



Faculté des Sciences et de la
Technologie Département De Génie
Electrique

Filière : Electromécanique

Matière : *Sûreté de Fonctionnement et Maintenance*

CHAPITRE 3

Partie II

Maintenance

1^{er} Année Master Electromécanique

2019_2020

II LES DEFAILLANCES

II.1 – DEFAILLANCES ET PANNES :

QUELQUES DEFINITIONS (*Norme NF EN 13306*)

A. La défaillance

Cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise.

B. La panne

État d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures.

Remarque : Après une défaillance, le bien est en panne, totale ou partielle. Une défaillance est un événement à distinguer d'une panne qui est un état.

C. Les causes de défaillance

Ce sont les raisons de la défaillance. Les raisons peuvent résulter d'au moins un des facteurs suivants : défaillance due à la conception, à la fabrication, à l'installation, à un mauvais emploi, par fausse manœuvre, à la maintenance.

D. Les modes de pannes

Un mode de panne est la façon par laquelle est constatée l'incapacité d'un bien à remplir une fonction requise.

Remarque : L'emploi du terme "mode de défaillance" dans ce sens est déconseillé par la norme.

E. Le mécanisme de défaillance

Le mécanisme de défaillance correspond aux processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance.

II.2 CLASSIFICATION DES DEFAILLANCES

La classification d'une défaillance peut se faire en fonction des critères suivants (*norme X60-500*) :

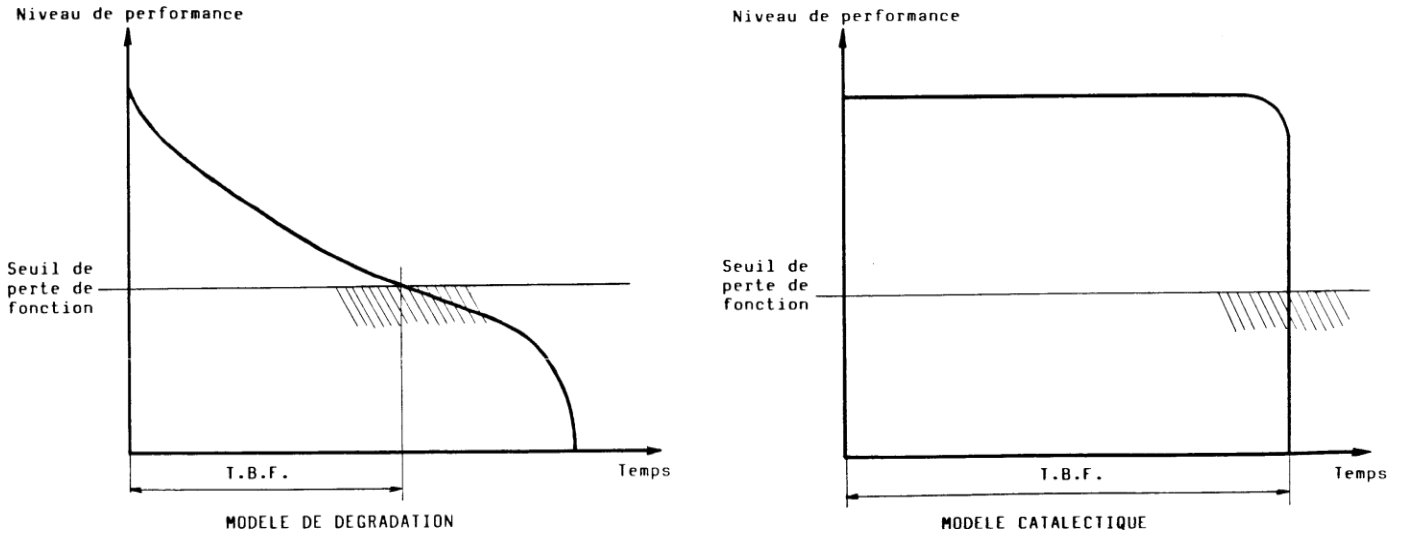
DEFAILLANCE	En fonction de la vitesse d'apparition	Défaillance progressive	Evolution dans le temps de certaines caractéristiques d'une entité
		Défaillance soudaine	Evolution quasi instantanée des caractéristiques d'une entité
	En fonction de l'instant d'apparition	Défaillance en fonctionnement	Se produit sur l'entité alors que la fonction requise est utilisée
		Défaillance à l'arrêt	Se produit sur l'entité alors que la fonction requise n'est pas utilisée
		Défaillance à la sollicitation	Se produit au moment où la fonction requise est sollicitée
	En fonction du degré d'importance	Défaillance partielle	Entraîne l'inaptitude d'une entité à accomplir certaines fonctions requises
		Défaillance totale	Entraîne l'inaptitude totale d'une entité à accomplir la fonction requise
	En fonction de la vitesse d'apparition et du degré d'importance	Défaillance par dégradation	Qui est à la fois progressive et partielle
		Défaillance catalectique	Qui est à la fois soudaine et complète
	En fonction des causes	Défaillance par faiblesse inhérente	Due à la conception ou à la fabrication de l'entité
		Défaillance par emploi inapproprié	Les contraintes appliquées dépassent les possibilités de l'entité
		Défaillance par fausse manœuvre	Opération incorrecte dans l'utilisation de l'entité
		Défaillance par vieillissement	Dégradation dans le temps des caractéristiques de l'entité

