réparation.



1. Mise en marche de l'équipement, machine neuve ou réparée
- 1 à 2 : Période de jeunesse ou rodage
- 2 à 3 : Niveau normal de bon fonctionnement, partie linéaire avec mesures périodiques normales
3. Le défaut s'annonce ou la détection du défaut donne le seuil minimum d'alarme
- 3 à 4 : La durée entre les mesures diminue et le défaut se développe selon une courbe non linéaire
4. Diagnostic du défaut, l'avertissement est donné, il y a lieu de programmer la réparation
- 4 à 5 : Surveillance accrue et décision de procéder à la réparation
5. Maintenance effectuée pour rétablir le niveau de tendance normal de la courbe de fonctionnement similaire à la partie 2 à 3 et un nouveau cycle reprend
- 5 à 6 : Tendence extrapolée à éviter
6. Panne inévitable qui représente le seuil maximum

*Evolution paramètre significatif*

*Taux de panne, usure*



5 à 2' : Signifie que la maintenance a été effectuée et que la courbe a repris son allure de bon fonctionnement. La prochaine maintenance sera effectuée probablement au point 5'. Les cycles suivants sont similaires.

### **Bilan financier**

Il faudrait évaluer le rapport coût par rapport au bénéfice des opérations nécessaires à la mise en place d'une politique de maintenance conditionnelle spécifiquement adaptée à son outil de production. Les propos ci-dessous mettent en lumière quelques uns des facteurs essentiels à considérer notamment :

#### Coûts

- recherches initiales, choix des points de surveillance et établissement des limites
- choix et achat de l'instrumentation
- formation du personnel pour les mesures et méthodes de suivi
- formation des ingénieurs pour l'exploitation des mesures

#### Economies

- accroissement du temps moyen entre chaque révision (augmentation de la longévité du matériel) c'est à dire productivité supérieure et coût de maintenance réduit
- élimination de fait des pannes inattendues donc fiabilité et productivité supérieures
- élimination des dommages dérivés par simple défaut
- élimination de gaspillage de pièces de rechange en exploitant au maximum les composant de leur vie utile
- réduction des stocks des pièces de rechange en prévoyant les besoins réels
- réduction des arrêts de production
- durée de réparation réduite puisque l'action nécessaire est planifiée
- une sécurité accrue
- la crédibilité des services entretien par objectifs et la maîtrise de la technologie

## **Les outils de la maintenance conditionnelle**

Les éléments ou outils nécessaires à l'appréciation du degré d'usure pour approcher la loi de survie des équipements en maintenance prédictive doivent faire l'objet d'une application méthodologique et précise.

Parmi ces outils nous énumérons particulièrement :

- la mesure et analyse des vibrations
- l'analyse des caractéristiques des huiles
- l'analyse stroboscopique pour l'étude des mouvements
- la détection des ultrasons pour la localisation des fuites
- les examens endoscopiques pour les cylindres de compresseurs, ailettes et engrenages
- les mesures des défauts de roulements et paliers
- la surveillance des niveaux de bruits acoustiques
- la dissipation d'énergie par thermométrie ou thermographie par infrarouge. Cette évaluation est un auxiliaire précieux dans les domaines aussi divers que l'échauffement de pièces mécaniques, l'état d'usure, la mise en évidence de défauts électriques. Comme beaucoup d'autres techniques d'examen des états de surface ou de structure des matériaux, les techniques thermiques dressent plus un état des lieux des défauts ou de dégâts que d'en donner une estimation quantitative.

La maintenance prévisionnelle et spécialement celle conditionnelle a pour objectifs de prévoir, déclencher et ajuster les opérations de maintenance selon des critères préétablis selon la causalité diagnostic et pronostic. Cela nécessite forcément :

- l'estimation de l'évolution dans le temps du comportement dynamique des machines et de leurs éventuels dysfonctionnement
- la comparaison à des modèles ou tendances d'usure
- l'évaluation des espérances d'utilisation avant réparation

Il est à remarquer qu'établir le comportement type moyen d'une machine et recenser ses dégradations les plus probables est un emploi difficile qui ne peut être mené à bien qu'en associant les avis du constructeur, l'exploitation systématique des incidents et expertises et l'usage des statistiques et normes relatives à ce type de machine.

## Limites de la maintenance conditionnelle

### A. Techniques

L'efficacité d'une maintenance conditionnelle est subordonnée à l'efficacité et à la fiabilité des paramètres de mesure qui la caractérisent. Elle sera donc réservée aux matériels dont l'évolution d'éventuels défauts est facilement détectable et mesurable.

### B. Economiques

Le choix du type de maintenance devra toujours résulter d'un compromis financier et technique qui est la recherche de plus de fiabilité possible au plus juste coût. Dans ce cas il va falloir quantifier en permanence les charges de la maintenance et n'appliquer la maintenance conditionnelle que si l'inéquation suivante est respectée : **Avantage de la maintenance conditionnelle > Coûts de la maintenance systématique ou corrective.**

**Algorithme du choix du type de maintenance**

La panne a-t-elle une incidence sur la production ou sur la sécurité ?	Non	Le coût de panne est-il acceptable ?	Oui	Maintenance Corrective
		Non		
	Oui	Est-il possible d'utiliser des techniques de surveillance ?	Non	Maintenance Systématique
		Oui		
		L'utilisation de ces techniques est-elle rentable ?	Non	Maintenance Systématique
			Oui	Maintenance Conditionnelle

### Synoptique récapitulatif

Type	Corrective	Systématique	Conditionnelle
Conditions d'intervention	Fonctionnement jusqu'à la rupture	Basée sur l'estimation de la durée de vie moyenne du composant	intervention conditionnée par la dérive d'un paramètre significatif
Aide au diagnostic	Les outils utilisés ne servent qu'à déterminer la cause de la panne	Ajuster les échéanciers en fonction des états d'usure constatés	Analyse de l'évolution des paramètres de fonctionnement et le diagnostic sur l'origine du défaut
Applications	Machines doublées, panne acceptable et imprévisible	Graissage, petites pièces et impossibilité d'obtenir des mesures fiables	Machines stratégiques, à problèmes et risque panne dangereuse
Durée de vie d'un organe	Rupture	Remplacement	Détection de défaut, analyse de tendance et réparation programmée

## **6. La disponibilité et les concepts F.M.D.**

Le concepteur d'équipement est fréquemment une société qui n'exploite pas les installations qu'elle conçoit. Elle aura de ce fait forcément des difficultés à tenir compte dans sa conception des conditions d'exploitation particulières d'exploitation des clients. Généralement le concepteur attache peu d'attention à la maintenabilité des installations.

