

Faculty of Technology  
Department of Electrical Engineering

كلية التكنولوجيا  
قسم الهندسة الكهربائية

المسيلة في: 05 ماي 2025

رقم: 110 / ق هك / 2025

## شهادة إدارية

بخصوص مطبوعة الدروس الخاصة بالأستاذ  
دهداف المبروك

بناءً على محضر اللجنة العلمية لقسم الهندسة الكهربائية تحت رقم: 41 / ق.هك/ 2025 المنعقد بتاريخ 17 فيفري 2025 والمتضمن تعيين الخبراء: الأستاذ غماري زين أستاذ بجامعة المسيلة ، الأستاذ بوقرة عبد الرحمان أستاذ بجامعة المسيلة، والأستاذ بن دايدة عبد المليك أستاذ محاضر – أ بجامعة باتنة 02 وذلك لتقييم مطبوعة الدروس الخاصة بالأستاذ دهداف المبروك أستاذ محاضر-- أ بقسم الهندسة الكهربائية بجامعة المسيلة تحت عنوان :

" Maintenance et Fiabilité"

وبعد إطلاع رئيس اللجنة العلمية على التقارير الواردة والتي كانت كلها ايجابية، وعليه فإن اللجنة لا ترى مانعا أن تتخذه سندا في تدريس طلبة السنة الثالثة ليسانس آلية، شعبة آلية، ميدان علوم وتكنولوجيا وأن تعتمد في أي تقييم للمسار العلمي للأستاذ المعني.

رئيس اللجنة العلمية

بوقرة عبد الرحمان  
رئيس اللجنة العلمية  
قسم الهندسة الكهربائية  
كلية التكنولوجيا

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد بوضياف بالمسيلة

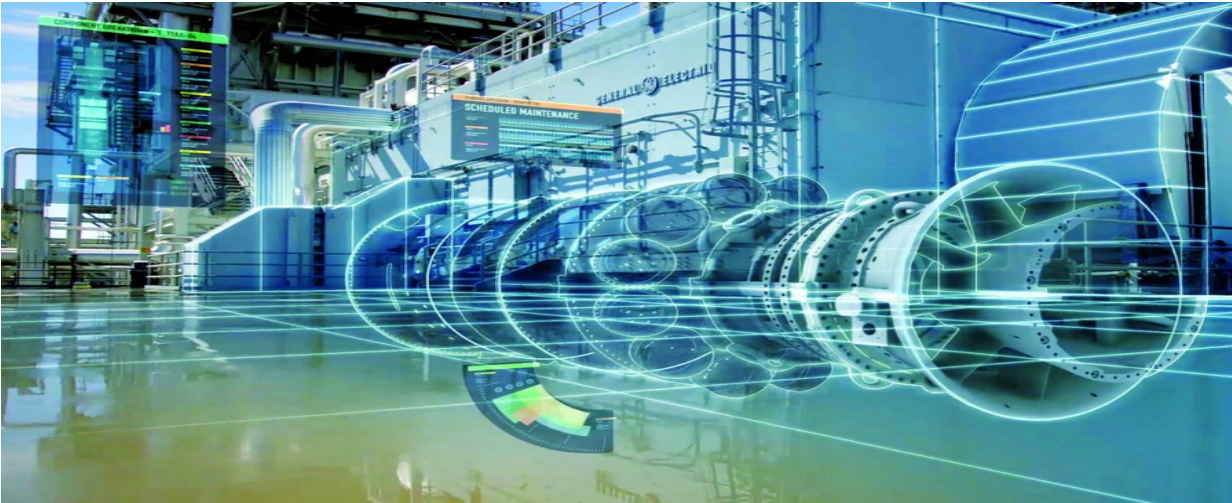
كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة الكهربائية

# Maintenance et Fiabilité

[Support de cours]

Destiné aux étudiants, 3<sup>ème</sup> Année Licence Automatique



**Réalisé par : Dr. Mabrouk DEFDAF**

*(Maitre de Conférences Classe A, Département de  
Génie-Électrique, Université de M'sila).*

**2024-2025**

## Table de matière

### Chapitre 1. La fonction maintenance

Définitions, stratégies de maintenance, les normes de la maintenance

### Chapitre 2. Mécanisme et modes de défaillance

Notion de défaillance, cause de défaillance, mode de défaillance, mécanismes de défaillance.

### Chapitre 3. Analyse quantitative de maintenance

Analyse ABC, Abaque de Noiret, Arbre de décision, matrice de criticité, les relations de corrélation.

### Chapitre 4. Le diagnostic

Définition et méthodologie, conduite du diagnostic, outils du diagnostic (tableau cause effets, arbre de défaillance, digramme de diagnostic, ...), étude comparative des outils.

### Chapitre 5. Analyse prévisionnelle des défaillances

## Chapitre 1. La Fonction Maintenance

### I.1 INTRODUCTION :

Depuis la révolution industrielle la maintenance des équipements, machines, ou des chaînes de production est devenue un challenge pour les managers des entreprises et en raison du développement de l'industrie basée sur une technologie d'automatisation complexe et exotique avec une large diffusion dans tous les domaines industriels il est devenu très clairement que les machines sont remplacées Les êtres humains dans la réalisation des tâches de production ce que réduit Les opportunités dans la marche d'emplois de façon spectaculaire.

Aujourd'hui la machine est remplacée l'homme sur le champ de réalisation des tâches de fabrication alors que le taux de production progressivement élevé par rapport aux effectifs qui est plus en plus assai démunies.

Mais le rêve de laisse les machines produisant seul sans aucune intervention j'ai ce que maintenant est incontrôlable car quand les machines Produisent seuls les arrêts sont vite critiques est avec différent nature ce qu'implique des interventions des personnels spécialisées avec une démarche reconnue. Ces dernier représentant des actions appelée les actions de maintenance qui permet de remédier les causes d'arrêts C'est pour cette raison que la maintenance représente une activité essentielle au maintien de la production à un niveau satisfaisant, par une catégorie des spécialistes de maintenance. Qui resteront maintenant et à l'avenir les professionnels de la santé des machines et leur rôle sera souvent double : maintenir les machines et surveiller la production elle-même, la maîtrise de fonctionnement des systèmes de production automatisée plus en plus exotique de façon durable Quel que soit le secteur industriel s'impose comme un enjeu majeur pour Les personnels de maintenance, entreprises, service qui permettra d'évaluer clairement. La marge de manœuvre et la concurrence dans un monde primitif ne tolèrent pas les fainéants.

L'enjeu majeur est ou sera la valorisation des ressources humaines, Nous produirons de plus en plus avec des technologies identiques pour tous, mais nous maintiendrons la production en quantité et en qualité avec des hommes. Eux feront

la différence. En particulier, les techniciens de maintenance auront un rôle clé pour valoriser le capital productif de l'entreprise. Pour cela ils devront collaborer avec les autres services de l'entreprise : production, contrôle de gestion.

## **I.2 LA FONCTION MAINTENANCE :**

Concevoir, produire et commercialiser sont des fonctions « naturelles » facilement identifiables et rarement négligées, à juste titre. Par contre, *la maintenance n'est qu'un soutien à la production, son principal client*. C'est donc une fonction « masquée », agissant comme prestataire de service interne et, de plus, fortement évolutive.

### **I.2.1 L'ORIGINS DU TERME MAINTENANCE :**

Le terme « maintenance », forgé sur les racines latines *manus* et *tenere*, est apparu dans la langue française au XII<sup>e</sup> siècle, au XIV<sup>e</sup> siècle, le mot signifie « action de conserver une possession » pour évoluer vers « action de maintenir, maintien, soutien, au XVI<sup>e</sup> siècle, Le terme est emprunté outre-Manche vers la même époque, dans le sens de « tenue », « comportement », évoluant, au début du XV<sup>e</sup> siècle, vers celui de « maintenir ou garder en vie » peut être trouvée l'utilisation du mot "maintenance à ce moment Sous la plume de François Rabelais qui a parlé de maintenance de la Loy "dans Pantagruel.

Les utilisations anglo-saxonnes du terme sont donc postérieures. À l'époque moderne, le mot est réapparu dans le vocabulaire militaire « Maintien numérique des effectifs et du matériel d'une troupe au combat ». Définition intéressante, puisque l'industrie l'a reprise à son compte en l'adaptant aux unités de production affectées à un « combat économique ».

### **I.3.MAINTENANCE DEFINITION (AFNOR X 60-000 mai 2002) :**

La définition *de* maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

#### **I.3.1 Objectifs de la maintenance :**

C'est la nature de l'entreprise qui dicte les objectifs du service de maintenance

Clairement définies par une politique bien déterminée à partir de la prise en

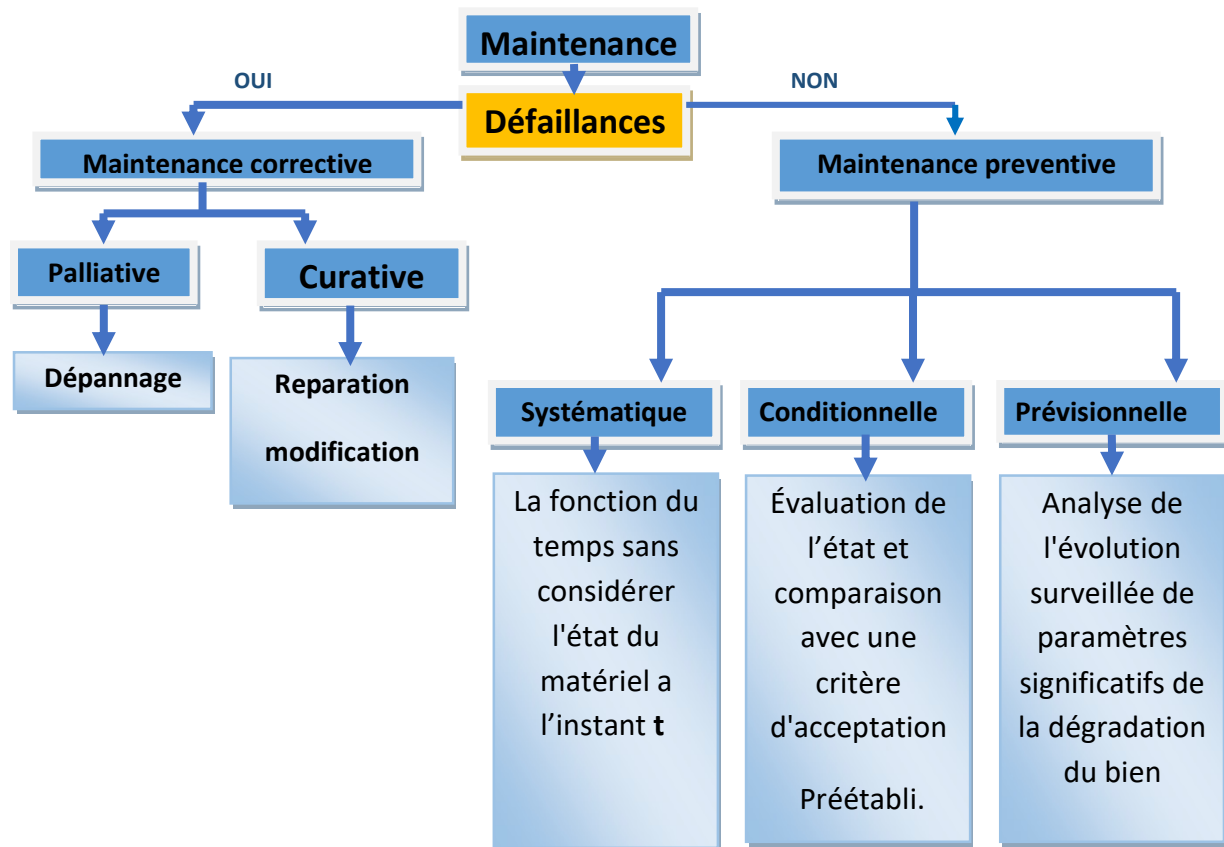
comptes de trois facteurs essentiels

A - Facteur technique.

B - facteur économique.

C - facteur humain et écologique.

### I.3.2 DIFFÉRENTES FORMES DE MAINTENANCES :



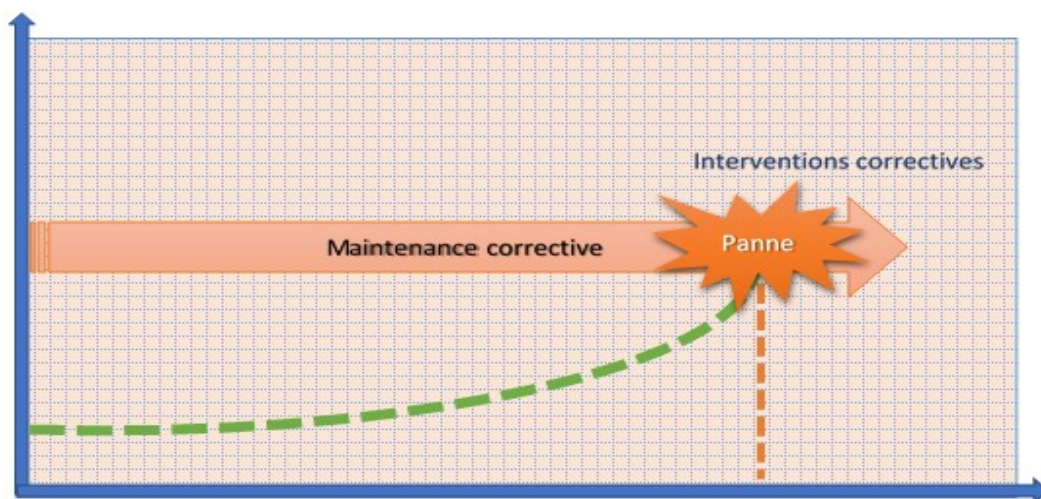
*Figure N 01 : les différents Formes de maintenance normalisée selon FDX60.000*

#### I.3.2.1 Maintenance corrective (FD X 60-000) :

Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

*La maintenance palliative* : caractérise les actions de dépannage : remise en état provisoire.