DEFAILLANCE	En fonction de son origine	Défaillance interne à l'entité	L'origine est attribuée à l'entité elle-même.
		Défaillance externe à l'entité	L'origine est attribuée à des facteurs externes à l'entité elle-même.
	En fonction des conséquences	Défaillance critique	Susceptible de causer des dommages (aux personnes, biens, environnement)
		Défaillance majeure	Affecte une fonction majeure de l'entité
		Défaillance mineure	N'affecte pas une fonction majeure de l'entité
	En fonction de leur caractère	Défaillance systématique	Liée d'une manière certaine à une cause
		Défaillance reproductible	Peut être provoquée à volonté en simulant ou reproduisant la cause
		Défaillance non reproductible	La cause ne reproduit jamais la défaillance

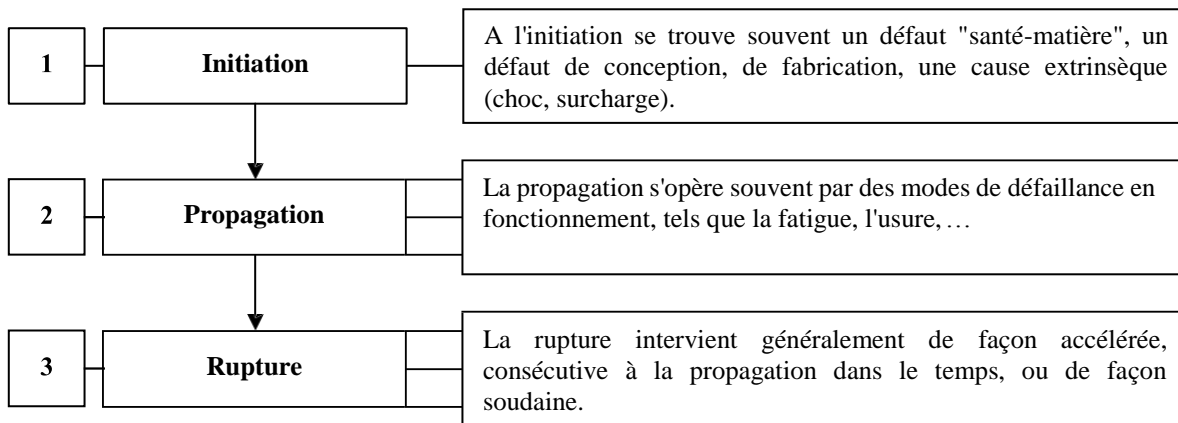
II.3 EVOLUTION DES DEFAILLANCES

II.3.1 Evolution de la défaillance dans le temps

Deux modèles de défaillance peuvent être envisagés selon leur type d'apparition :



II.3.2 PROCESSUS D'EVOLUTION D'UNE DEFAILLANCE MECANIQUE



II.4 – MECANISMES DE DEFAILLANCE

II.4.1 Les défaillances mécaniques

II.4.1.1 – Défaillance par usure

Le mode de défaillance par usure est présent dès que deux surfaces en contact ont un mouvement relatif (plan/plan ou cylindre/cylindre).