Les cahiers des charges ainsi que les contrats devraient impérativement mentionner outre les objectifs de production, les critères fondamentaux de la maintenance en partant du principe général que toute installation destinée à l'exploitation doit être forcément entretenue.

La sûreté de fonctionnement d'une machine en tenant compte de l'aspect sécurité et les critères visant à éviter un entretien fréquent, difficile et coûteux se résument en trois points connus sous la notion F.M.D. que le concepteur devrait tenir compte lors des études d'engineering:

- A. Fiabilité
- B. Maintenabilité
- C. Disponibilité
- D.

## **7. La fiabilité**

On ne saurait absorber l'entretien des équipements et les questions qui lui sont liées sans évoquer et clarifier le concept de fiabilité.

### **7.1. Définition de la fiabilité**

C'est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise ou degré de confiance que l'on accorde dans des conditions données pendant une durée donnée.

La confiance s'exprime par une probabilité de succès. Inversement, on pourrait dire qu'elle vise à connaître la probabilité d'échecs et par voie de conséquence, les précautions et les sécurités dont un matériel doit être l'objet.

La fiabilité est une caractéristique d'un dispositif exprimé par la probabilité qu'il accomplisse une fonction dans des conditions données pendant un temps donné. Elle se caractérise donc par quatre concepts :

#### A. La probabilité

Une probabilité se définit par le rapport entre le nombre de cas favorables et le nombre de cas possibles concernant la réalisation d'un événement. Dans le cas de la fiabilité, la probabilité exprimant les chances de réussite.

#### B. L'accomplissement d'une fonction

Le dispositif que l'on étudie du point de vue de la fiabilité devra être dans un état tel qu'il lui permet d'accomplir la fonction requise d'une manière satisfaisante. Ceci implique un certain niveau de performances en deçà desquelles le dispositif est considéré comme défaillant.

#### C. Les conditions données

Les conditions sont les contraintes physiques, chimiques, électriques et mécaniques subies par le dispositif du fait de son environnement.

#### D. Le temps

C'est le temps exprimé au sens large. Ce sera bien souvent en fait un nombre de cycles ou caractéristique qui exprime la durée de vie.

## 7.2. Aspects probabilistes

Le mot fiabilité recouvre deux concepts majeurs celui de sécurité et celui de compétitivité. Attribuer une probabilité de bon fonctionnement à un équipement ou à un système permet de choisir les meilleures solutions technologiques, les meilleures procédures d'approvisionnement, de fabrication, d'utilisation et de maintenance.

La fiabilité s'est imposée pour répondre à une question complexe liée au coefficient ou facteur de sécurité.

Traditionnellement, on surdimensionne les pièces et l'on arrive parfois à des poids et encombrements exagérés avec des prix prohibitifs. Dans ce cas les appréciations et bornes du coefficient de sécurité deviennent superflues.

Alors que la fiabilité sait apprécier le comportement du composant parce qu'il possède une loi de mortalité ou loi de dégradation et peut donc le dimensionner en conséquence.

Les technologues assurent la solidité d'une réalisation par le facteur de sécurité dit parfois facteur d'ignorance S qui est défini comme étant le rapport de la résistance à la contrainte par rapport à la contrainte appliquée :

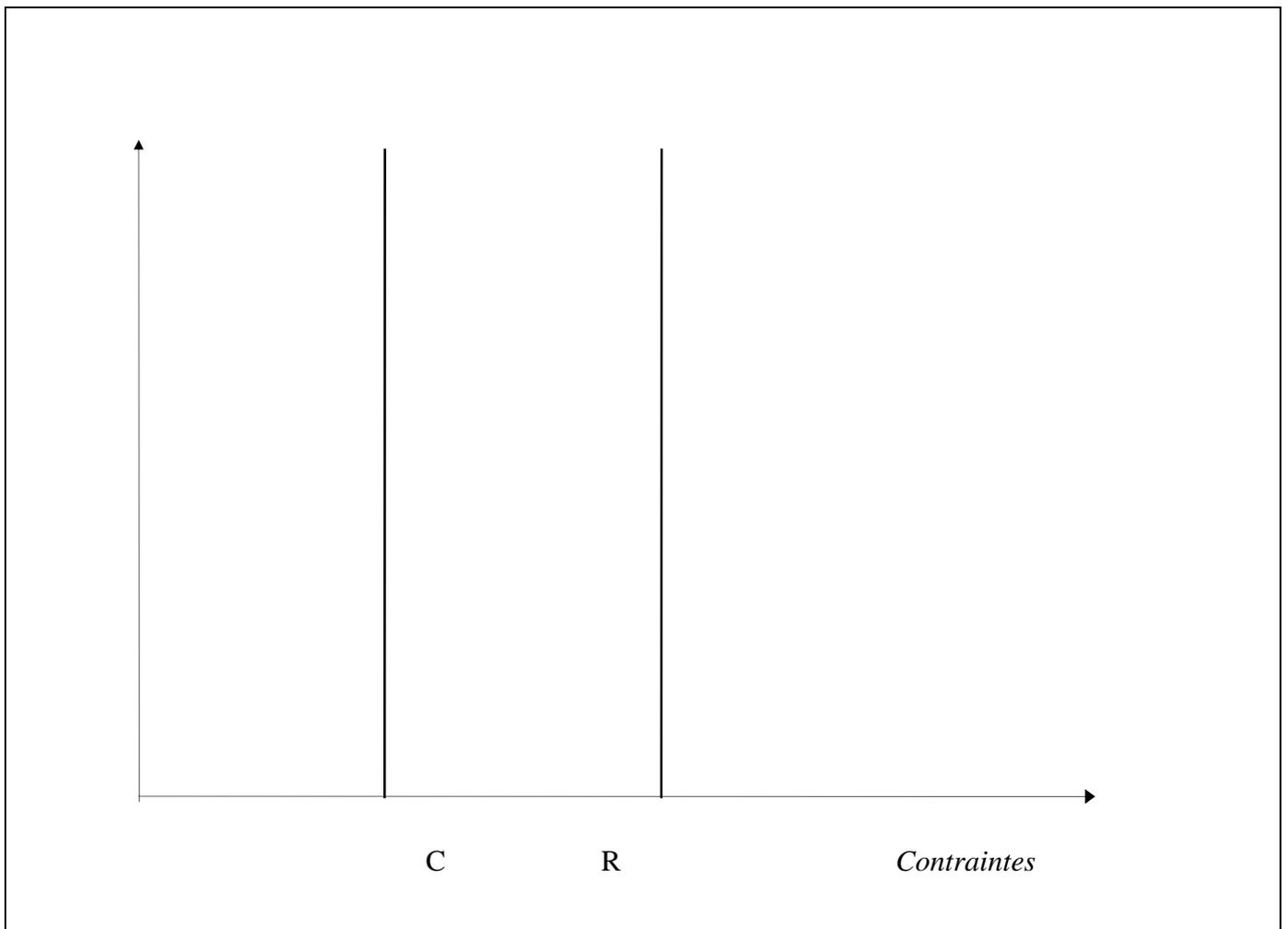
$$S = \frac{\text{Résistance à la contrainte} \quad \mathbf{R}}{\text{Contrainte appliquée} \quad \mathbf{C}} = \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{C}}$$