*La Maintenance curative* : Action de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié pour lui permettre d'accomplir une Fonction requise.



*Figure N02 : maintenance corrective*

Le résultat des actions réalisées doit présenter un caractère permanent.

Des modifications et améliorations peuvent être apportées, afin de réduire l'occurrence d'apparition de la défaillance ou d'en limiter l'incidence.

### 1.3.2.2 Maintenance préventive (FD X 60-000) :

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien, elle est subdivisée en :

1.3.2.3 Maintenance systématique : Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état Du bien.

#### *Avantages :*

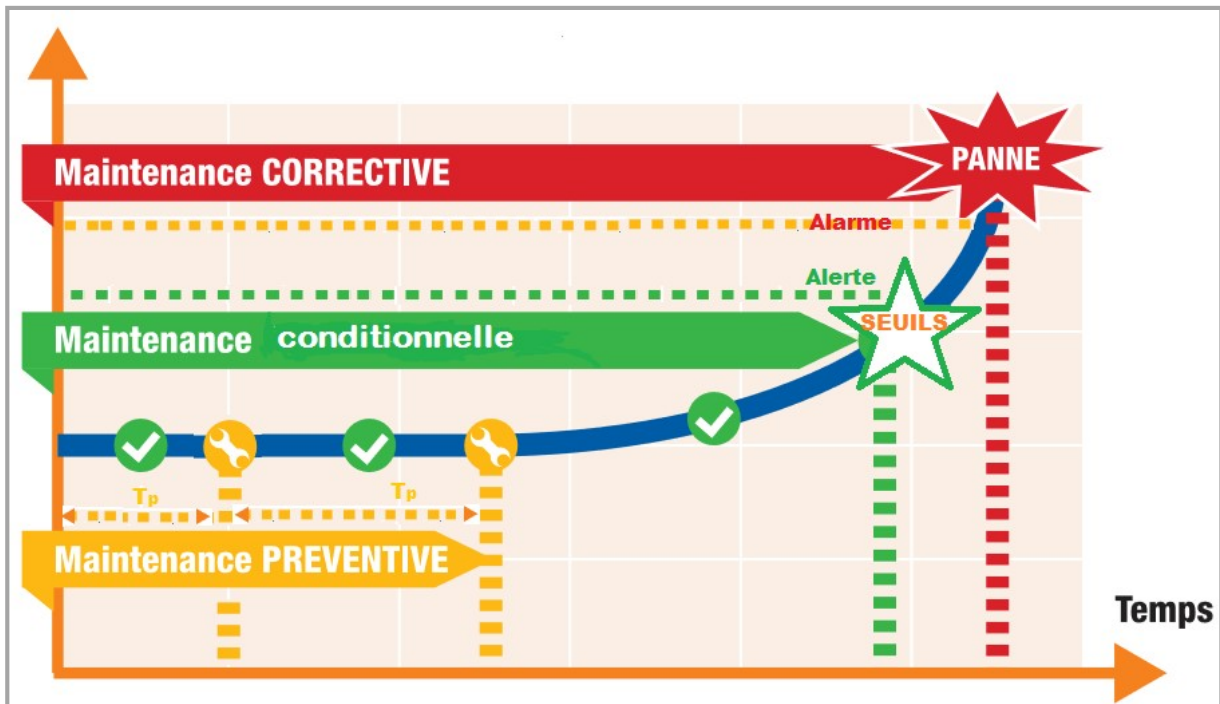
- Diminuer les risques de pannes par rapport à la maintenance curative
- Facile à planifier des arrêts d'entretien

#### *Inconvénients :*

- Risque de casse entre deux visites
- Risque de redémarrer dans de plus mauvaises conditions que lors de l'arrêt de la machine.
- Coût de visites qui sont parfois inutiles.
- « La connaissance » est souvent considérée comme maîtrisée par le fabricant ou constructeur.

**1.3.2.4 Maintenance conditionnelle « Norme AFNOR FDX 60-000 » :** « Les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères significatifs prédéterminés de l'état de dégradation du bien ou du service. »

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent.



*Figure N03 : graph de maintenance*

Suivant la définition la maintenance conditionnelle elle est venue de rattrapée l'imperfection au niveau de maintenance systématique à partir de différentes techniques basées sur la mesure de paramètres physiques, tels que :

- La mesure de vibrations
- L'analyse d'huile
- La thermographie infra- rouge
- L'émission acoustique
- Autres méthodes d'inspection ...

**Avantages :**

- optimisation de la durée de fonctionnement
- optimisation de l'intervention (préparation)
- évaluation réelle de l'état de la machine
- évite les pertes de production

**Inconvénients :**

- coût de l'investissement (homme / matériel)

- s'atteindre à un programme suivi

### **I.3.2.5 Maintenance prévisionnelle « Norme AFNOR FDX 60-000 » :**

« Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien »

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.

## **I.4 L'ÉMERGENCE DE LA NOTION DE SERVICE DE MAINTENANCE,**

### **Les normes de la maintenance :**

#### **ENTRE LES ANNÉES 1960 ET 1980**

La maintenance était uniquement considérée comme une activité inférieure, considérée comme ayant une importance mineure et utile uniquement en cas de panne, le département de maintenance était totalement restreint et principalement limité à des tâches électriques (serrage...etc.) ou mécaniques (graissage...etc.), et les stratégies déployées ne reposaient que sur la réparation et les opérations correctives majeures, Les notions de prévention ou de prédiction n'existaient pas et la maintenance souffrait alors d'une très mauvaise image. Il était Ce contexte spécifique lorsque le mode industriel sous des implications totalement différent à ce que nous connaissons aujourd'hui Tout simplement parce que les équipements ne sont pas intégrés à un système plus général.

Juste avant les années 80 les entreprises (y compris celles des secteurs de la pétrochimie, des transports et de l'énergie nucléaire) ont progressivement pris conscience de l'aspect sécurité. Ils voulaient protéger leurs employés, alors ils ont commencé à s'intéresser à la maintenance pour le développer et lui donner plus d'importance, et ce Développement de maintenance a pour des raisons humaines plutôt que pour des raisons purement économiques.

#### **À PARTIR DE 1980 LES NORMES DE MAINTENANCE :**

Dans ce contexte d'évolution et de sensibilisation aux risques liés à l'utilisation d'équipements performants, les premières normes ont été créées. En France ainsi que dans l'ensemble de l'UE, des normes de maintenance industrielle ont été progressivement mises en place : en 1979 puis en 1985, les normes AFNOR X60 et X60 000 ont été créées, Le secteur de la maintenance a donc subi de profonds

changements afin de devenir un domaine très spécialisé et essentiel des usines, ce qui a conduit à la création des premières formations de certificat de technicien supérieur et autres formations dans les années 1980, Il est en effet devenu nécessaire de former des experts capables de s'occuper des problèmes de maintenance afin d'évoluer vers un modèle plus sûr et plus efficace.

Une concurrence progressive entre entreprises L'évolution des équipements et, par extension, des techniques, est apparue dans un contexte de mondialisation.

#### **ENTRE 1980 ET 2000 :**

Le monde industriel a changé dans de nombreux domaines maintenance, achats, communications, production, qualité, sécurité... Tous ont donc dû améliorer leurs techniques : des nouveaux modes opératoires ont été mis en œuvre En ce qui concerne la maintenance industrielle, il s'est complètement métamorphosé grâce à l'arrivée de nouvelles approches, comme la maintenance productive, concept né directement du Japon et qui a révolutionné l'approche française. Le secteur n'avait d'autre choix que de se moderniser afin de permettre aux entreprises de trouver leur place sur le marché et d'être compétitives, C'est ainsi qu'ils se sont engagés dans l'acquisition de normes, à l'instar des normes ISO 9000 (en 1987) et ISO 14 000 (en 1996).

#### **LES ANNÉES 2000 JUSQUE AUJOURD'HUI :**

Les entreprises cherchent aujourd'hui à s'affirmer sur les marchés industriels et à prouver qu'elles disposent beaucoup de ressources en s'appuyant sur les progrès réalisés au cours des vingt dernières années. Chacun d'entre eux souhaite améliorer sa gestion de la maintenance afin de réduire les arrêts de production tout en augmentant la qualité des équipements et la capacité de production.

Malgré cette volonté d'innovation technique et de savoir-faire, le secteur industriel est plus particulièrement celui de la maintenance est confronté à des sérieuses difficultés Ce dernier est absolument essentiel et garantit le bon fonctionnement des infrastructures industriels, mais il a toujours du mal à attirer les jeunes car il n'a pas une très bonne image, les formations spécialisés ne sont pas suffisamment mis en avant, le domaine a donc de grandes difficultés à recruter des professionnels qualifiés, Parmi les nombreux défis auxquels le secteur de la maintenance est confronté (notamment l'externalisation, la diminution des marges ainsi que des

prix), il est très difficile de faire comprendre aux gens pourquoi ces compétences sont si importantes et combien ces emplois sont enrichissants. Les conditions de travail vont probablement évoluer avec l'évolution de tous les secteurs professionnels grâce aux différentes technologies qui apparaissent progressivement dans nos vies, Des solutions innovantes de gestion de la maintenance industrielle prennent déjà forme pour aider les usines à faire face à des problèmes très spécifiques, parmi ces solutions des outils intelligents pour permettre aux entreprises de relever ces différents défis, citons par exemple GMAO (Système de gestion de la maintenance informatisée) qui regroupe à la fois un logiciel destiné à aider les techniciens et les gestionnaires dans leurs tâches quotidiennes.

## Chapitre 2. Mécanisme et modes de défaillance

### II.1. Les concepts de défaillance

Les défaillances sont à la maintenance ce que les pathologies humaines sont à la médecine : leur raison d'exister. Or, toute défaillance est le résultat d'un mécanisme pathologique rationnel et explicable, dû à une ou plusieurs causes à identifier.

#### II.1.1 Définitions de *Défaillance* (normes CEN WI 319-003)

« C'est la cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. »  
D'après (AFNOR) (X06-501) Cette fonction doit être déterminée avec les tolérances associées.  
Donc une défaillance est une condition insatisfaisante, Après une défaillance, le bien est en panne. Termes proches ou synonymes, mais non normalisés : *Failure* en anglais, dysfonctionnement, défaut, faute, panne, avarie, dégradation, anomalie, dommage, erreur, incident, anomalie, arrêt fortuit, détérioration, etc.

**II.2 Modes de défaillance :** Effet par lequel une défaillance se manifeste, on distingue :

- **Panne :** « état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autre action programmée ou à un manque de ressources extérieures ».  
Implique arrêt ou non fonctionnement.
- **Dégradation :** « évolution irréversible des caractéristiques d'un bien lié au temps ou à la durée d'utilisation ». Une dégradation peut conduire à la défaillance.
- **État dégradé :** « état d'un bien par lequel ce bien continue à accomplir une fonction avec des performances inférieures aux valeurs nominales ou continue à accomplir une partie seulement de ces fonctions requises ».  
Implique automatiquement perte de performances.
- **Défaut :** nous conformité dans les relations de cause à effet, Un processus est dit en état de défaut, de détérioration ou de panne, si les relations de cause à effet, liant les variables du système, se sont modifiées  
La terminologie défaut, détérioration, panne est tout à fait progressive.

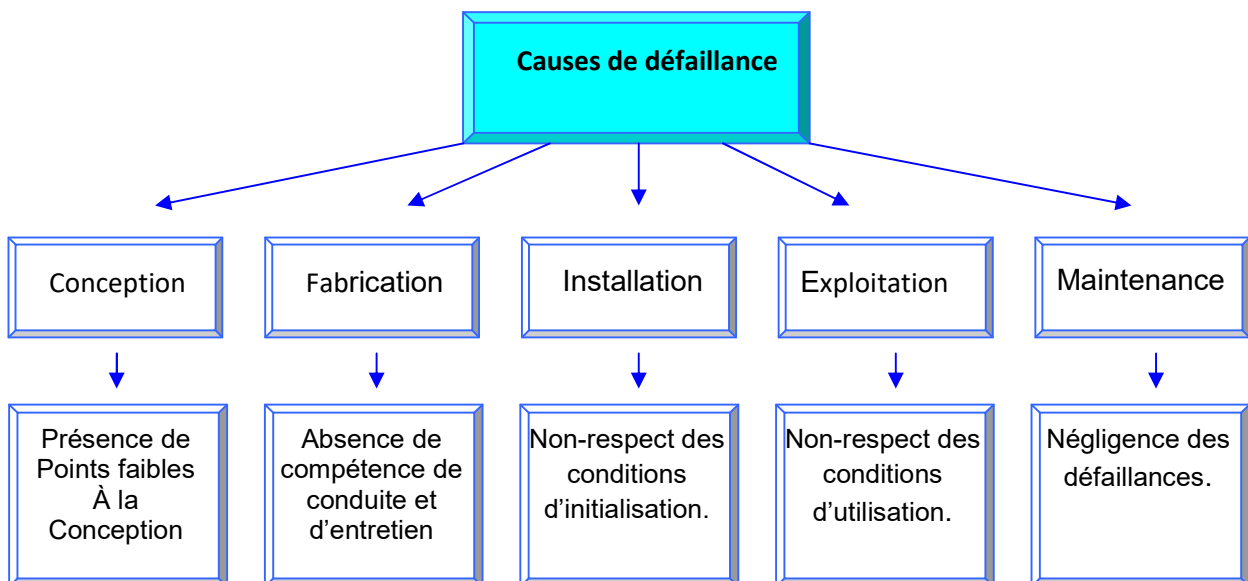
Quelle que soit l'appellation retenue, la défaillance existe sous différentes formes et peut affecter différentes parties ou composants d'une installation.