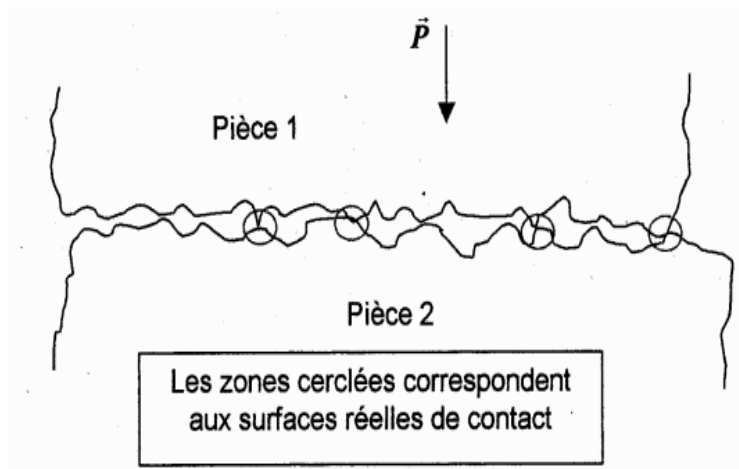
Remarque : Les usures mécaniques provoquent plus de 50% des coûts de maintenance.

a) Définition de l'usure

L'usure est une conséquence du phénomène de frottement entraînant un échauffement puis une production de débris avec perte de dimensions, forme et poids.

b) Mécanisme de l'usure

La surface théorique de contact se limite en fait à de petites aires de contact entre les aspérités plastiquement déformées de chaque surface. Les pressions de contact entre aspérités et la chaleur dissipée créent des microsoudures instantanées constituées d'un composé dépendant de la nature des matériaux en contact. La force de "frottement" est la résultante des efforts de cisaillement qui rompent toutes ces liaisons avec transfert ou libération des particules du composé formé.

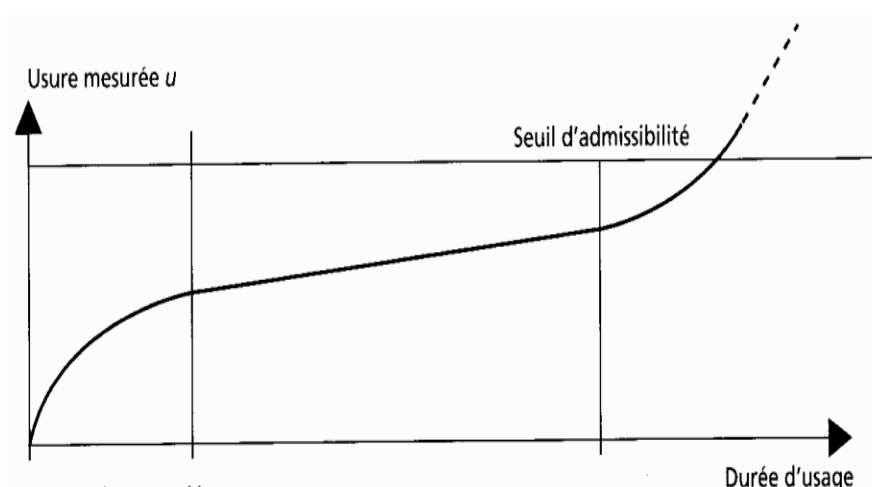


c) Différence entre usure et rodage

Le **rodage** correspond au cas où les déformations de contact sont permanentes mais sans détachement de grains de matière. Il y a adoucissement des aspérités (et augmentation de la zone de contact).