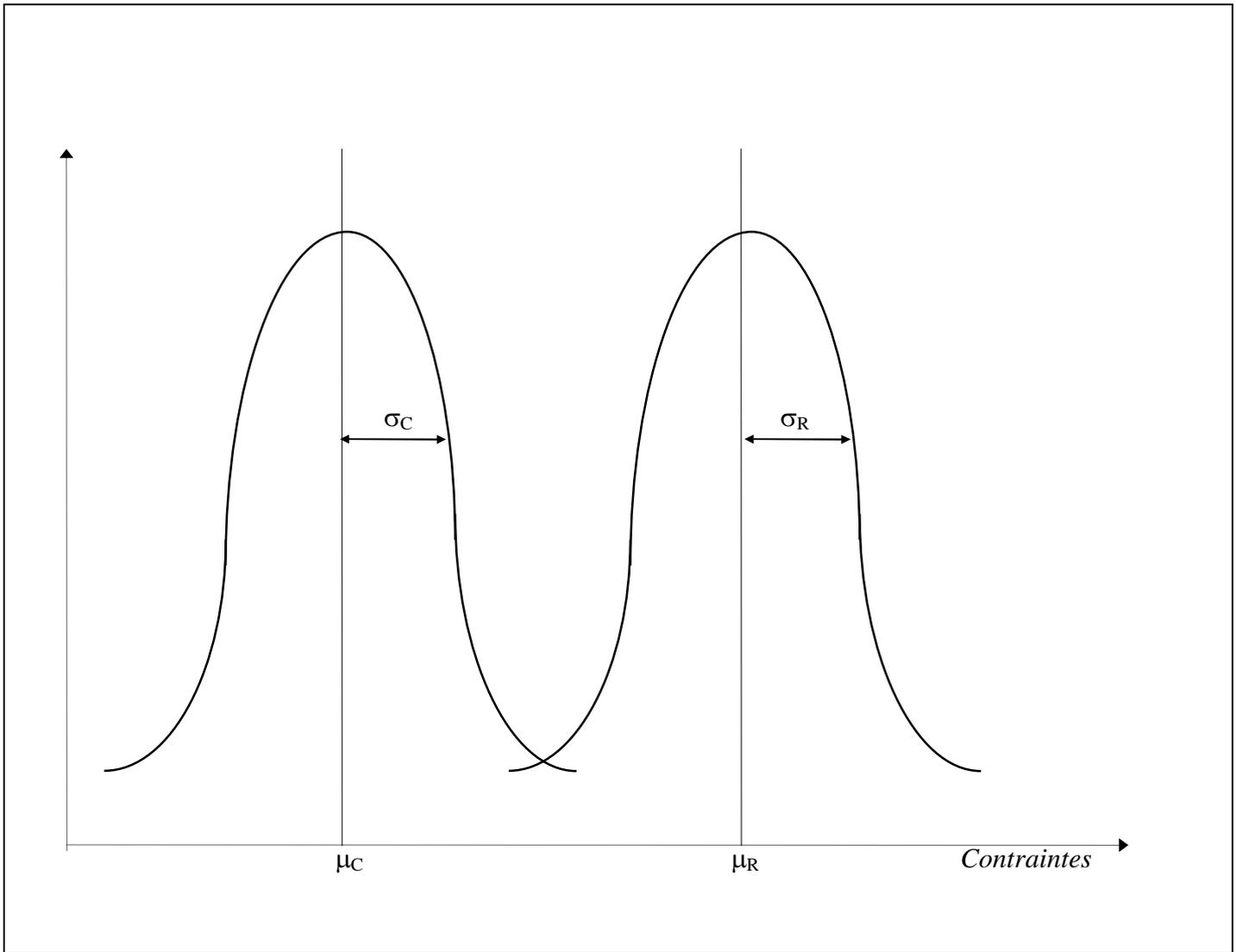
R est prise généralement comme la limite élastique

Cette technique peut générer des erreurs car en effet R est supposée une valeur moyenne (Figure 1), alors qu'en réalité du fait des hétérogénéités de la matière, de l'imprécision sur les dimensions, des états de surfaces, ..