**Remarque :** En tête toute opération ou application qui ne donne pas satisfaction, qui n'atteint pas son but ou qui engendre des effets secondaires indésirables, constitue un défaut.

### II.2.3 Effet de la défaillance :

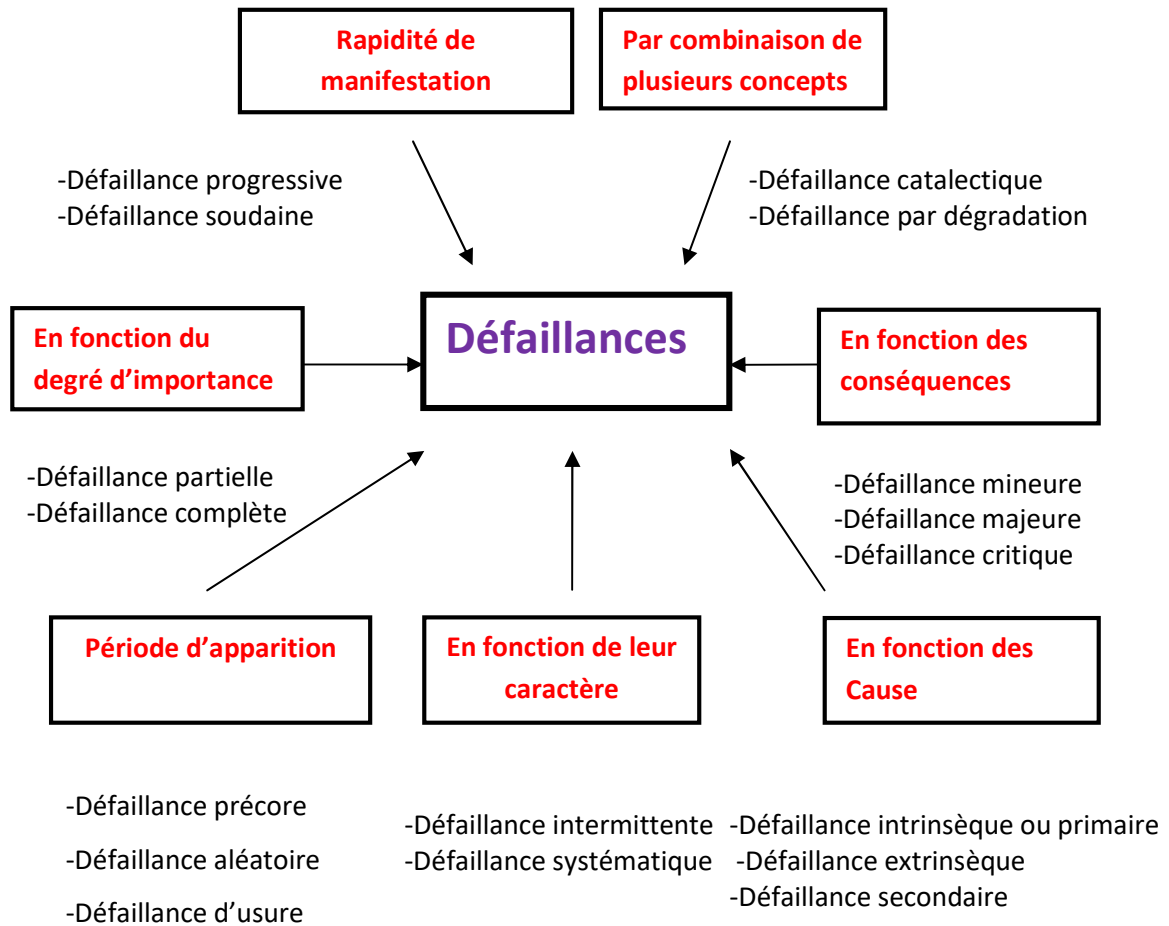
- ✚ Concrétise la conséquence,
- ✚ Est relatif à un mode de défaillance,
- ✚ Dépend du type d'AMDEC réalisé : Mécontentement ,Sécurité des opérateurs Arrêt du flux de production

**II.2.4 Causes de défaillance :** « Circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance ».



*Figure 04 : cause de défaillance*

II.2.5 Classification de la défaillance : Le cadre de référence de la classification des défaillances que nous présentons à la figure (Est réparti en sept familles et 17 causes)



*Figure N° 05 : Classification des défaillances.*

La norme AFNOR X 60-011 propose plusieurs mises en famille des causes des défaillances, parmi lesquelles nous retiendrons :

### II.2.5.1 Suivant leur cause : Les causes intrinsèques et extrinsèques

1. **Causes intrinsèques (définition CEN)** « Intrinsèques » signifie qu'elles sont générées par le système lui-même, en condition normale de fonctionnement.

Parmi les causes intrinsèques :

- « Défaillance due à une conception inadéquate du bien » ;
- « Défaillance due à une fabrication du bien non conforme à sa conception ou à des procédés de fabrication spécifiés ».
- « Défaillance due à une installation incorrectement réalisée ».
- « Défaillance due à la durée d'utilisation » par usure ou par vieillissement.

2. **Causes extrinsèques** : La norme CEN permet de distinguer :

- « Défaillance de mauvais emploi, due à l'application de contraintes qui excèdent les capacités spécifiées du bien ».
- « Défaillance par fausse manœuvre, due à une manipulation incorrecte du bien ou un manque de précaution ».
- « Défaillance due à la maintenance, résultant d'une action inadaptée ou exécutée de façon incorrecte ».
- « Défaillance secondaire », conséquence d'une autre défaillance en amont (en cascade).

### II.2.5.2 Suivant leur degré : défaillances partielles ou complètes, permanentes, fugitives ou intermittentes.

**1. Défaillance partielle** : défaillance qui entraîne l'inaptitude d'une entité à accomplir certaines fonctions requises mais non toutes.

**2. Défaillance complète** : défaillance qui entraîne l'inaptitude totale de l'entité à accomplir toutes les fonctions requises.

**3. Panne permanentes** : panne d'une entité persiste tant que n'ont pas eu lieu des opérations de maintenance corrective.

**4. Panne intermittente** : panne d'une entité subsistant une durée limitée après laquelle l'entité redevient apte à accomplir une fonction requise sans avoir été soumise à une opération de maintenance corrective.

**5. Panne fugitive :** panne d'un dispositif qui est intermittente et difficilement observable.

Les défauts fugitifs sont extrêmement difficiles à diagnostiquer car leur apparition est aléatoire.

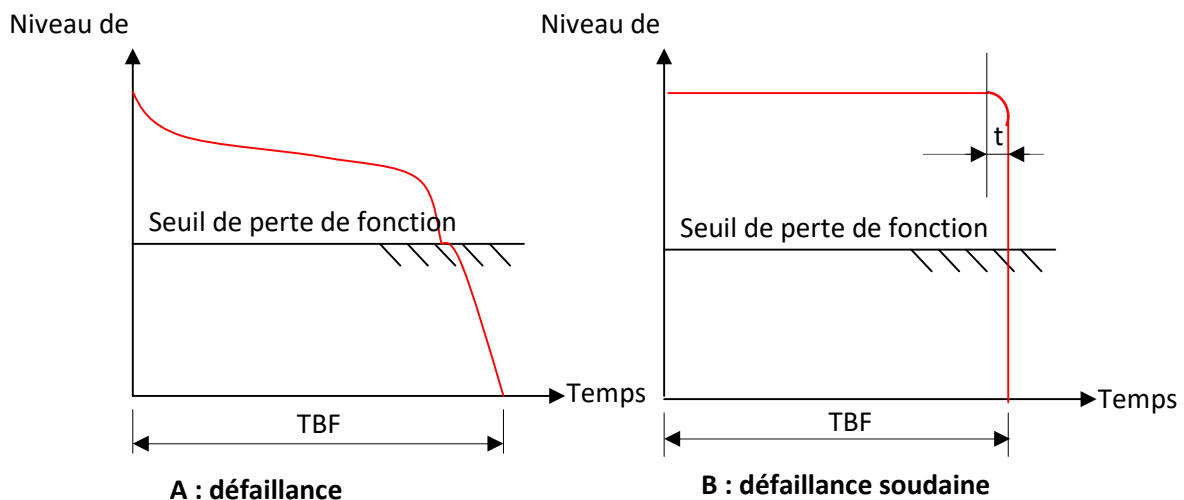
**II.2.5.3 Suivant leur vitesse d'apparition :** défaillances soudaines ou progressives.

**1. La défaillance soudaine :** « ne peut pas être anticipée par un examen ou une surveillance préalable ».

**2. Défaillance progressive (par dérivé) :**

C'est la défaillance qui est due à une évolution dans le temps de certaines caractéristiques d'une entité

Par combinaison des deux : défaillance catalectique ou par dégradation. La défaillance catalectique est soudaine + complète, alors que la dégradation est progressive + partielle. .



*Figure N° 06 : Vitesse de d'apparition d'une défaillance*

### Remarque

- Cette dynamique de dégradation permet, (figure... B) de fournir des informations précises et fiables sur l'état des organes mécaniques ou sur les phénomènes observés. Ce qui permet d'affiner le suivi des machines.

- Cette dynamique de dégradation (figure... A) ne permet pas de voir la dégradation et par conséquent ne permet pas de surveiller la machine. 1.4.5.4 Mécanismes de défaillance

« Processus physique, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance ».

## II.2.5.4 Défaillances mécaniques par détérioration de surface

*Fatigue et usure :*

**a-Usure** : enlèvement progressif de matière à la surface des pièces d'un couple cinématique en glissement relatif.

**b- Fretting-corrosion** : usure particulière apparaissant au contact de 2 pièces statiques, mais soumises à de petits mouvements oscillants (vibrations). C'est le cas des pièces frettées ou des clavetages.

**c- L'écaillage** : enlèvement de grosses écailles de matière.

**d- Grippage** : soudure de larges zones de surface de contact, avec arrachement massif de matière

**e- Abrasion** : action d'impuretés ou de déchets (poussières, sable, etc.)

**f- Cavitation** : implosion de micro bulles de gaz incondensables sous l'action d'une brutale chute de pression au sein d'un liquide. L'onde de choc génère des cratères dans la zone de cavitation (pompes, hélices, etc.)

**g- érosions** : enlèvement de matière par l'impact d'un fluide ou de particules solides en suspension, ou de phénomènes électriques (arcs)

**h- Faiçnage** : réseau de craquelures superficielles dues à la fatigue thermique

**i- Marquage** : enfoncement localisé du à une charge ponctuelle

**k- Rayage** : trace laissée par le passage d'un corps dur

**l- Roulement et fatigue de contact** : roulements à billes et à aiguilles se détériorent intrinsèquement par fatigue de contact. La pression de Hertz au contact bille / chemin de

roulement fait apparaître des contraintes de cisaillement sur les bagues entraînant des fissures en surface puis débouchantes (piqûres).

### ***Frottement et usure :***

Ce mode de défaillance est inexorable dès lors que 2 surfaces en contact ont un mouvement relatif. La tribologie est la science expérimentale qui étudie ces phénomènes. Dynamique de l'usure des lois de dégradation ; L'analyse des lubrifiants met en évidence cette succession de phases en caractérisant le nombre et la taille croissante des particules métalliques libérées.

### **II.2.5.5 Défaillances mécaniques par déformations plastiques**

Déformations plastiques sous contrainte mécanique : dues à un dépassement de la limite élastique du matériau. Une inspection des pièces vérifiant l'apparition d'une zone de striction peut prévenir le risque d'une rupture prochaine. Déformation plastique sous contrainte thermique et dans le temps : c'est le fluage qui est une déformation apparaissant sous contrainte mécanique associée à des températures de service supérieures à 40% de la température de fusion.

### **Défaillances mécaniques par rupture ductiles, fragiles ou de fatigue**

**Rupture ductile** : elle provient après une phase de déformation plastique appréciable, allongement du matériau et striction au niveau de la rupture.

**Rupture fragile** : elle survient après une très faible déformation plastique. Elle est souvent l'effet d'un choc et est favorisée par la fragilité intrinsèque du matériau.

**Rupture par fatigue** : c'est quand une pièce a atteint sa limite d'endurance.

### **II.2.5.6 Les modes de défaillances électriques :**

**1/ Rupture de liaison électrique** : c'est le plus souvent la conséquence d'une cause extrinsèque (choc, surchauffe, vibration).

**2/ Collage ou usure des contacts** : les contacts, par différents modes de défaillances, sont souvent les « maillons faibles » d'un circuit électrique.

**3/ Claquage** d'un composant, tels que des résistances, des transistors, etc.

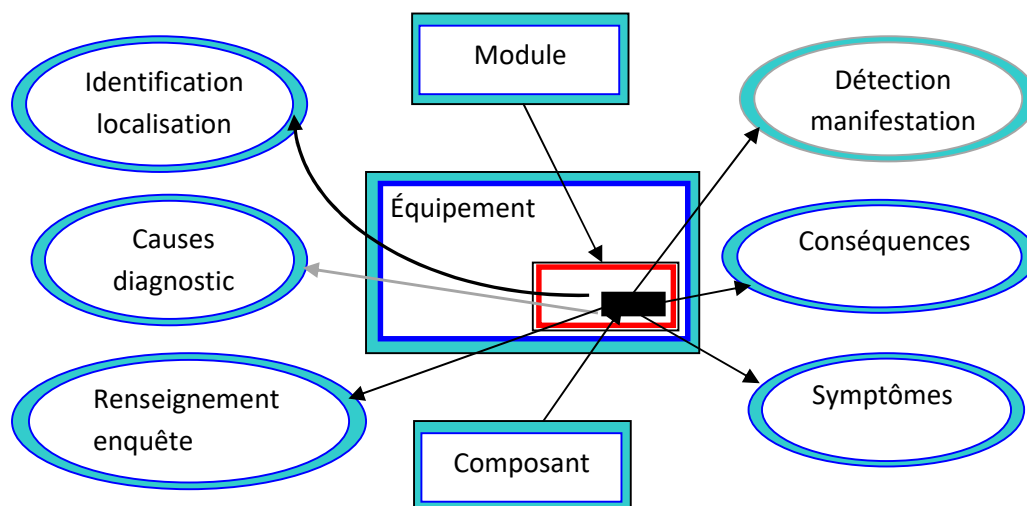
Ces modes de défaillances présentent un caractère catalectique qui les rend difficile à prévenir. Par contre, il est possible d'agir sur les phénomènes extérieurs qui les génèrent, tels que les actions thermiques et vibratoires.