L'**usure** correspond au cas où des grains se détachent.

d) Les lois d'usure



Phase I : **période de rodage** C'est l'abrasion des principales aspérités.

Phase II : **usure stable** L'usure est linéaire et reportée principalement sur l'une des surfaces de contact.

Phase III : **usure catastrophique** Il y a émission de particules qui créent un "labourage" de la surface la plus tendre et une dégradation rapide.

e) **Prévention de l'usure** : les paramètres à prendre en compte : importance du choix des matériaux (coefficients de frottement) importance des éléments de maintenabilité (report d'usure sur la pièce voulue, pièces d'usure, détection des seuils d'usure,...) importance du mode d'obtention des pièces (la rectification augmente l'écaillage des sous-couches par exemple), de leurs traitements thermiques, de leurs traitements de surface (cémentation, nitruration,...) ou de leurs revêtements de surface (céramiques, oxydes métalliques,...) importance des éléments de lubrification (choix des lubrifiants, fréquence des vidanges,...) importance de l'expertise, c'est-à-dire de la compréhension des mécanismes de dégradation observés en exploitation industrielle, pour trouver des solutions amélioratrices.

f) **Paramètres d'usure** : les paramètres mesurables significatifs permettant le tracé d'une courbe d'usure :

paramètres directs	paramètres induits
Dimensions (cotes) Rugosité Dureté Superficielle Masse,...	vibrations Température Taux de compression Chute de pression Perte de débit Rendement,...

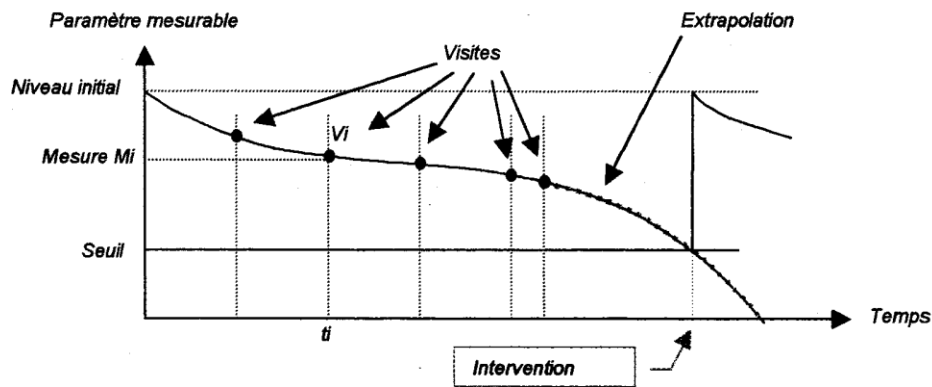
Remarque : Dans de nombreux cas, la mesure et l'enregistrement des paramètres induits ne nécessite pas l'arrêt de l'installation ou un démontage, ce qui n'est pas le cas des paramètres directs. C'est pourquoi, en maintenance préventive conditionnelle, on mesure souvent des paramètres induits.

g) **Exploitation des lois d'usure** : Connaître une loi d'usure, c'est pouvoir anticiper cette usure et donc mettre en place des solutions préventives.

Pour s'approprier cette connaissance, il faudra :

- Identifier et sélectionner un paramètre significatif (direct ou induit)
- Déterminer expérimentalement ou en fonction de données constructeur une performance minimale admissible (seuil) Effectuer des relevés (mesures) à des périodicités à définir
- Tracer la loi d'usure à partir des valeurs relevées
- Extrapoler la courbe pour déterminer la date d'intervention Préparer et programmer l'intervention

Remarque : Un retour d'expérience est souhaitable pour affiner les valeurs du seuil et des périodicités de visites.



II.4.1.2 – Défaillances mécaniques par déformation plastique

a) Les différentes déformations

L'essai de traction met en évidence, suivant la sollicitation appliquée à l'éprouvette, une zone de déformation élastique et réversible, puis plastique et non réversible.

La déformation élastique sous contrainte de fonctionnement n'est pas une défaillance en soi, de par sa réversibilité, sauf cas d'application particulier : un allongement peut par exemple créer une perte d'étanchéité.