La valeur de cette résistance n'est pas déterministe du fait des différents facteurs de variabilité et elle peut être représentée par une distribution statistique.

Il en est de même de la contrainte appliquée qui peut fluctuer aussi suivant la mission ou l'environnement.





$\mu_C$  et  $\mu_R$  représentent la moyenne de la contrainte et  $\sigma_C$  et  $\sigma_R$  leur écart type

Le coefficient extrême de sécurité devient :

$$S = \frac{R \text{ min.}}{C \text{ max.}}$$

ou sous forme :

$$S = \frac{\mu_R - K \sigma_R}{\mu_C - K \sigma_C}$$

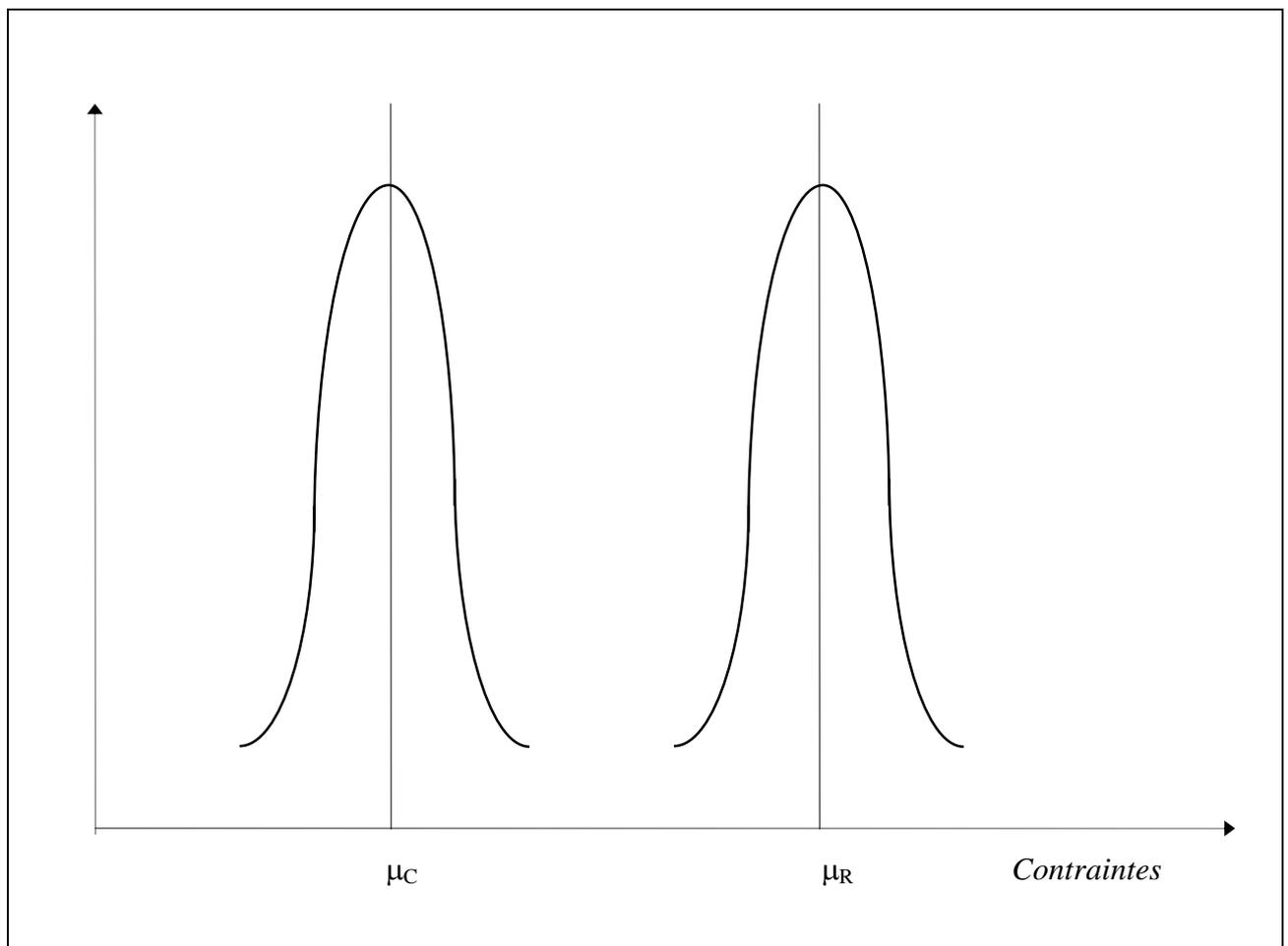
où  $K$  est un facteur compris entre 3 et 6 suivant le type de matériel. Cependant pour une même valeur du coefficient de sécurité  $S$  correspondent toute une diversité de fiabilité que nous définirons comme suit :