Dans le domaine électronique, le « déverminage » a pour but d'éliminer les composants ayant un point faible.

## II.2.6 Analyse qualitative post défaillance

### II.2.6.1 Les six éléments de connaissance d'une défaillance :

Une analyse qualitative post défaillance doit comporter les six éléments de connaissance permettant de comprendre aussi bien l'environnement du système lors de sa perte de normalité que les mécanismes ayant engendrés la défaillance. Cela afin d'apporter des remèdes durables et des mesures d'organisation pour éviter la réapparition de la défaillance, ou pour atténuer ses effets



*Figure N° 07 : Les critères d'analyse de défaillance*

### Les six pôles de l'analyse

#### 1. L'identification et localisation de la défaillance

- ♦ Identification dans l'organisation (numéro de demande de travaux, intervenants et nature de la panne)
- ♦ Situation dans le temps (relève compteur et date + heure).
- ♦ Localisation dans l'espace à travers l'arborescence (location par code de l'équipement, puis du module ou du composant défaillance).
- ♦ Identification fonctionnelle : **quelle est la fonction perdue ?**

## 2. La détection, la manifestation et l'alarme

- ♦ Par qui, quand et par quel moyen la défaillance a-t-elle été détectée ?
- ♦ Dans quelles conditions de surveillance et /ou par quels capteurs en place.
- ♦ Manifestation de la défaillance : **amplitude** (partielle ou complète), **vitesse** (progressive ou soudaine). **Caractère** (permanant, fugitif, intermittent)

## 3. Les renseignements recueillis par enquête préliminaire

- ♦ Détection relative au composant défectueux localisé ;
- ♦ État de l'environnement avant et au moment de la détection, conditions de service et circonstances.
- ♦ Origine et référence du composant localisé.
- ♦ Fichier historique (quelles sont les interventions antérieures)
- ♦

## 4. Les symptômes

- ♦ Observés in situ avant l'arrêt : relevé des (anormalités) (Bruit et vibrations couleur ; odeur ; chaleur ; etc.) Indication mesurées ou captées. Caractérisation des contraintes Perturbations en sortie défauts de qualité associés.
- ♦ Observés après dépose ou démontage ; mesures statiques, mesures électriques en tension ou hors tension. Examen morphologique en cas de rupture mécanique ; Examen de surface ; photographie ou dessin.
- ♦ Observés par examens complémentaires : Microscopie, analyses chimiques, contrôles non destructifs, etc.

## 5. Les conséquences

- ♦ Sur le plan de la sécurité, de l'indisponibilité, de la non-qualité
- ♦ Produit, des coûts directs. etc.
- ♦ Mineures, majeures ou critiques

## 6. Les causes

- ♦ Imputation extrinsèque : accident, choc surcharge, mauvaise utilisation, erreur conduite, non-respect de consigne ; défaut d'entretien. Manque de précaution. Environnement non-conformité, défaillance seconde, ou en cascade.

- ♦ Imputation intrinsèque : défaut de santé-matière, de conception de fabrication ; de montage, d'installation, mode de défaillance en fonctionnement, usure, abrasion, corrosion, fatigue, détérioration de surface, déformation, rupture, vieillissement. etc.

### II.2.6.2 Les fiches d'analyses qualitatives de défaillances

Les recueils de ces informations après défaillance doivent se faire sur une fiche d'analyse de défaillance. Elle sera structurée à partir des six pôles étudiés et adaptée à la logique documentaire de l'entreprise. L'organisation du recueil est de la responsabilité de l'agent des méthodes de secteur concerné

La compilation de ces fiches engendre une base de données qualitative complémentaire des données quantitatives.

#### **Dans quel cas faut-il analyser une défaillance ?**

Certainement pas en temps réel et pour chaque défaillance !

Mais en temps différé, après sélection de pannes répétitives ou coûteuses par l'agent des méthodes, cette hiérarchisation des défaillances peut se faire à partir d'une analyse quantitative de défaillances suivant les graphes de Pareto ou suivant une **AMDEC** (analyses des méthodes de défaillance et leurs effets et de leurs criticités) qui s'appuie généralement sur trois critères.

- ✓ La probabilité d'occurrence.
- ✓ La gravité de ses effets.
- ✓ Le non détectabilité.

### II.2.7 L'analyse quantitative des défaillances

L'analyse quantitative est basée sur l'étude réglementaire et suivre l'évolution du comportement de chaque équipement afin d'en déduire des priorités d'action.

Suivant la documentation du service suivants :

- Le DTE, dossier technique de l'équipement analysé.
- L'historique d'équipements (les données quantitatives)
- Les données qualitatives relatives aux analyses de défaillance (fiches d'analyse de défaillance et expertises,)
- Modes opératoires pour les interventions fournis par constructeur.

L'analyse quantitative orientent le choix des actions d'amélioration, donc les défaillances à approfondir pour pouvoir les corriger et les prévenir par des interventions correctives programmé.

En fait, les analyses quantitatives permettent d'en déduire :

- Les durées de bon fonctionnement (*TBF, time between failures*) et leur moyenne (*MTBF*) ainsi que le nombre  $N$  de défaillances. La saisie de ces durées permettra de caractériser la *fiabilité* de l'équipement.
- Les temps d'arrêt de production (*TA*) intrinsèques au matériel et inhérents à chaque défaillance, y compris les durées de « micro défaillances » Ce dernier permettra de caractériser la *disponibilité* de l'équipement.
- Les durées d'intervention (*TTR, time to repair*) et leur moyenne (*MTTR*). Qui permettra de caractériser la *maintenabilité* de l'équipement.

## Chapitre 3. Analyse quantitative de maintenance

### Introduction

L'analyse des défaillances peut s'effectuer :

- Soit de manière quantitative puis qualitative en exploitant l'historique de l'équipement et les données qualitatives du diagnostic et de l'expertise des défaillances
- Soit de manière prévisionnelle en phase de conception ou a posteriori, après retour d'expérience.

Tout le problème pour l'homme de maintenance est de savoir quelles défaillances traiter en priorité, certaines n'ayant que peu d'importance en termes d'effets et de coûts.

L'exploitation de l'historique va permettre d'effectuer ce choix. Or, certains diront qu'ils n'ont pas le temps d'exploiter l'historique des machines, qu'ils ont autres choses à faire (du correctif certainement !..). Le refus d'exploiter les historiques montre une totale méconnaissance des méthodes de gestion de la maintenance, et donc une totale désorganisation du service Maintenance.

Il est clair que le choix des types de défaillance est important : une défaillance intrinsèque (propre au matériel) n'a rien à voir avec une défaillance extrinsèque (liée à l'environnement), et en tout état de cause, ne peut s'analyser de la même manière, même si on apporte par la suite un correctif. L'analyse quantitative d'un historique sera traitée dans le paragraphe 1 ; on dispose pour cela d'un outil très important : l'analyse de Pareto. Nous allons en expliquer le principe et voir son application. L'analyse qualitative des défaillances sera vue ensuite. Elle débouchera naturellement sur une aide au diagnostic. Si diagnostiquer une défaillance fait partie du travail quotidien de l'homme de maintenance, la prévoir, afin qu'elle n'arrive pas, est encore mieux. C'est le but de l'analyse prévisionnelle des défaillances.

### 1/- Analyse quantitative des défaillances :

L'analyse quantitative d'un historique va permettre de dégager des actions d'amélioration, donc d'identifier les défaillances à approfondir afin de les corriger et les prévenir. Analyser quantitativement les résultats des diagnostics constitue ainsi un axe de progrès. Les données chiffrées à saisir doivent être les suivantes :

- Dates des interventions correctives (jours, heures) et nombre N de défaillances ; ces éléments permettront de calculer les périodes de bon fonctionnement ( $UT = Up\ Time$ ), les intervalles de temps entre deux défaillances consécutives ( $TBF = Time\ Between\ Failures$ ). Et leur moyenne ( $MTBF$ ) ; ces données permettront de caractériser la fiabilité des équipements ;

- Temps d'arrêt de production (DT = Down Time) consécutifs à des défaillances, y compris ceux des « micro-défaillances » ; tous les événements sont systématiquement consignés, même les plus anodins ; il est toujours plus simple de se rappeler d'une grosse panne que d'une micro-défaillance répétitive qui engendrera à terme une défaillance grave ; l'expérience montre que son oubli fausse complètement une étude de fiabilité ultérieure. Il est prouvé aussi que les micro-défaillances, qui appartiennent à la routine, donc qu'on oublie facilement, sont génératrices de perte de disponibilité, donc de productivité moindre et bien sûr de non qualité ; ces données permettront donc de caractériser la disponibilité des équipements ;
- Durées d'intervention maintenance (TTR = Time To Repair) et leur moyenne (MTTR) ; ces données permettront de caractériser la maintenabilité des équipements.

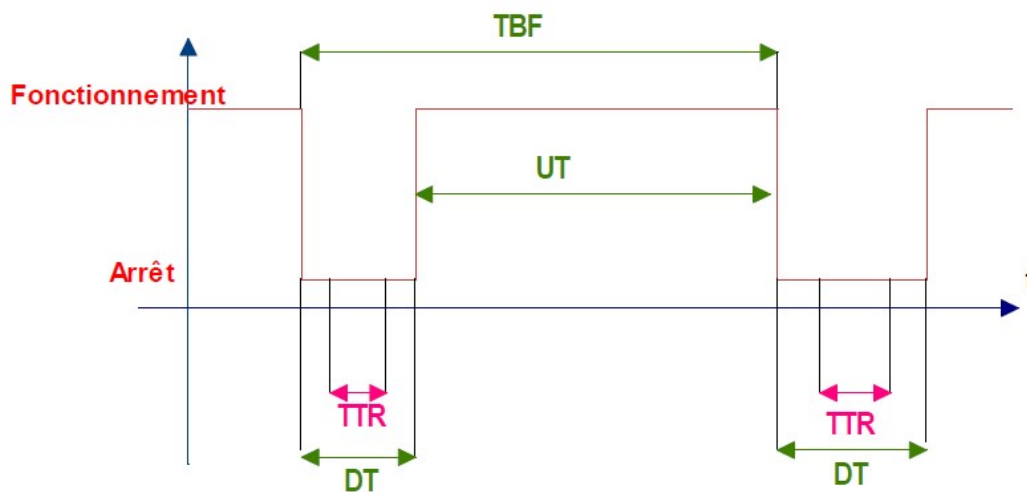


Figure 8: Analyse des temps.

### 1-1/ Méthode ABC (Diagramme Pareto) :

Parmi la multitude de préoccupations qui se posent à un responsable maintenance, il lui faut décider quelles défaillances doivent être étudiées et/ou améliorées en premier. Pour cela, il faut déceler celles qui sont les plus importantes et dont la résolution ou l'amélioration serait le plus rentable, en particulier en terme de coûts d'indisponibilité. La difficulté réside dans le fait que ce qui « est important » et que ce qu'il « l'est moins » ne se distinguent pas toujours de façon claire. La méthode ABC apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités.

On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts, coût financier, nombre, etc..), chaque événement se rapportant à une entité. On établit ensuite un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés. Sur le schéma figure 9, on observe trois zones.

1. Zone A : 20% des pannes occasionnent 80% des coûts ;
2. Zone B : les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires ;
3. Zone C : les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global.

**Conclusion** : il est évident que la préparation des travaux de maintenance doit porter sur les pannes de la zone A.

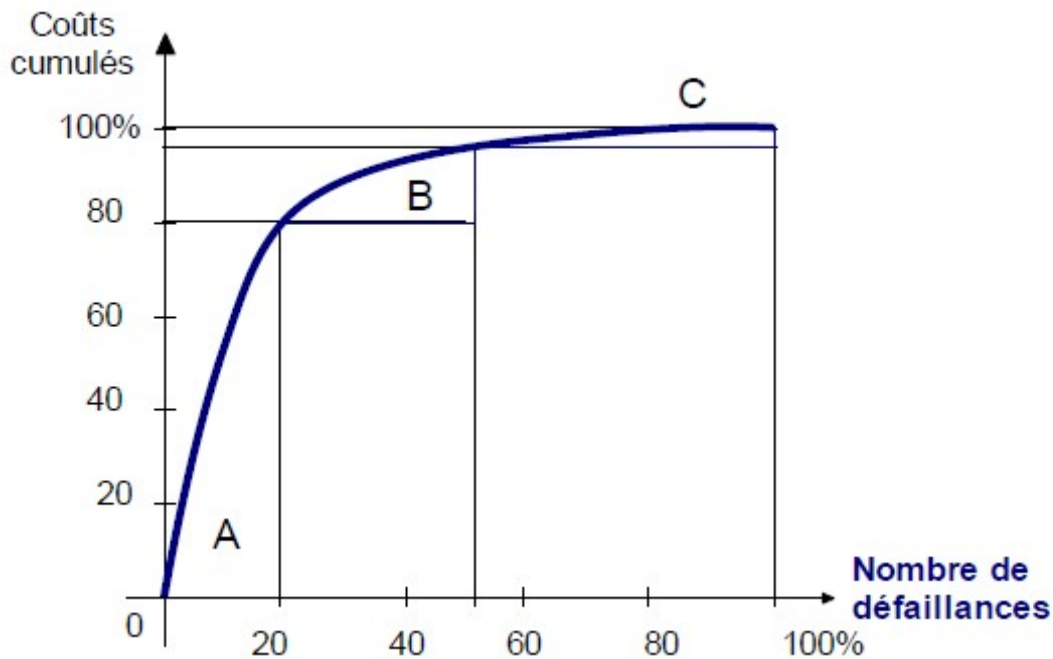


Figure 9: Diagramme de Pareto ou courbe ABC.