Par contre, les déformations plastiques permanentes sont des défaillances en elles-mêmes, puisque irréversibles. De plus, elles constituent un risque de rupture ultérieure de nature catalectique, donc dangereux.

b) Déformation plastique sous contrainte mécanique

Ces déformations dues à un dépassement de la limite élastique R_e (à cause d'un choc, d'une surcharge) peuvent être locales (marquage, empreintes sur engrenage) ou étendues à un profil ou une section. Une inspection à ce stade d'apparition d'une striction (zone de diminution de la section) peut prévenir le risque d'une rupture prochaine.

c) Déformation plastique sous contrainte thermique : le fluage

Le fluage est une déformation apparaissant sous contrainte mécanique associée à une température de service supérieure à $0.4 T_f$ (température de fusion), soit à partir de 450°C pour les aciers. La vitesse de fluage peut être rapide (contrainte forte à température faible) ou lente (contrainte faible à température forte).

II.4.1.3 – Défaillances mécaniques par fatigue

On entend par fatigue, la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition conduit à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux.

Le phénomène de fatigue peut apparaître pour des contraintes inférieures à la limite élastique du matériau.

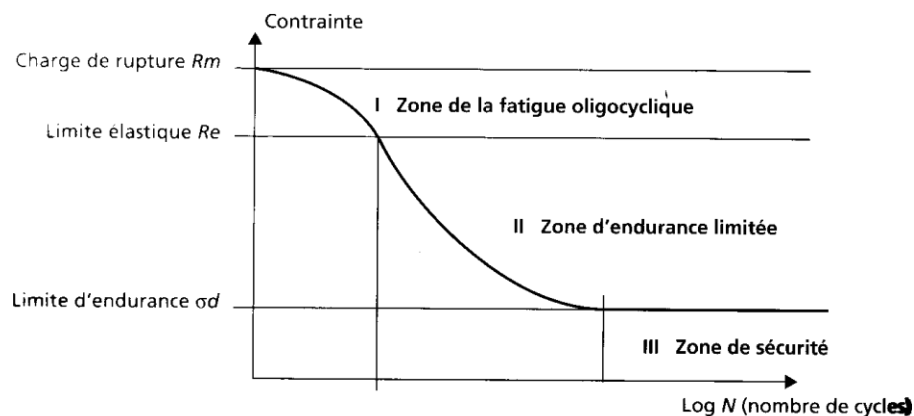
L'origine de la rupture est due à une fissuration progressive qui s'étend jusqu'à ce que la section transversale ne puisse plus supporter l'effort appliqué.

La courbe de Wöhler (ci-dessous) illustre les phénomènes de fatigue sous différentes contraintes.

Zone I : Zone de la fatigue oligocyclique (ou plastique) La contrainte est supérieure à la limite élastique R_e et ne peut être appliquée qu'un nombre limité de cycles.

Zone II : Zone d'endurance limitée La sollicitation est inférieure à la limite élastique et est répétée un certain nombre de cycles.

Zone III : Zone de sécurité Un nombre illimité de cycle peut être appliqué.



Les trois zones de la courbe de Wöhler

II.4.2 Les défaillances par corrosion

La corrosion est l'ensemble des phénomènes chimiques et électrochimiques sur les matériaux métalliques résultant du milieu ambiant. L'influence du milieu ambiant conduit un métal à passer de son état métallique à l'état de sels (oxydes, sulfures, carbonates, ...).

Il est à noter que la corrosion ne fait que conduire à l'état originel du métal, celui-ci existant dans la nature sous forme d'oxydes, de sulfures ou de carbonates (à l'exception de l'or ou du platine que l'on peut trouver à l'état métallique).

II.4.2.1 – Les causes de la corrosion

Les facteurs climatiques et géographiques

- ✚ Degré hygrométrique de l'atmosphère, précipitations
- ✚ Variations de la température et de la pression qui provoquent de la condensation
- ✚ Vents transportant des matières abrasives
- ✚ Degré de salinité de l'air
- ✚ Taux de produits chimiques en suspension dans

l'atmosphère Les assemblages hétérogènes

- ✚ le contact de deux matériaux différents, même non corrodables, peut conduire à la corrosion électrolytique ou chimique.