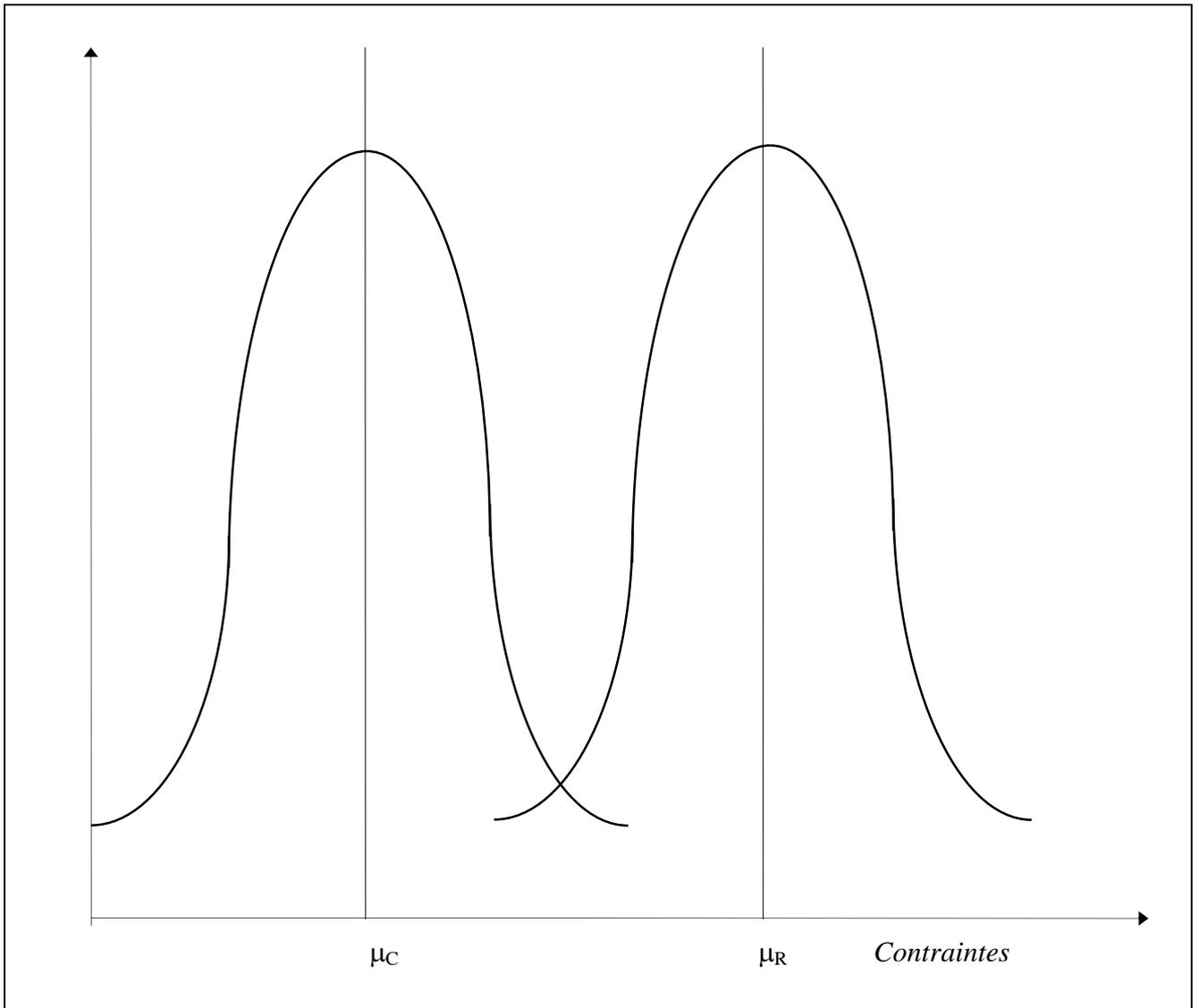
### **La probabilité pour que $R$ soit supérieur à $C$**

Etant donné un coefficient de sécurité, il existe trois possibilités de le maintenir tout en faisant varier fortement la fiabilité.

#### **A. Premier cas**

Les moyennes de la distribution de la contrainte et de la résistance peuvent être figées et les écarts types variables. Ceci est illustré par les figures 3 et 4 où le coefficient de sécurité  $S$  est maintenu égal à 2.





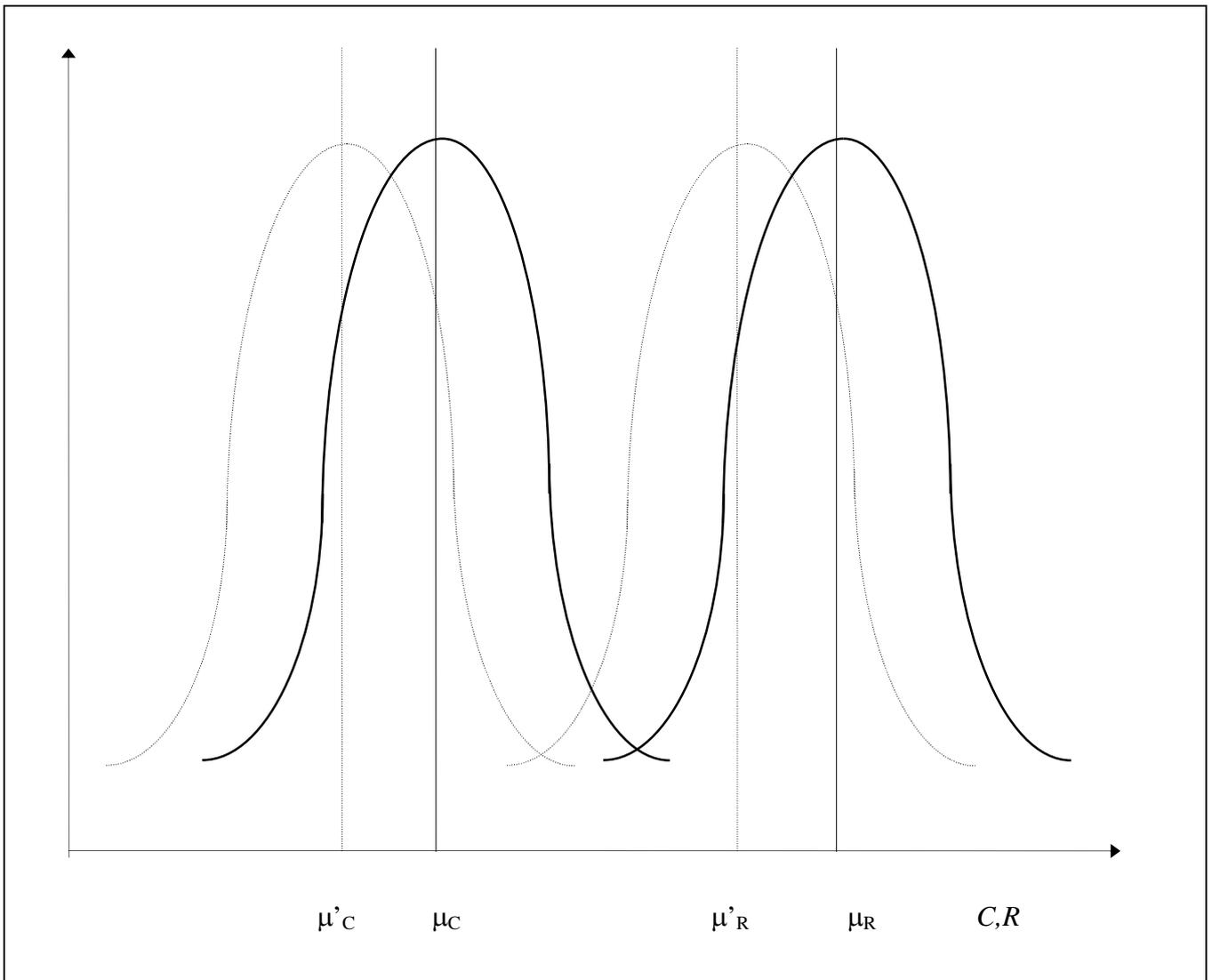
La figure ci dessus fait apparaître un recouvrement des distributions beaucoup plus sensible que sur la figure précédente car les dispersions des distributions sont plus importantes.