En maintenance cette méthode est très utile pour déterminer les urgences ou les tâches les plus rentables, par exemple :

- S'attacher particulièrement à la préparation des interventions sur les défaillances les plus fréquentes et/ou les plus coûteuses (documentation, gammes opératoires, contrats, ordonnancement, etc.),
- Rechercher les causes et les améliorations possibles pour ces mêmes défaillances,
- Organiser un magasin en fonction des fréquences de sortie des pièces (nombre de pièces et emplacement),
- Décider de la politique de maintenance à appliquer sur certains équipements en fonction des heures et des coûts de maintenance.

Attention toutefois : cette méthode ne résout pas les problèmes, mais elle attire l'attention du technicien sur les groupes d'éléments à étudier en priorité.

### 1-2/ Diagrammes de Pareto en N, Nt et $\bar{t}$ :

Le service maintenance peut exploiter cette méthode en allant beaucoup plus loin :

- On dresse un tableau regroupant les sous-ensembles, le nombre de défaillances N, les temps d'arrêt par sous-ensemble Nt et la moyenne des temps d'arrêt  $\bar{t}$  ;
- On élabore les diagrammes en bâtons N, Nt et  $\bar{t}$ ; ils permettront de déterminer la priorité de prise en charge des sous-ensembles par le service maintenance,
- Le graphe en N oriente vers l'amélioration de la fiabilité ;
- Le graphe en Nt est un indicateur de disponibilité, car Nt estime la perte de disponibilité de chaque sous-ensemble ;
- Le graphe en  $\bar{t}$  oriente vers la maintenabilité, c'est à dire l'amélioration de l'aptitude à la maintenance.

### 1-3/ Application :

Une machine comporte 10 sous-ensembles dont on a relevé l'historique des pannes. L'entreprise, qui utilise cette machine, désire augmenter sa productivité en diminuant les pannes sérieuses. Pour cela elle demande au service de maintenance de définir des priorités sur les améliorations à apporter à cette machine. L'historique de la machine fournit le tableau suivant.

Sous-ensembles	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Nombre d'heures d'arrêt	26,5	11	1	57	56,5	1	17	1,5	9,5	1
Nombre de pannes	4	15	4	4	3	8	12	2	3	2

Tableau 1: Historique d'une machine (Application).

**Solution :**

**A-Diagramme ABC :**

Du tableau précédent, on tire le tableau des coûts et des pannes cumulées.

Sous-ensembles	Classement en coût (en h)	Cumul des coûts (en h)	% des coûts cumulés	Nombre de pannes	Cumul des pannes	% des pannes cumulées
D	57	57	31,3	4	4	7
E	56,5	113,5	62,4	3	7	12,3
A	26,5	140	76,9	4	11	19,3
G	17	157	87,2	12	23	40,3
B	11	168	92,3	15	38	66,7
I	9,5	177,5	97,5	3	41	71,9
H	1,5	179	98,3	2	43	75,4
C	1	180	98,9	4	47	82,4
F	1	181	99,4	8	55	96,5
J	1	182	100	2	57	100

Tableau 2: Tableau des coûts et des pannes cumulées (Application).

A partir du tableau ci-dessus, on construit le diagramme de Pareto (figure 5). Les cases grises nous donnent les limites des zones A, B et C. Il est donc évident qu'une amélioration de la fiabilité sur les sous-ensembles D, E et A peut procurer jusqu'à 76,9% de gain sur les pannes.

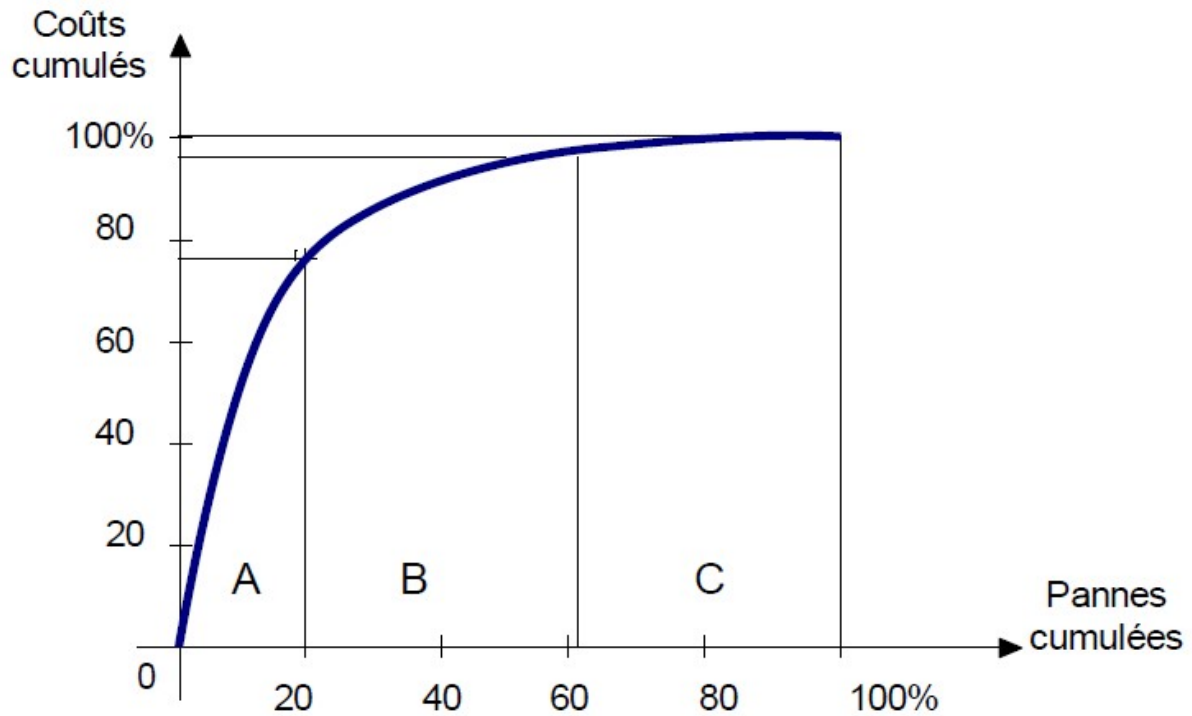


Figure 10: Courbe ABC (Application).

**B – Diagrammes en  $N$ ,  $Nt$  et  $\epsilon$ :**

Sous-ensembles	N	Nt	$\bar{t}$
A	4	26,5	6,625
B	15	11	0,73
C	4	1	0,25
D	4	57	14,25
E	3	56,5	21,83
F	8	1	0,125
G	12	17	1,42
H	2	1,5	0,75
I	3	9,5	3,17
J	2	1	0,5

Tableau 3: Tableau en N, Nt et  $\bar{t}$ .

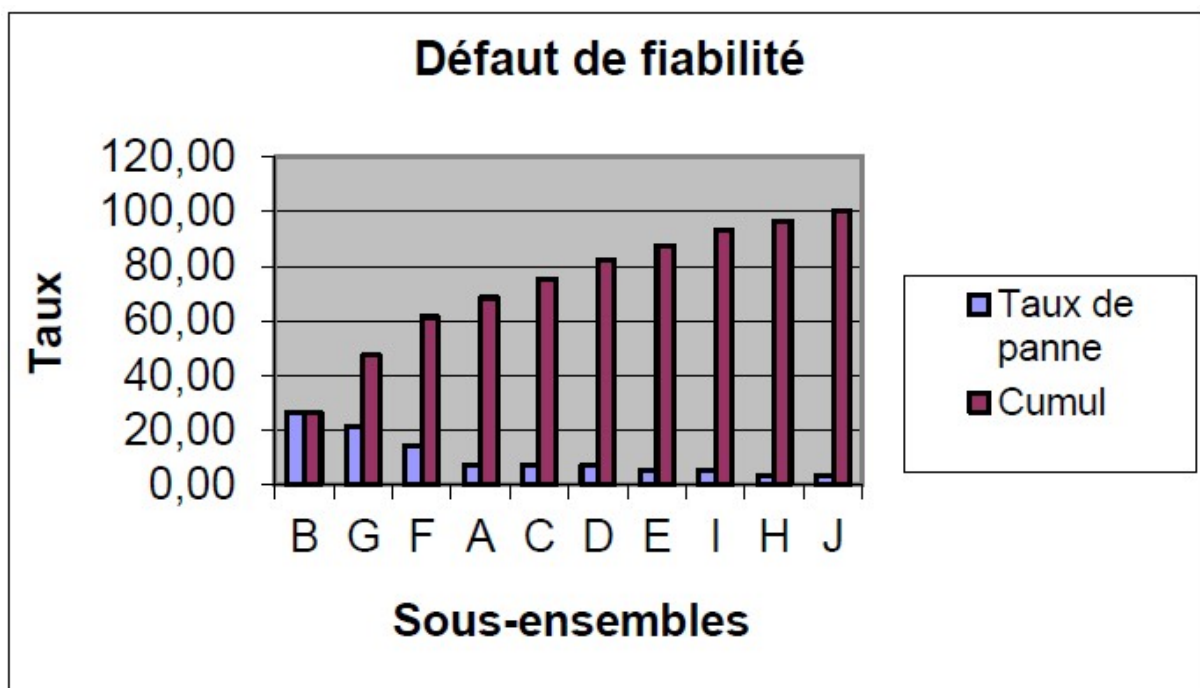


Figure 11: Mise en évidence des éléments les moins fiables (Application).

Le graphe en N (figure 11 oriente vers l'amélioration de la fiabilité : ici on constate que les sous-ensembles B et G sont ceux sur lesquels il faudra agir prioritairement.

Différentes actions sont envisageables : modifications techniques (qualité des composants), consignes de conduite, surveillance accrue (maintenance de ronde), actions préventives systématiques dans un premier temps, conditionnelle ensuite.

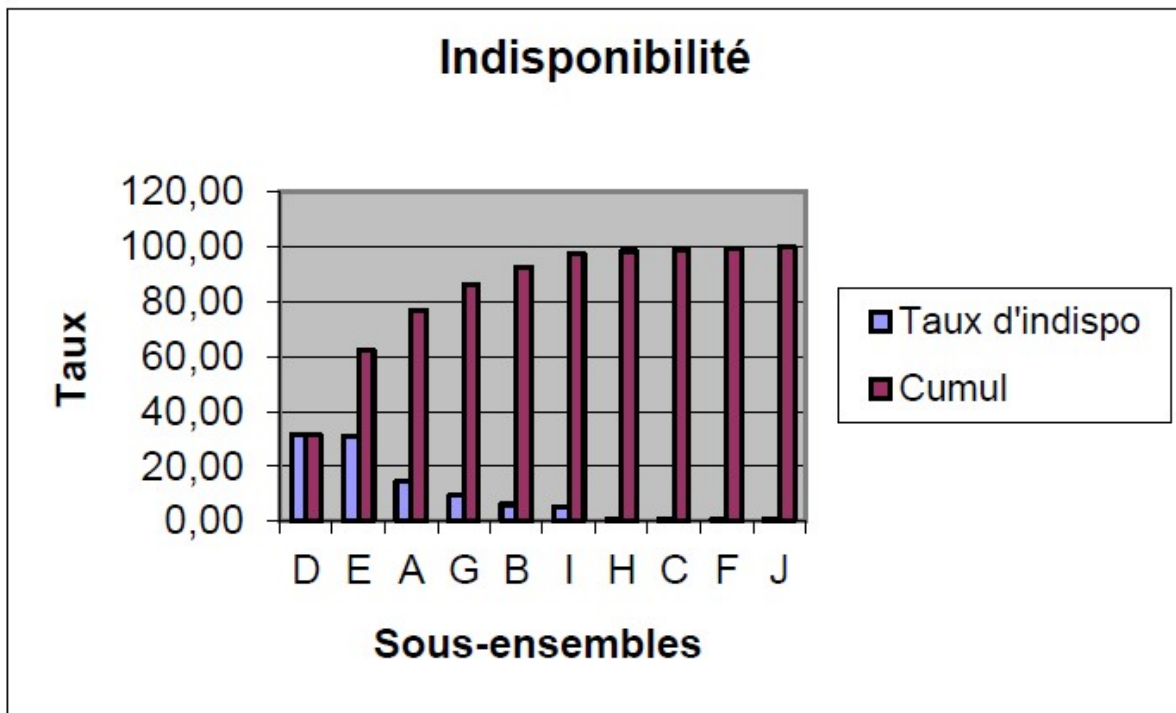


Figure 12: Mise en évidence des éléments les moins disponibles (Application).

Le graphe en Nt (figure 13) est un indicateur de disponibilité, car Nt estime la perte de disponibilité de chaque sous-ensemble. Il permet donc de sélectionner l'ordre de prise en charge des types de défaillance en fonction de leur criticité (ici les sous-ensembles D et E).