Les contraintes mécaniques

- ✚ La corrosion se propage et pénètre plus facilement dans un métal sous tensions internes.
- ✚ Un métal écroui est capable de céder des électrons plus facilement qu'un métal recristallisé.

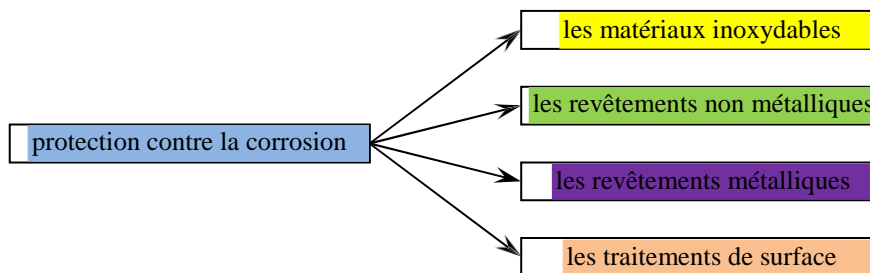
La circulation de courants électriques

- ✚ En présence d'humidité, la circulation de courant dans les assemblages conduit à des phénomènes d'oxydation.

Les traitements thermiques

- ✚ En modifiant la structure d'un métal, un traitement thermique peut faire apparaître une dissymétrie entre les grains et leur voisinage immédiat, et être à l'origine d'une corrosion intergranulaire localisée aux joints des grains.

II.4.2.2– Protection contre la corrosion



Modes de défaillance des pièces plastiques et composites

Les pièces à base de polymères, généralement associées au sein des systèmes à des pièces métalliques, ont des modes de défaillance semblables : usure, fatigue, rupture statique, fluage,...

Par contre, elles sont plus sensibles à l'influence du milieu ambiant : température, rayons ultraviolets, atmosphère,...

II.4.2.3– Rupture mécanique des plastiques

Comme pour les métaux, l'initiation provient d'un défaut matière ou d'une zone faible à partir de laquelle une fissuration va se propager sous contrainte et sous influence de l'environnement.

Les thermoplastiques, formés de chaînes macromoléculaires non liées, se déformeront, évoluant vers une rupture plus ou moins ductile.

Les thermodurcissables, formés de réseaux tridimensionnels, donc peu déformables, évoluent vers une rupture "fragile".

– Vieillessement des composites

Le vieillissement est l'altération des propriétés des matériaux au cours du temps. Il est caractérisé par une modification structurelle par rupture de chaînes de polymères. Il s'agit en général d'un vieillissement "combiné" sous des actions thermiques, photochimiques, atmosphériques, chimiques, mécaniques, ou

biologiques.

II.4.3 Modes de défaillance des parties commandes

II.4.3.1– Modes de défaillance relatifs à la logique câblée

a)relais électromagnétiques

Les modes de défaillance les plus fréquents sont :

- bobine de commande coupée, ou en court-circuit
- contacts soudés, collés fermés, érodés, corrodés ou "rebondissant"
- armature mobile bloquée
- défaut d'isolement d'un contact avec la carcasse métallique

b)composants électroniques passifs

Les résistances ne s'usent pas, mais peuvent subir des surintensités qui créent des coupures ou des courts-circuits. Leur valeur peut être affectée par des variations thermiques.

Les condensateurs s'usent sous tension et ils sèchent hors tension (gare à l'allumage après arrêt prolongé). Les surcharges provoquent la rupture du diélectrique.

c)composants électroniques actifs

Ce sont les transistors et les circuits intégrés, mais aussi les thyristors et les triacs pour les circuits de puissance. De par l'intégration de plus en plus poussée des technologies SSI, MSI, LSI, VLSI contenant des milliers de portes, la fiabilité d'un circuit est plus à considérer collectivement qu'au niveau du composant.