### B. Deuxième cas

La moyenne de la contrainte et celle de la résistance sont changées dans la même proportion tout en maintenant les écarts types. Ceci fait que le coefficient de sécurité reste le même :

$$S = \frac{\mu_R}{\mu_C} = \frac{K\mu_R}{K\mu_C} = \frac{\mu'_R}{\mu'_C}$$

Avec le même coefficient de sécurité avec  $K > 1$ , la probabilité de défaillance est substantiellement inférieure à celle obtenue pour  $K < 1$ , tel que schématisé ci-dessous.



### C. Troisième cas

Il est clair qu'il est possible de changer les deux moyennes et écarts types tout en gardant constant le coefficient de sécurité. La probabilité de défaillance et en retour la fiabilité varieront d'une valeur relativement faible sous l'effet de ces variations tandis que le coefficient de sécurité reste lui même.

C'est donc un calcul de probabilité qui permettra d'associer à un facteur de sécurité S une fiabilité, c'est à dire la probabilité pour que R soit supérieur à C.

### 7.3. Définition théorique

La fiabilité représente au bout du temps est la proportion de pièces d'un lot donné encore en fonctionnement au temps t ou la probabilité qu'un équipement fonctionne encore à t.

$$\text{Soit : } R(t) = \frac{N(t)}{N_0} \quad \text{où :}$$

N(t) : nombre de pièces en fonctionnement à t

N<sub>0</sub> : nombre de pièces en fonctionnement à t<sub>0</sub>

La probabilité de non fonctionnement F(t) sera de la forme :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - N(t)}{N_0}$$

On définit aussi un paramètre de fiabilité que l'on appelle taux de défaillance.

Si l'on dérive F(t) par rapport au temps, on obtient une fonction que l'on désigne par f(t) :

$$f(t) = \frac{-1}{N_0} \cdot \frac{dN(t)}{dt}$$

ou vitesse instantanée d'arrivée des pannes

En divisant par R (t) la fonction f (t), on obtient :

$$\frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-1}{N_0} \cdot \frac{dN(t)}{N(t) dt}$$

$$\frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-1}{N(t)} \cdot \frac{dN(t)}{dt} = \lambda(t) *$$

\* Par définition,  $\lambda(t)$  est la probabilité conditionnelle de défaillance dans l'intervalle de temps (t, t + dt).

La fonction  $\lambda(t)$  est la proportion de pièces défectueuses par unité de temps.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt}$$

$$\lambda(t) dt = \frac{dR(t)}{R(t)}$$

En intégrant, on trouve finalement :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$$

On utilise très souvent en maintenance une autre notion la MTBF ou Moyenne de Temps de Bon Fonctionnement (Mean Time Between Failures) et on l'exprime sous la forme :

$$MTBF = \int_0^t R(t) dt$$

ou temps moyen jusqu'à la première défaillance

Dans le cas où  $\lambda(t)$  est constant, quoique en technologie  $\lambda$  constant n'a pas de sens, la MTBF prend la forme :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Le taux de panne désigné par  $\lambda$  est donc égal à l'inverse de la MTBF. C'est le nombre de pannes par heures de fonctionnement. Par exemple si  $\lambda = 10^{-4}$  signifie qu'il y a une panne toutes les  $10^4$  heures.

On inclut une autre notion de MTTR ou temps moyen pour réparer (Mean Time To Repair).

## **8. La maintenabilité**

Elle peut se traduire comme étant une caractéristique permettant d'assurer la disposition et la facilité à la maintenance dans les meilleures conditions possibles.

Dans des conditions données d'utilisation 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.

C'est aussi la faculté de répétitivité ou simplification des tâches visant à entretenir et réparer le matériel (accessibilité, encombrement, montage, démontage, sécurité, ...).

Il existe aussi une définition probabiliste plus stricte de la maintenabilité : c'est la probabilité de remettre un système en état de fonctionner en un temps donné avec des moyens donnés et dans des conditions données en retrouvant la fiabilité initiale.

L'indicateur privilégié de maintenabilité correspond aux temps d'immobilisation qui se décomposent en :

- délais d'intervention
- durée d'intervention

Une approche d'étude de maintenabilité doit être développée au stade de la conception des équipements pour répondre aux aspects liés à :

- l'évidence des éléments qui permettent d'accroître la maintenabilité tels que les critères liés au bien et aux moyens de la maintenance
- diminution de la durée de détection des défaillances (dispositifs de vérification)
- diminution de la durée du diagnostic (repérage, documentation, procédures)
- diminution de la durée de réparation (accessibilité, facilité de démontage et remontage, interchangeabilité)
- diminution de la durée nécessaire au contrôle (essais en exploitation, limites de tolérances)

## **9. La disponibilité**

C'est l'aptitude d'un bien sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de la maintenance à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées.