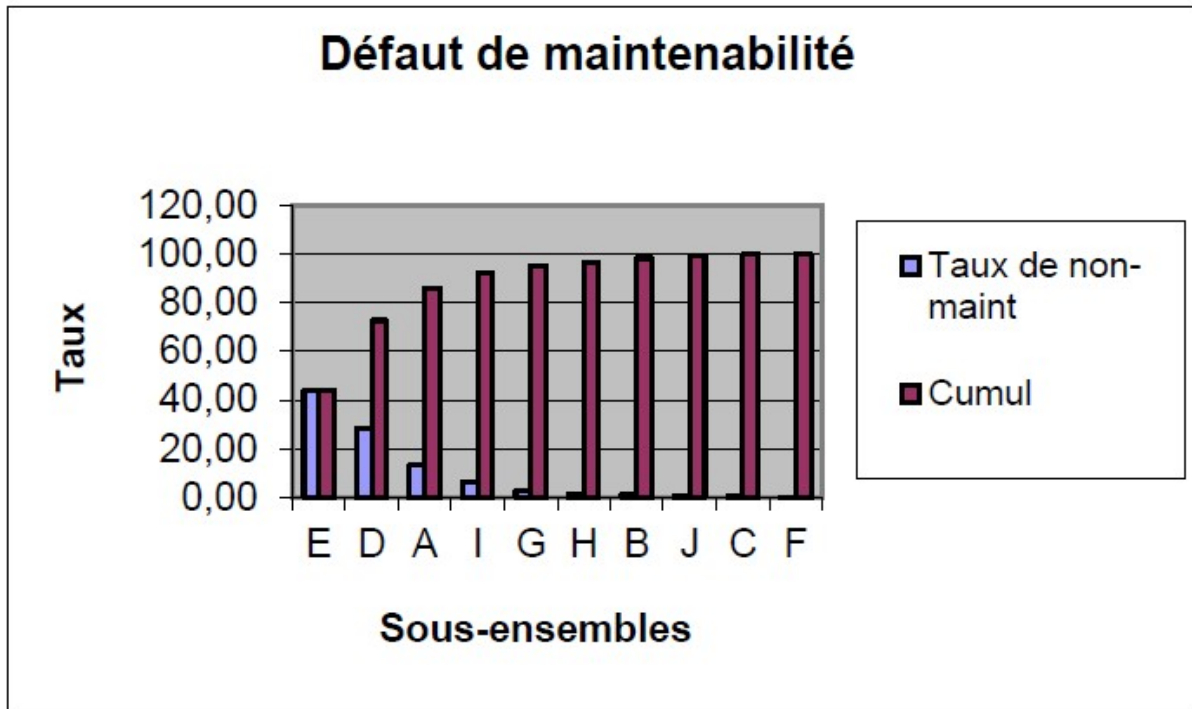


Figure 13: Mise en évidence des éléments les moins maintenables (Application).

Le graphe en  $\bar{\tau}$  (figure 13) oriente vers la maintenabilité, c'est à dire l'amélioration de l'aptitude à la maintenance. Ici, les sous-ensembles E et D présentent quasiment 80% des difficultés de réparation.

Après analyse de  $\bar{\tau}$  (attente maintenance, déplacements, temps de diagnostic, attente de pièce, etc..), il sera possible d'agir sur :

- La logistique (moyens de dépannage, de manutention, etc..),
- L'organisation de la maintenance (gammes d'intervention, formation du personnel, échanges standard, etc..),
- L'amélioration de la maintenabilité (accessibilité, conception modulaire, etc..).

#### 1-4/ Abaque de Noiret :

L'abaque de Noiret est un outil de calcul scientifique qui permet d'orienter le choix de la politique de maintenance en fonction:

- des caractéristiques de l'équipement
- de son utilisation

Le résultat en est une recommandation offrant trois options possibles :

- préventif recommandé
- préventif possible
- préventif non nécessaire

Cependant, ce résultat doit être complété par une analyse économique portant sur le coût des différentes maintenances et sur le retour sur investissement estimé que peut apporter une maintenance préventive.

Il ne s'agit que d'un outil d'aide à la décision et non pas d'un outil de décision.

### Principe

L'abaque de Noiret est basé sur les critères suivants :

- a) l'âge de l'équipement
- b) son interdépendance : dans quelle mesure est-il vital pour la production
- c) son coût
- d) sa complexité et son accessibilité
- e) sa robustesse et sa précision
- f) son origine : France ou Etranger
- g) son utilisation dans le temps
- h) les conséquences de ses défaillances sur les produits
- i) les délais de production qui lui sont liés

Chaque critère se décline en plusieurs options qui chacune correspond à un certain nombre de points. Les points ainsi obtenus sont additionnés.

**Remarque** : un seul choix n'est passible par critère ; il faut donc prendre celui qui est le plus représentatif de l'équipement.

### A) l'âge de l'équipement

Age (ans)	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Points	10	14	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58	62	66	70	74	78	82	86	90

Tableau 4 : nombre de points correspondant à l'âge de l'équipement

Formule de calcul :  $\text{Points} = 90 - \text{âge} \times 4$   
0 ans = moins d'un an.

## B) Interdépendance

Critère	Points
Matériel essentiel et marche continue	70
Matériel essentiel et marche semi discontinue	60
Matériel essentiel et marche discontinue	50
Matériel sans tampon aval ou amont	40
Matériel semi indépendant	30
Matériel indépendant	20
Matériel double (ou plus)	10

Tableau 5 Nombre de point correspondant à l'importance de l'équipement.

## C) Coût

Critère en € Points	Points
Moins de 3000	5
[3000 à 15000[	15
[15000 à 30000[	25
[30000 à 45000[	35
[45000 à 150000[	45
150000 ou plus	55

Tableau 6 : Nombre de points correspondant au cout de l'équipement.

## D) Complexité et accessibilité

Critère Points	Points
Matériel peu complexe et accessible	5
Matériel très complexe et accessible	25
Matériel peu complexe et inaccessible	25
Matériel très complexe et inaccessible	45

Tableau 7: Nombre de points correspondant à la complexité et l'accessibilité de l'équipement.

## E) Robustesse et sa précision

Critère Points	Points
Robuste	5
Courant	10
Robuste et de précision	15
Peu robuste (délicat)	20
Travail en surcharge	25
Délicat et de précision	30

Tableau 8 : Nombre de points correspondant à la robustesse et la précision de l'équipement.

## F) Origine

Critère points	Points
Algérienne de grande série	20
Algérienne de petite série	40
Etrangère avec service après vente en Alegria	50
Etrangère sans service après vente en Alegria	70
Etrangère sans service technique	90

Tableau 9: Nombre de points correspondant à l'origine de l'équipement.

## G) Utilisation

Critère Points	Points
Marche à 1 poste de travail	75
Marche à 2 postes de travail	175
Marche à 3 postes de travail	250

Tableau 10: Nombre de points correspondant à l'utilisation de l'équipement dans le temps.

## H) Perte de produits

Critère Points	Points
Produits vendables	10
Produits à reprendre	35
Produits perdus	55

Tableau 11: Nombre de points correspondant aux conséquences des défaillances sur la machine.

## I) Délais

Critère Points	Points
Délai libre (constitution de stock)	25
Délai serré	100
Délai impératif (risque de pénalités de retard)	150
Délai impératif (risque de pénalités de perte client)	225

Tableau 12 : Nombre de points correspondant aux délais de production qui lui sont liés.

## **4. Arbre de défaillances (ADD)**

### **4.1 Construction de l'arbre de défaillances**

L'arbre de défaillances est un outil déductif et itératif : on part d'un effet pour en trouver ses causes en se posant la question « Pourquoi ? ». A la différence du diagramme « Causes – Effets » ou de l'outil « 5 Pourquoi ? » où chaque cause peut individuellement entraîner l'effet non désiré, l'arbre de défaillances permet, en plus, de mettre en évidence la combinatoire de ces causes. Même si classiquement, un arbre de défaillances est représenté verticalement, on conviendra d'une représentation de l'arbre couché où l'événement redouté est à gauche et les causes s'enchaînent vers la droite.

#### **Définition de l'événement redouté (« sommet de l'arbre »)**

L'événement redouté (ER) est l'événement indésirable pour lequel on recherche toutes les causes, et leur combinatoire, qui y conduisent. Cet événement est unique pour un arbre de défaillances et se trouve à gauche de l'arbre (ou au sommet). Il doit être défini de façon précise afin d'éviter d'avoir une analyse gigantesque ou impossible à faire. Cet événement provient généralement de l'analyse préliminaire de risques utilisée en amont de l'arbre de défaillances.

#### **Portes logiques**

L'arbre de défaillances est particulièrement bien adapté aux événements combinatoires, mais devient délicat à mettre en œuvre quand il s'agit d'événements séquentiels.


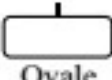


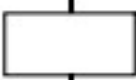

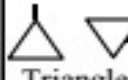

L'analyse débute par la recherche des causes immédiates nécessaires et suffisantes pour obtenir l'événement redouté. Ces causes constituent des événements intermédiaires dont on recherchera les causes et leur combinatoire, et ainsi de suite. A chaque étape, la question pertinente pour rechercher les causes du niveau inférieure est « pourquoi ? ».

Les causes correspondant au niveau le plus à droite (ou plus bas) de l'analyse sont appelées événements élémentaires ou causes racines. Ces causes racines seront identifiées d'une couleur spécifique dans l'arbre (la couleur jaune sera préconisée).

La difficulté de l'arbre de défaillances est de définir le niveau de détail adapté. De façon générale, nous considérons que les événements élémentaires correspondent aux défaillances des composants, un composant étant un sous-système réparable ou interchangeable.

Dans le cas d'un arbre de défaillances mis en œuvre dans le cadre d'une démarche Sureté de Fonctionnement, les événements de base correspondent aux défaillances des sous-systèmes de niveau N-1 définis dans notre décomposition hiérarchique du produit appelée découpage PBS (Product Breakdown Structure).

Dans la réalisation de l'arbre, le groupe de travail veillera à bien rester dans ses limites de responsabilité tout en communiquant les causes identifiées à d'autres intervenants : client, fournisseur...

 Cercle	Evt élémentaire ne nécessitant pas de développement futur	 Ovale	Evt conditionnel qui peut être utilisé avec certaines portes logiques
 Losange	Evt qui ne peut être considéré comme élémentaire, mais dont les causes ne sont et ne seront pas développées	 Double losange	Evt dont les causes ne sont ne sont pas développées mais le seront ultérieurement
 Rectangle	Résulte de la combinaison d'autres évts par l'intermédiaire d'une porte logique	 Maison	Evt qui correspond à un fet. normal du $\Sigma (P=1)$
 Triangle	La partie de l'arbre qui suit le 2 <sup>ème</sup> symbole est transférée à l'emplacement du 1 <sup>er</sup>	 Triangle inversé	Une partie semblable, mais non identique à celle qui suit le 2 <sup>ème</sup> symbole est transférée à l'emplac <sup>1</sup> du 1 <sup>er</sup>

Une des utilisations de l'arbre des défaillances est l'allocation des objectifs de fiabilité à chacun des composants du système par une quantification de type « Top Down » : en partant de l'objectif alloué au système complet (gauche de l'arbre), on donne un objectif de fiabilité à chacune des causes élémentaires (racines de l'arbre). Ainsi, conformément à l'algèbre de Boole :

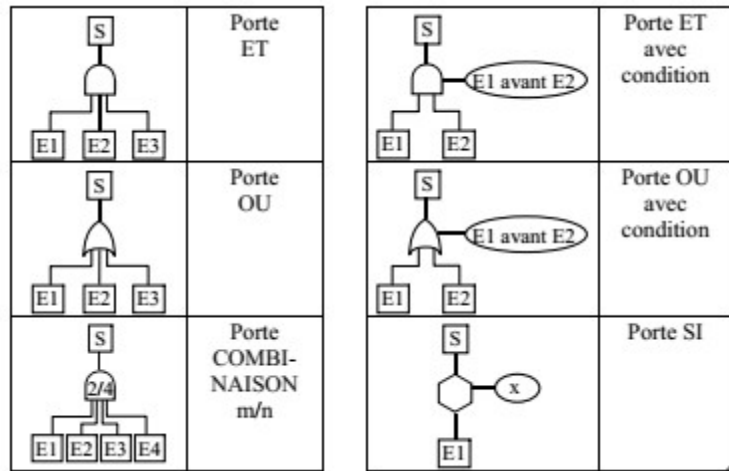
$$\text{Probabilité (A et B)} = P(A) \times P(B)$$

$$\text{Probabilité (A ou B)} = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B) = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B)$$

$P(A) \times P(B)$  est négligeable étant donné que les probabilités  $P(A)$  et  $P(B)$  sont faibles.

Par conséquent, à chaque passage de ET, on prend la racine carré de l'objectif de l'événement supérieur (à gauche) ou on divise cet objectif en traversant un OU. Une répartition peut également être effectuée au prorata des retours observés sur les systèmes de génération précédente.

Cette approche peut donc permettre d'objectiver les valeurs des objectifs de fiabilité alloués aux fournisseurs de sous-systèmes.



### Exemple:

L'arbre de défaillance de la figure ci-contre avec l'évènement redouté:

"Le moteur ne marche pas".

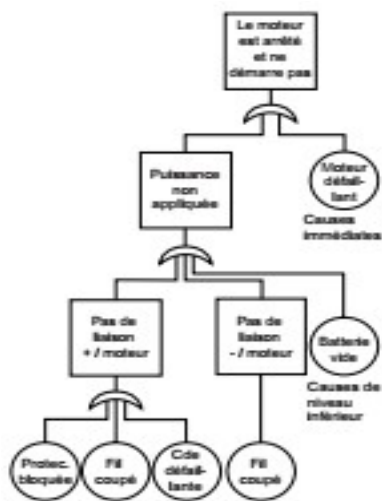


Schéma d'alimentation d'un moteur électrique

## 5 Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)

L'AMDEC est définie comme étant une méthode rigoureuse et préventive visant à recenser puis à évaluer les défaillances d'un système.