Des tests de détection permettent de dire si le circuit est correct ou non. La localisation permet de situer le défaut au sein du composant.

Les mécanismes de défaillance concernent surtout les jonctions électroniques (semi-conducteurs thermosensibles) et se manifestent par des collages à 0 ou à 1.

Les causes potentielles de défaillance peuvent être :

- les surcharges
- les décharges électrostatiques
- les chocs thermiques
- le fonctionnement à basse température

d)Conducteurs et connexions

La connectique est la source de bien des défaillances intermittentes ou fugitives qu'il faut suspecter et vérifier avant de chercher à localiser des défauts internes. La fiabilité des connecteurs (cosses, soudures,...) devrait être au moins de même valeur que celle des technologies associées, en logique câblée ou programmée.

La fiabilité opérationnelle de la connectique est dépendante des conditions de l'environnement (corrosion

et vibrations principalement).

II.4.3.2 – Modes de défaillance relatifs à la logique programmée

La logique programmée est par nature sensible aux perturbations énergétiques (surtension d'entrée), thermiques et surtout électromagnétiques de l'environnement. Dans un système programmable, se retrouvent les composants actifs et passifs précédents, mais également des composants électroniques programmables, de fonction paramétrable et modifiable.

a) Défaillance des automates programmables

Un automate est plus vulnérable par son intégration à son environnement et par son utilisation que par ses faiblesses intrinsèques. 90% des défaillances proviennent des cartes d'entrée-sortie et sont dues principalement à des surtensions en entrée.

b) Défaillances logicielles

Les défaillances logicielles sont dues principalement à des erreurs humaines ayant pour cause un manque de rigueur (syntaxe), de logique ou d'attention (oublis).

II.4.3.3 – Modes de défaillance par incompatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique est l'aptitude d'un équipement à bien fonctionner dans son environnement électromagnétique, et sans produire lui-même de perturbations à cet environnement (pollution électromagnétique). Les perturbations se matérialisent sous forme de pannes fugitives ou de perte de mémoire. Exemple d'appareils perturbateurs : téléphones portables, radars

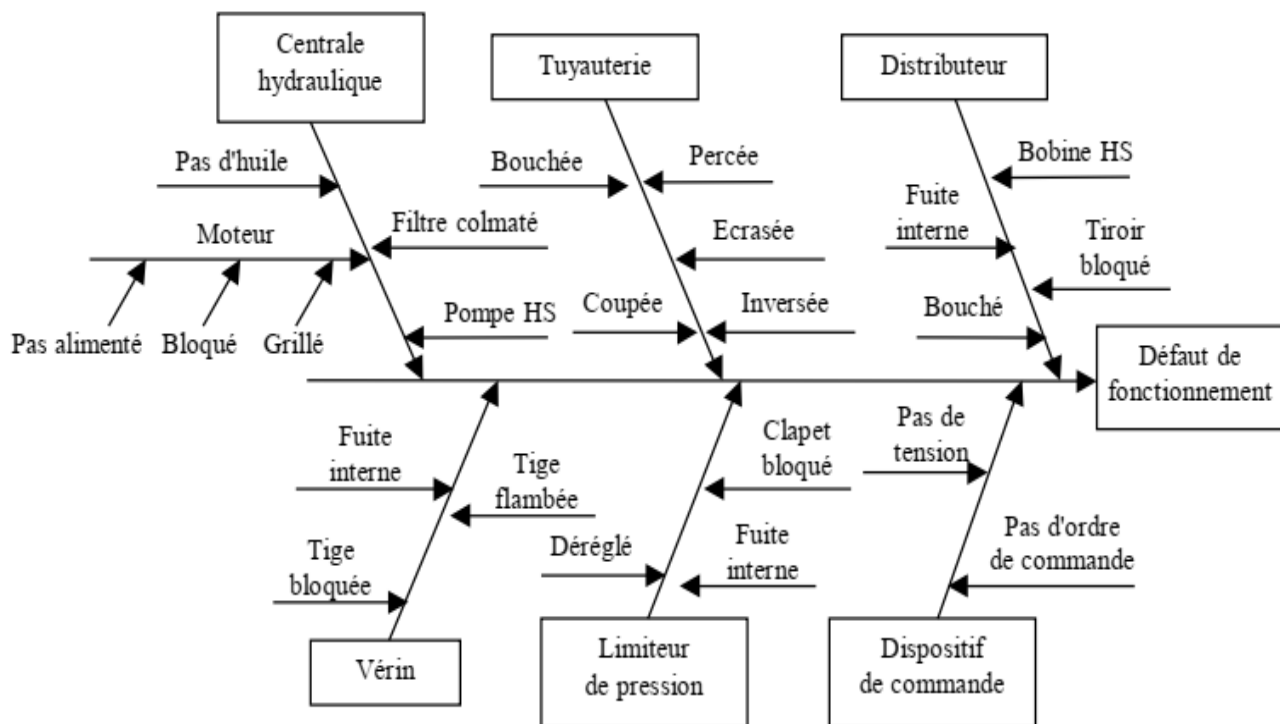
II.5 – OUTILS D'ANALYSE DES DÉFAILLANCES