### **Objectif économique**

Le but recherché dans le fonctionnement des machines qui tendent vers la complexité et les faramineux prix d'acquisition n'est autre que d'avoir réaliser la notion du plus opérationnel possible.

Ceci se traduit en maintenance par la "disponibilité opérationnelle" (Figure 6) d'une machine qui est le double fruit de sa "fiabilité" élaborée par les services conception et installation du constructeur et de son "utilisation optimale" dont la charge revient au service maintenance de l'utilisateur.

<b>CONSTRUCTEUR</b>	<b>UTILISATEUR</b>
Conception au Bureau d'Etudes	Exploitation et Maintenance

Caractéristiques du Système	Caractéristiques d'Exploitation
--------------------------------	------------------------------------

FIABI-LITE	MAINTENA- BILITE	POLITIQUE MAINTENANCE
------------	---------------------	-----------------------

DISPONIBILITE INTRINSEQUE	Logistique Mainte-nance	Diagnostic Surveillance
------------------------------	----------------------------	----------------------------

<b>DISPONIBILITE OPERATIONNELLE</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût d'exploitation</li> <li>• Coût de maintenance</li> <li>• Coût de possession</li> </ul>

Disponibilité opérationnelle d'une machine  
selon la norme NF X60 503

Cependant la disponibilité absolue est tributaire de trois obstacles prépondérants :

A. Obstacles économiques

Les répercussions multiples et variés sont souvent masquées et ou mal cernées et par conséquent ne peuvent être chiffrées par les moyens de gestion comptable.

B. Obstacles humains

Une politique FMD suppose un effort de formation et d'informations pluridisciplinaires pour pouvoir :

- adopter une structuration spécifique et adaptée
- développer les méthodes d'analyse de fiabilité qualitative (AMDEC ou FMECA) et quantitative (MTBF et MTTR)

C. Obstacles techniques

Ils sont généralement proches des limites de la recherche scientifique appliquée notamment :

- manque de données chiffrées sur les taux de défaillance parce que les lois statistiques utilisées sont complexes
- mauvaise appréhension des système
- manque de surveillance intelligente

La disponibilité peut se mesurer :

- à un instant donné (disponibilité instantanée)
- sur un intervalle de temps (disponibilité moyenne)
- à la limite, si elle existe, de la disponibilité instantanée lorsque  $t \rightarrow \infty$  (disponibilité asymptotique)

Disponibilité moyenne si les temps sont cumulés:

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

Le cas particulier es la disponibilité intrinsèque si l'on considère la moyenne des temps :

$$M.T.B.F.$$
$$D_{int.} = \frac{M.T.B.F.}{M.T.B.F. + M.T.T.R.}$$

Si l'on ajoute la moyenne des temps logistiques (M.T.L.) à la disponibilité intrinsèque, on obtient la disponibilité opérationnelle :

$$M.T.B.F.$$
$$D_{oper.} = \frac{M.T.B.F.}{M.T.B.F. + M.T.T.R. + M.T.L.}$$

## 10. Notions de F.M.D.

Les expressions Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité sont bien connues dans les domaines aéronautiques, spatial, nucléaire et chimique où elles ont été imposées et développées pour des raisons de sécurité des personnes et des biens.

Bien spécifier le niveau de disponibilité, bien le contrôler, agir sur les facteurs permettant son optimisation sont des actions du ressort tout à la fois des concepteurs de la machine et des hommes de la maintenance.

Des outils et des méthodes leur assurent une démarche rationnelle et structurée comme :

- les moyens statistiques pour les modèles de calcul de la fiabilité
- les moyens techniques comme l'instrumentation et la mesure pour la collecte des données
- les outils méthodologiques comme l'Analyse de Modes de Défaillance, de leur Effets et de leur Criticité dite AMDEC ou FMECA

L'AMDEC sera faite par un groupe de travail fonctionnant sur le principe des cercles de qualité et comprenant les concepteurs, les personnes des services après vente, des spécialistes de fiabilité et les personnes de maintenance de l'utilisateur.

Chaque sous système remplira sa mission propre et constitue une composante de la mission globale de l'ensemble. Et à partir de la fiabilité  $R_i(t)$  de chacun d'eux, on pourra obtenir la fiabilité de l'ensemble  $R(t)$ .

Encore il faut déterminer les différents composants et pour cela, trois étapes successives sont nécessaires :

- A. l'analyse de la mission
- B. l'analyse qualitative des défaillances possibles par FMEA
- C. l'analyse quantitative et ses défaillances par AMDEC ou FMCEA

#### Première étape : l'analyse mission

Cela nécessite l'inventaire complet des contraintes imposées au système telles que :

- modes et durées de fonctionnement
- spécifications fonctionnelles
- performances souhaitées
- conditions de fonctionnement (thermiques, chimiques, vibratoires, ...)

Le but est d'aboutir à inventorier les causes possibles de défaillance et en distinguer deux types de matériels : les systèmes dits "non réparables" et "réparables".

### Deuxième étape : l'analyse qualitative

Il s'agit d'effectuer l'analyse de toutes les défaillances possibles du système et de leurs conséquences sans préjuger leur probabilité d'apparition. On dit en core faire une FMEA (Failure Modes and Effets). La marche à suivre est la suivante :

- identification des sous-ensembles
- liste de leurs fonctions
- inventaire de tous les modes de défaillance
- étude des conséquences sur le fonctionnement
- recherche des moyens de détection des effets

Une fois que cette étape est achevée, il va être possible de quantifier les probabilités de pannes  $r_i(t)$ .

### Troisième étape : l'analyse quantitative

C'est l'analyse des modes de défaillances du point de vue de leur effet et de leur criticité dite AMDEC ou FMCEA. Elle a pour objet premier de déterminer la gravité de tous les modes significatifs de défaillance sur le succès du système.