Cette méthode est considérée par la plupart des industriels comme l'outil d'analyse de risque le plus pertinent.

### **5.1 AMDEC Produit**

L'AMDEC Produit est utilisée pour fiabiliser les systèmes par l'analyse des défaillances dues aux erreurs de conception. Ce type d'AMDEC est donc initialisé en phase de développement produit au moment de sa conception.

Elle a pour objet de s'assurer que le « Design » répond à l'ensemble des critères du cahier des charges : les modes de défaillance seront considérés comme étant la non-réalisation ou la mauvaise réalisation des critères de performance associés aux fonctions décrites dans l'analyse fonctionnelle du produit.

Cette analyse se décompose en trois parties :

Analyse qualitative : à partir des fonctions du produit, identification des modes de défaillance potentiels, de leurs effets, de leurs causes, des contrôles de conception existants (prévention et détection),

Analyse quantitative : évaluation du risque lié à chaque mode de défaillance (gravité, occurrence, détection IPR),

Plan d'actions correctives pour réduire les niveaux de risque les plus élevés : actions au niveau de la conception du produit et actions pour améliorer les démarches de validation prévues.

### **5.2 AMDEC Process**

L'AMDEC Process est utilisée pour analyser les défaillances générées par le processus de fabrication. Ce type d'AMDEC est idéalement initialisé en phase d'industrialisation au moment de la définition du processus de fabrication et de la conception des moyens.

Elle a pour objet de s'assurer que le processus de fabrication répond à l'ensemble des exigences définies pour la réalisation des opérations : les modes de défaillance seront considérés comme étant la non-réalisation ou la mauvaise réalisation des exigences produit/process associées aux opérations décrites dans la décomposition fonctionnelle

du processus de fabrication (incluant la réception, les flux inter-postes, les contrôles et la livraison). Cette analyse se décompose en trois parties :

Analyse qualitative : à partir des opérations élémentaires de fabrication, identification des modes de défaillance potentiels, de leurs effets, de leurs causes, des contrôles de processus existants (prévention et détection),

Analyse quantitative : évaluation du risque lié à chaque mode de défaillance (gravité, occurrence, détection IPR),

Plan d'actions correctives pour réduire les niveaux de risque les plus élevés : actions au niveau de la conception du produit/process et actions pour améliorer les détections prévues (contrôles).

Le tableau ci-après reprend le formalisme standard utilisé pour les AMDEC Process, quelque soit l'exigence du client.

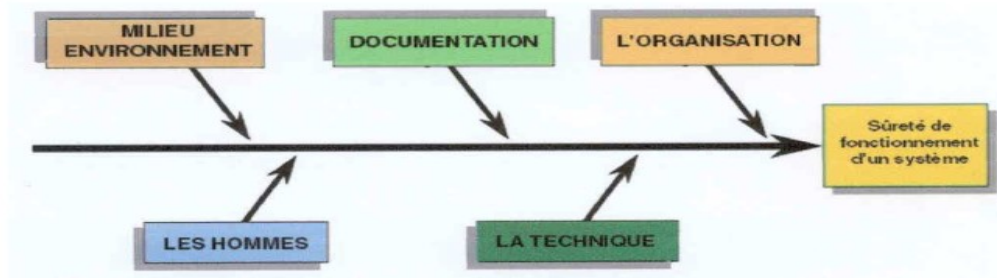
Elément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Evaluation	Détection	Action

### **Le mode de défaillance**

Il concerne la fonction et exprime de quelle manière cette fonction ne fait plus ce qu'elle est sensée faire. L'analyse fonctionnelle recense les fonctions, l'AMDEC envisage pour chacune d'entre-elles sa façon (ou ses façons car il peut y en avoir plusieurs) de ne plus se comporter correctement.

### **La cause**

C'est l'anomalie qui conduit au mode de défaillance. La défaillance est un écart par rapport à la norme de fonctionnement. Les causes trouvent leurs sources dans cinq grandes familles. On en fait l'inventaire dans des diagrammes dits "diagrammes de causes à effets"



Un mode de défaillance peut résulter de la combinaison de plusieurs causes.

Une cause peut être à l'origine de plusieurs modes de défaillances.

### **L'effet**

L'effet concrétise la conséquence du mode de défaillance. Il dépend du point de vue AMDEC que l'on adopte :

- effets sur la qualité du produit (AMDEC procédé)
- effets sur la productivité (AMDEC machine)
- effets sur la sécurité (AMDEC sécurité)

Un effet peut lui-même devenir la cause d'un autre mode de défaillance

### **L'évaluation**

L'évaluation se fait selon 3 critères principaux :

- la gravité
- la fréquence
- la non-détection

Ces critères ne sont pas limitatifs, le groupe de travail peut en définir d'autres plus judicieux par rapport au problème traité.

Chaque critère est évalué dans une plage de notes.

Cette plage est déterminée par le groupe de travail.

exemple :	de 1 à 4 de 1 à 10
-----------	-----------------------

Plus la note est élevée, plus sa sévérité est grande.

Une plage d'évaluation large oblige à plus de finesse dans l'analyse, ce qui peut donner lieu à des controverses au sein du groupe.

Le nombre de niveaux d'évaluation doit être pair pour éviter le compromis moyen systématique sur une note centrale (exemple : éviter les plages telles que 1 à 5 car la note 3 aura tendance à être adoptée trop souvent au titre du compromis).

### **La gravité**

Elle exprime l'importance de l'effet sur la qualité du produit (AMDEC procédé) ou sur la productivité (AMDEC machine) ou sur la sécurité (AMDEC sécurité).

Le groupe doit décider de la manière de mesurer l'effet.

### **Exemple :**

effet sur la dimension d'un produit : effet sur le temps d'arrêt de production

note 1 :	écart inférieur à 0,5%
note 2 :	écart inférieur à 1%
note 3 :	écart inférieur à 5%
note 4 :	écart supérieur à 5%

note 1 :	inférieur à 4 heures
note 2 :	inférieur à 24 heures
note 3 :	inférieur à 1 semaine
note 4 :	supérieur à une semaine

## La fréquence

On estime la période à laquelle la défaillance est susceptible de se reproduire

exemple :

	moins d'une fois par an
note 1 :	moins d'une fois par mois
note 2 :	moins d'une fois par semaine
note 3 :	plus d'une fois par semaine
note 4 :	

## La non-détection

Elle exprime l'efficacité du système permettant de détecter le problème

exemple :

	détection efficace permettant une action préventive
note 1 :	système présentant des risques de non-détection dans certains cas
note 2 :	système de détection peu fiable
note 3 :	aucune détection
note 4 :	

## La criticité

Lorsque les 3 critères ont été évalués dans une ligne de la synthèse AMDEC, on fait le produit

des 3 notes obtenues pour calculer la criticité.

$$C = G * F * N$$

criticité = gravité \* fréquence \* non-détection

Le groupe de travail doit alors décider **d'un seuil de criticité**.

Au delà de ce seuil, l'effet de la défaillance n'est pas supportable. Une action est nécessaire.

## **Les actions**

La finalité de l'analyse AMDEC, après la mise en évidence des défaillances critiques, est de définir des actions de nature à traiter le problème identifié.

Les actions sont de 3 types :

*Actions préventives* : on agit pour prévenir la défaillance avant qu'elle ne se produise, pour l'empêcher de se produire. Ces actions sont planifiées. La période d'application d'une action résulte de l'évaluation de la fréquence.

*Actions correctives* : lorsque le problème n'est pas considéré comme critique, on agit au moment où il se présente. L'action doit alors être la plus courte possible pour une remise aux normes rapide.

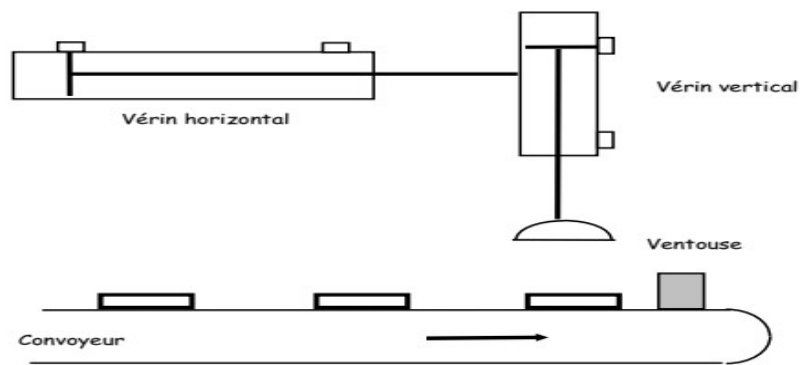
*Actions améliorative* : il s'agit en général de modifications de procédé ou de modifications technologiques du moyen de production destinées à faire disparaître totalement le problème. Le coût de ce type d'action n'est pas négligeable et on le traite comme un investissement

Les actions, pour être efficaces, doivent faire l'objet d'un suivi :

- plan d'action
- désignation d'un responsable de l'action
- détermination d'un délai
- détermination d'un budget
- révision de l'évaluation après mise en place de l'action et retours des résultats.

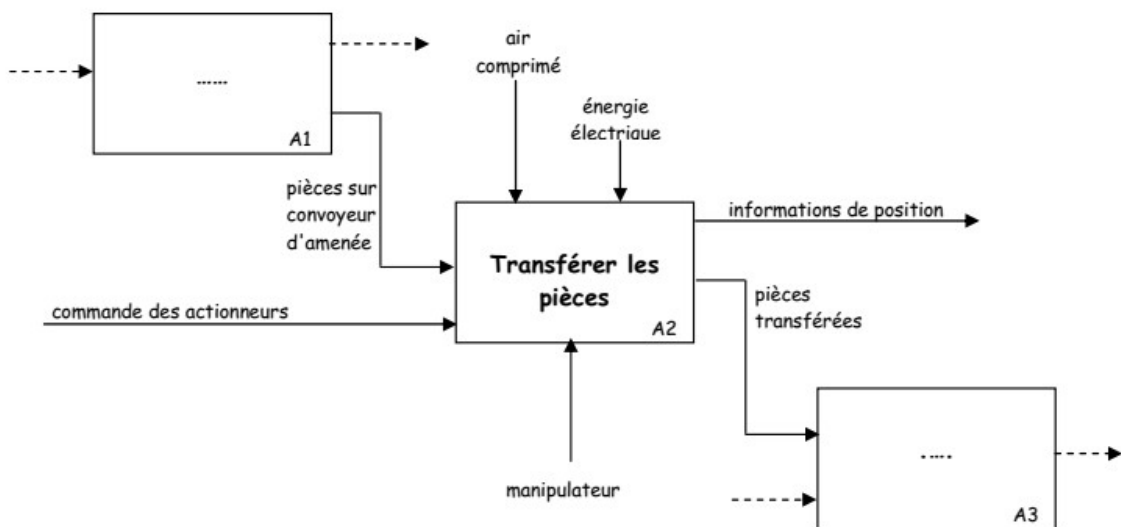
## **Exemple d'application;**

On considère une fonction de transfert de pièces réalisée par un manipulateur pneumatique. Cette fonction est elle-même intégrée dans une fonction de production.



## Analyse fonctionnelle descendante

niveau 0



La fonction A2 "Transférer les pièces" peut elle-même être décomposée en sous fonctions.

## Analyse structurelle

La référence à un dossier technique (électrique, pneumatique, mécanique) est nécessaire.

Manipulateur	Unité verticale	Distributeur électropneumatique de montée Tubes Vérin Limiteurs de débit Capteur vérin haut Capteur vérin bas
	(la commande de ce vérin est monostable)	
	Unité horizontale	Distributeur électropneumatique de sortie Distributeur électropneumatique de rentrée Tubes Vérin Limiteurs de débit Capteur vérin rentré Capteur vérin sorti
	(la commande de ce vérin est bistable)	
	Aspiration	Distributeur électropneumatique d'aspiration Tubes Venturi Ventouse
	(l'aspiration n'est pas contrôlée)	

### Définition des critères

Les critères ci-après répondent à une AMDEC de type machine orientée maintenant

#### La gravité

- note 1 : arrêt production inférieur à 1 heure
- note 2 : arrêt production inférieur à 4 heures
- note 3 : arrêt production inférieur à 1 jour
- note 4 : arrêt production supérieur à 1 jour

#### La fréquence

- note 1 : moins d'une fois par an
- note 2 : moins d'une fois par mois
- note 3 : moins d'une fois par semaine
- note 4 : plus d'une fois par semaine

#### La non-détection

- note 1 : détection efficace permettant une action préventive
- note 2 : système présentant des risques de non-détection dans certains cas
- note 3 : système de détection peu fiable
- note 4 : aucune détection

#### La criticité

$$C = G * F * N$$

Le seuil de criticité est fixé à **8**

Fonction	Matériel ou sous-ensemble	Mode de défaillance	Cause	Effet	G	F	D	C	Détection	Action	
Transférer les pièces	Distributeurs électropneumatiques	Le distributeur ne bascule pas quand il est commandé	Bobine grillée	Cycle bloqué	1	2	3	6	Alarme automate		
			Mauvaise connexion		1	1	3	6			Alarme automate
			Tiroir bloqué		1	1	3	3			
	Tubes	L'air passe mal	Rupture ou pliure	Cycle ralenti	1	1	4	4	Visuel		
	Vérins (vertical et horizontal)	Le vérin ne bouge pas ou très lentement	Vérin grippé	Cycle ralenti	2	2	4	16	Visuel	Contrôle périodique	
			Vérin usé (perte d'étanchéité)		2	2	4	16			
	Limiteurs de débit	L'air passe mal	Limiteur bouché ou mal réglé	Cycle ralenti	1	1	4	4	Visuel		
		Le débit n'est pas réduit	Mal réglé	Course du vérin trop rapide	1	1	4	4			
	Capteurs	Non détection de la position	Mauvais réglage	Cycle bloqué Marche dégradée	1	3	2	6	Alarme automate		
			Capteur grillé		1	3	2	6			
			Mauvaise connexion		1	1	2	2			
		Détection permanente	Capteur en court-circuit	Cycle désordonné	3	2	4	24	Visuel	Contrôle par automate	
Ventouse	Pas d'aspiration	Vent. bouchée	Pas de transfert	1	3	4	12	Visuel	Contrôle		
		Vent. usée	Pas de transfert	1	1	4	4				
Venturi	Pas d'aspiration	Encrassement	Pas de transfert	1	2	4	8	Visuel	périodique		

## II.FIABILITE

## II.1 PARAMETRES NECESSAIRES A LA MESURE DE LA FIABILITE

### II.1.1 - Probabilité

On veut à partir de défaillances enregistrées dans un intervalle de temps déterminé sur une entité, définir la probabilité de défaillance sur la période de fonctionnement qui intéresse l'utilisateur, ou bien à partir de défaillances enregistrées sur un échantillon d'équipement, définir la probabilité de défaillance de la population d'équipements.

- La probabilité d'un événement est un nombre compris entre 0 et 1
- La somme des probabilités de chacun des événements incompatibles est égal à 1

On aura :

$$\begin{array}{l} P_{\text{de défaillance}} + P_{\text{de non défaillance}} = 1 \\ F(t) + R(t) = 1 \end{array}$$

### II.1.2 – Variable « t »

C'est une variable aléatoire qui **peut être continue** (intervalle de temps entre défaillances consécutives d'un matériel : n'importe quelles valeurs de l'intervalle) **ou discrète** (nombre de défaillances d'un matériel sur une période donnée ou pour une quantité fabriquée : elle ne prend que certaines valeurs).

### II.1.3 – Fonction de répartition « F(t) »

C'est la probabilité de subir une défaillance à un instant T compris entre 0 et t.

(Un dispositif mis en service pour la première fois tombera en panne pour la première fois à un instant T non connu à priori).

La fonction de répartition se définit par :

$$F(t) = P(T < t) = \text{nombre de cas favorables} / \text{Nombre de cas possible.}$$

### II.1.4 - Densité de probabilité « f (t) »

C'est la probabilité de subir une défaillance à l'instant « T » compris entre « t » et « t + dt » (c'est à dire juste à l'instant « t »). Dans le cas d'une variable aléatoire continue, la densité de probabilité « f (t) » est la dérivée de la fonction de répartition F(t).

$$f(t) = d/dt F(t)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

### II.1.5 – Fonction de fiabilité « R(t) »

Représente la probabilité de non-défaillance dans l'intervalle de temps entre 0 et t, c'est-à-dire la probabilité de défaillance au delà du temps t (entre t et ∞)

$$R(t) = P(T > t)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$$

C'est aussi la fonction complémentaire de la fonction F(t) :

$$F(t) + R(t) = 1 \text{ donc } R(t) = 1 - F(t)$$

### II.1.6 - Fonction du taux de défaillance λ (t)

C'est la probabilité de subir une défaillance à l'instant « t » pour une entité ayant vécu jusqu'à l'instant « t ».

- Exprimée en général en défaillances par unité d'usage (généralement en pannes / heure).
- Statistiquement, λ (t) caractérise la probabilité de défaillance dans l'intervalle Δt, pour un dispositif ayant vécu jusqu'à l'instant « t ».
- λ (t) est une densité de probabilité conditionnelle car il ne considère que la probabilité de défaillance du matériel encore en fonctionnement.

#### Remarques :

Si f(t) est la densité de probabilité, nous avons λ (t) = f(t)/R(t)

En intégrant l'expression précédente entre 0 et t, on obtient l'expression :

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

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}$$

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda}$$

Cette relation est fondamentale car quelle que soit la loi de fiabilité, elle permet un tracé expérimental de la fiabilité en fonction du temps (L'évolution du taux de défaillance étant connue).

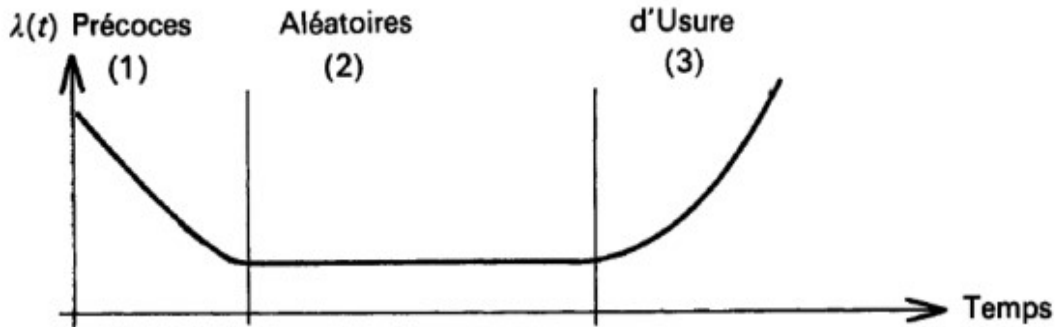


Figure. II.1. Evolution du taux de défaillance d'un équipement

Cette courbe fait apparaître trois périodes distinctes :

### Période 1

Période de défaillance précoce : (ou période de jeunesse) : le taux de défaillance décroît rapidement.

- En mécanique elle peut être réduite par un rodage
- En électrique c'est la phase de déverminage (peut également être un pré-vieillissement des composants).

Maintenance associée : CORRECTIVE (on ne peut prévenir les défaillances de jeunesse qui en plus vont en régressant).

### Période 2

Période de défaillance à taux constant. (ou période de taux constant de défaillance) : C'est la période possible dans la vie d'une entité ou le taux instantané de défaillance est pratiquement constant (défaillance aléatoire).

En électronique, sa durée est plus importante du fait de la meilleure stabilité dans le temps des composants. En mécanique le phénomène d'usure progressif et constant en réduit la durée.

Maintenance associée : CORRECTIVE + VISITES PREVENTIVES ( $\lambda$  est constant et indépendant du temps. L'apparition des défauts est aléatoire, donc imprévisible par nature)

### Période 3

Période de défaillance par vieillissement (ou période de fin de vie) : C'est la période finale de vie d'une entité pendant laquelle le taux instantané de défaillance croît rapidement (défaillance d'usure).

$\lambda$  croît rapidement. Il y a des modes de défaillances prédominants. On peut mettre en place des actions préventives après étude des « causes de défaillances ». Pour une certaine valeur de  $\lambda(t)$ , le matériel est obsolète, il est alors rebuté ou reconstruit.

Maintenance associée : MAINTENANCE PREVENTIVE SYSTEMATIQUE.

Dans le domaine mécanique la loi exponentielle est peu réaliste car les zones 1, 2 et 3 sont peu marquées.

#### **II.1.7 – La M.T.B.F (Mean Time Between Failure)**

Elle est souvent traduite comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement.

En réalité, elle représente la moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances.

$$MTBF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt$$

## II.2. LES FONCTIONS DE FIABILITE

### **F(t) : fonction de répartition**

- Représente la probabilité de défaillance sur l'intervalle [0,t]

### **R(t) Fonction fiabilité**

- Représente la probabilité de défaillance dans l'intervalle [0,t] ,  $F(t) + R(t) = 1$ .

### **f(t) : Fonction densité de probabilité**

- Représente la probabilité de défaillance juste au temps « t »

### **$\lambda(t)$ : Fonction taux de défaillance**

- Représente la possibilité de défaillance entre « t » et « t + dt » pour une entité ayant survécue jusqu'en « t »

### **M.T.B.F**

- Représente la moyenne des temps entre deux défaillances (assimilée à la moyenne des temps de bon fonctionnement)

<b>N(t)</b> : nombre de survivants à la date <b>t</b> (on fait le compte des éléments encore en service)	
$\Delta N(t)$ : mortalité absolue à la fin de la période <b>t</b> (nombre d'éléments défectueux après le dernier inventaire)	
<b>N(0)</b> : nombre de matériel mis en service à la date <b>t<sub>0</sub></b> (il s'agit ici de 300)	
<b>R(t)</b> : Fréquence relative de survivants probabilité de survie (c'est la proportion des éléments encore en service par rapport au nombre initial, peut s'exprimer en %)	$R(t) = \frac{N(t)}{N(0)}$
<b>F(t)</b> : Probabilité d'observer une défaillance avant <b>t</b> (c'est le complément de R(t) )	$F(t) = 1 - R(t)$
<b>f(t)</b> : Proportion des défectueux dans l'intervalle [(t-1) ; t] (c'est la proportion d'éléments défectueux depuis le dernier inventaire par rapport au <b>total initial</b> )	$f(t) = \frac{\Delta N(t)}{N(0)} = \frac{N(t-1) - N(t)}{N(0)}$
<b>Z(t)</b> : Taux de défaillance(ou taux d'avarie); c'est la proportion d'éléments défectueux depuis le dernier inventaire par rapport au total <b>précédent</b>	$Z(t) = \frac{N(t-1) - N(t)}{N(t-1)}$

Tableau 2 – Relations entre $F(t)$ , $R(t)$ , $f(t)$ et $\lambda(t)$				
Fonction	$F(t)$	$R(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$F(t)$		$1 - R(t)$	$\int_0^t f(u)du$	$1 - \exp - \int_0^t \lambda(u)du$
$R(t)$	$1 - F(t)$		$\int_t^\infty f(u)du$	$\exp - \int_0^t \lambda(u)du$
$f(t)$	$\frac{dF(t)}{dt}$	$-\frac{dR(t)}{dt}$		$\lambda(t) \exp \int_0^t \lambda(u)du$
$\lambda(t)$	$\frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1 - F(t)}$	$-\frac{R'(t)}{R(t)}$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(u)du}$	

## II.3. ETUDE DE LA FIABILITE

### II.3.1 Intérêt de l'étude de la fiabilité

L'analyse de la fiabilité d'un système permet de modéliser et de prévoir sa durée de vie (dans le cas d'un système non réparable) ou son temps de bon fonctionnement (dans le cas d'un système réparable). La connaissance de la durée de vie d'un système ou d'un composant

permet de déterminer par exemple les périodicités dans le cas d'une maintenance préventive systématique.

### II.3.2 Calcul de la fiabilité

La fiabilité  $R(t)$  représente la probabilité pour qu'une entité accomplisse une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné. *Remarque* : On peut être amené à utiliser aussi la fonction de répartition  $F(t)$  qui est la fonction complémentaire de  $R(t)$ .

Deux méthodes permettent de faire une étude de fiabilité :

- le modèle exponentiel
- le modèle de Weibull

#### II.3.2.1 Le modèle exponentiel

Il s'applique lorsque le taux de défaillance est considéré **constant**. C'est le cas de la période de maturité. Les pannes sont peu nombreuses et imprévisibles (aléatoires). Les équations suivantes sont donc utilisables :

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

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \text{ et } \sigma = \frac{1}{\lambda}$$

### II.3.3. Fiabilité de système constitué de plusieurs composants

#### • En série

La fiabilité  $R_s$  d'un ensemble de  $n$  constituants connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives  $R_A, R_B, R_C, R_n$  de chaque composant.

$$R_s = R_A * R_B * R_C * \dots * R_n$$



$$R(s) = (e^{-\lambda_A t}) * (e^{-\lambda_B t}) * (e^{-\lambda_C t}) * \dots * (e^{-\lambda_n t})$$

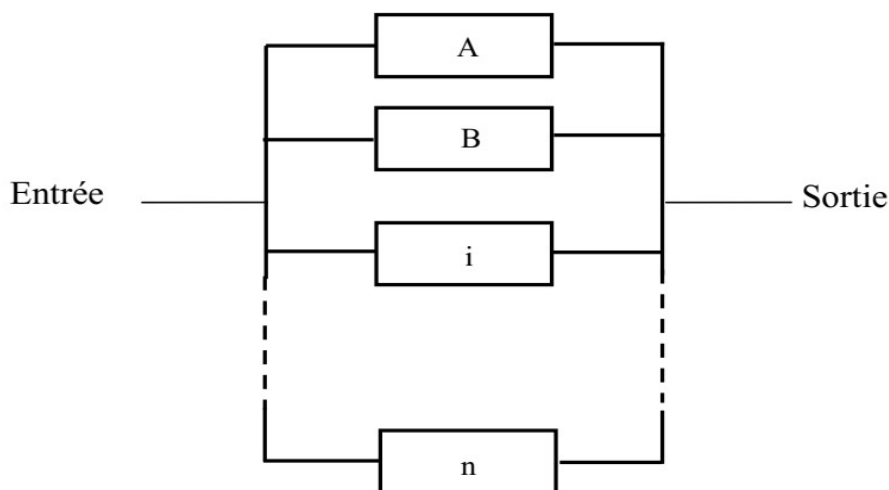
- **En parallèle**

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant les composants en parallèle. Un dispositif constitué de **n** composants en parallèle ne peut tomber en panne que si les **n** composants tombent en panne au même moment.

Si **F<sub>i</sub>** est la probabilité de panne d'un composant, la fiabilité associée **R<sub>i</sub>** est son complémentaire:

$$F_i = 1 - R_i$$

**F<sub>i</sub>** représentant la fiabilité associée.



Soit les "n" composants de la figure ci-dessus montés en parallèle. Si la probabilité de panne pour chaque composant repéré (i) est notée **F<sub>i</sub>** alors:

$$R(s) = 1 - (1 - R)^n$$