Il ne faudrait effectuer cette analyse que pour les sous ensembles ayant présentés des résultats défavorables lors de la deuxième étape par analyse FMEA.

La détermination de la fiabilité dépend du système réparable ou non réparable pour aboutir à l'expression de la disponibilité.

Les cahiers des charges fonctionnels doivent contenir les clauses F.M.D. complétées par la mise en œuvre des idées pratiques issues de l'expérience des techniciens du terrain.

Inclure les coûts de maintenance dans les coûts globaux d'exploitation suppose que l'on sait évaluer :

- les taux de pannes autrement dit la fiabilité par la MTBF
- les temps pour réparer donc une maîtrise de la maintenabilité par la MTTR
- les stocks des pièces de rechange par une logistique infaillible
- les modes des défaillances par les diagnostics et les surveillances

L'illustration ci-après résume les facteurs dont dépend la disponibilité d'une machine selon la norme NFX60 513.

**La Disponibilité dépend**  
**des quatre facteurs suivants :**

**1. CONTRAINTES D'OPTIMISATION**

- Coûts d'acquisition
- Coûts d'exploitation
- Coûts d'indisponibilité
- Volume
- Poids

## 2. LOGISTIQUE

<b>POLITIQUE</b>	<b>MOYENS</b>
• Entretien Maintenance	• Documentation
• Maintenance corrective et préventive	• Personnel
• Réapprovisionnement des stocks	• Formation
	• Matériel de maintenance
	• Niveau des stocks

### **3. MAINTENABILITE**

- Testabilité (couverture de test, localisation de la panne)
- Accessibilité
- Démontabilité

### **3. FIABILITE**

- Architecture
- Profil de mission
- Taux de défaillance et durée de vie des constituants

## **Coûts et analyse d'une politique F.M.D.**

### Coûts

Les suppléments d'études sont traduits par l'investissement dans un système de recueil de données donc considérés comme charges supplémentaires liées au recueil et au traitement des données.

### Avantages

- économie de mise au point de l'installation (à productivité égale) moins de modifications et meilleure identification de ces modifications
- atteinte plus rapide, mieux garantie, de l'objectif de production, avançant d'autant le début de la période d'amortissement.
- atteindre une productivité supérieure à celle qui aurait été obtenue finalement sans études de fiabilité.
- meilleure optimisation des stocks des pièces de rechange.
- meilleure planification de la maintenance et réduction des pannes.
- possession de données de base constituant de bons atouts pour la conception de l'installation suivante (nouvellement ou remplacement)

## **12. Conclusion**

La maintenance en tant que technologie mal menée gagne de jour en jour ses titres de noblesse et devient une fonction clef de l'entreprise. Par son effet, elle agit comme facteur de productivité, élément de sécurité, argument de promotion et réputation de la classe de l'entreprise.

L'exploitant pour la majorité de son parc de machines, a malheureusement peu d'impact sur la faisabilité et la maintenabilité. Il peut par contre s'organiser pour améliorer sa maintenance.

La maintenance corrective n'est sûrement pas la meilleure méthode pour éviter la panne. La maintenance systématique, faite à intervalles réguliers diminue les risques mais est d'un coût excessif c'est pourquoi le remplacement systématique du matériel doit disparaître progressivement sauf pour du petit matériel peu coûteux et non stratégique pour la production.

Cependant l'auscultation périodique par démontage et remontage partiel ou complet doit céder la place par des mesures de paramètres et leurs traitements, à des méthodes de maintenance conditionnelle.

L'orientation actuelle par la méthode dite T.P.M. (Total Productive Maintenance) d'origine Japonaise a pour objectif principal d'améliorer la disponibilité des matériels en responsabilisant tous les acteurs de la production à la maintenance de leur équipement.

Cette approche implique la participation, la motivation et l'adhésion la plus large possible du personnel. Ce qui peut se faire par l'intermédiaire des cercles de progrès et de qualité.

Concrètement la première mesure à prendre sera de décharger le service maintenance des tâches élémentaires de maintenance courante et enrichir la tâche de l'exploitant par la maintenance de premier niveau (nettoyage, contrôle du bon fonctionnement, lubrification, changements standard des pièces, établissement de prédiagnostics en cas de défaillance).

Outre les objectifs qui lui sont assignés de sécurité, sûreté et continuité des outils de production, la maintenance représente un facteur déterminant dans les investissements.

Il ne s'agit pas de manipuler des ratios sans pour autant les expliquer pour essayer seulement de minimiser les coûts, ni les surdimensionner mais tendre à les optimiser pour que la fonction se rationalise et aura sa juste valeur, sa juste signification.

Nous n'avons pas insisté sur toutes les autres notions familières pour ne pas encombrer cet exposé et parce que le potentiel existe et les techniques élaborées nécessitent à vrai dire que des remaniements. Le sentiment de relever le défi n'est autre que positif dans ce domaine si l'on décide seulement de mieux faire.

Modestement je sens que je n'ai pu synthétiser exactement ces notions parce que j'estime que moi même, je les ai exposés tant bien que mal dans un désordre, avec des répétitions d'idées et parfois superficielles encore et que la limitation de l'espace du journal en influe aussi.

Néanmoins le dessein premier est de capitaliser ces concepts préliminaires en les disposant au mieux et les adapter au service de l'efficacité de notre environnement industriel.

## **12. Bibliographie**

1. Guide de la maintenance, Daniel Boitel et Claude Hazard, Edition Nathan 1990
2. Vers le zéro panne avec la maintenance conditionnelle, Alain Boulenger, Collection "Guides de l'utilisateur"  
Edition AFNOR 1989
3. La fiabilité en mécanique, J.C. Ligeron  
Edition Desforges 1979
4. Maintenance conditionnelle, mesures et analyses des vibrations, Jean Lois Feron  
Edition de l'IUT de Saint Nazaire 1993
5. La gestion de la fonction maintenance,  
Djameleddine Feliachi, Edition 1988, INES de Biskra