Outil	Intérêt
diagramme causes-effet = Ishikawa = arête de poisson	recherche des causes d'une défaillance
Q-Q-O-Q-C-P & 5 Pourquoi	analyse de défaillance
graphe de Pareto ou méthode ABC	mise en évidence des actions prioritaires
AMDEC	analyse prévisionnelle des défaillances

II.6 – DIAGRAMME CAUSES-EFFET (ou ISHIKAWA ou en ARETE DE POISSON)

Il s'agit d'une représentation arborescente des liaisons significatives entre un résultat, l'effet, et les multiples causes susceptibles d'en être à l'origine.

Exemple : analyse du défaut de fonctionnement d'une pompe hydraulique



Remarque : En production, il est très courant de limiter les causes à 5 familles : Matière, Matériel, Main d'œuvre, Méthode, Milieu. C'est la **méthode des 5 M**.

II.7 – Q-Q-O-Q-C-P

Quoi ? Qui ? Où ? Quand ? Comment ? et à chaque fois Pourquoi ?

Qu'il s'agisse d'analyser une défaillance, d'organiser un poste de travail, la logistique des flux, la conduite d'une réunion, une procédure administrative, ... l'emploi rigoureux de cette démarche contribue incontestablement à mettre en œuvre les conditions optimales de performance.

Simplicité et rigueur sont des conditions essentielles à la réussite.

Quoi ? Pourquoi ?

Qui ? Pourquoi ?

Où ? Pourquoi ?

Quand ?

Pourquoi ?

Comment ? Pourquoi ?

La méthode des 5 pourquoi

Les "**5 pourquoi**" postulent que la répétition de la question permet l'analyse exhaustive d'une situation jusqu'à conduire aux meilleurs choix de solutions. La question est posée jusqu'à ce que la réponse ne permette plus de relancer la recherche des causes.

II.8 – GRAPHE DE PARETO ou METHODE ABC

La méthode ABC permet de dégager l'important d'une masse d'informations, de faire apparaître objectivement ce qui est confusément perçu.

Il s'agit d'une méthode de choix qui permet de déceler entre plusieurs problèmes, ceux qui doivent être abordés en priorité. La courbe ABC permet donc de distinguer de façon claire les éléments importants de ceux qui le sont moins et ceci sous la forme d'une représentation graphique. Cette règle de répartition a été définie par Wilfredo PARETO (socio-économiste italien, 1848-1923) on l'appelle aussi la règle des 80-20.

Intérêt de la méthode : Elle permet de ne pas se laisser influencer par des travaux certes utiles, mais de très faible importance par rapport au volume des autres travaux.

Les 2 règles d'or de Pareto : "Ne pas utiliser un éléphant pour écraser une mouche."
"Ne pas utiliser une petite cuillère là où une louche est nécessaire."

Exemple :

Soit une entreprise de sous-traitance de circuits électroniques.

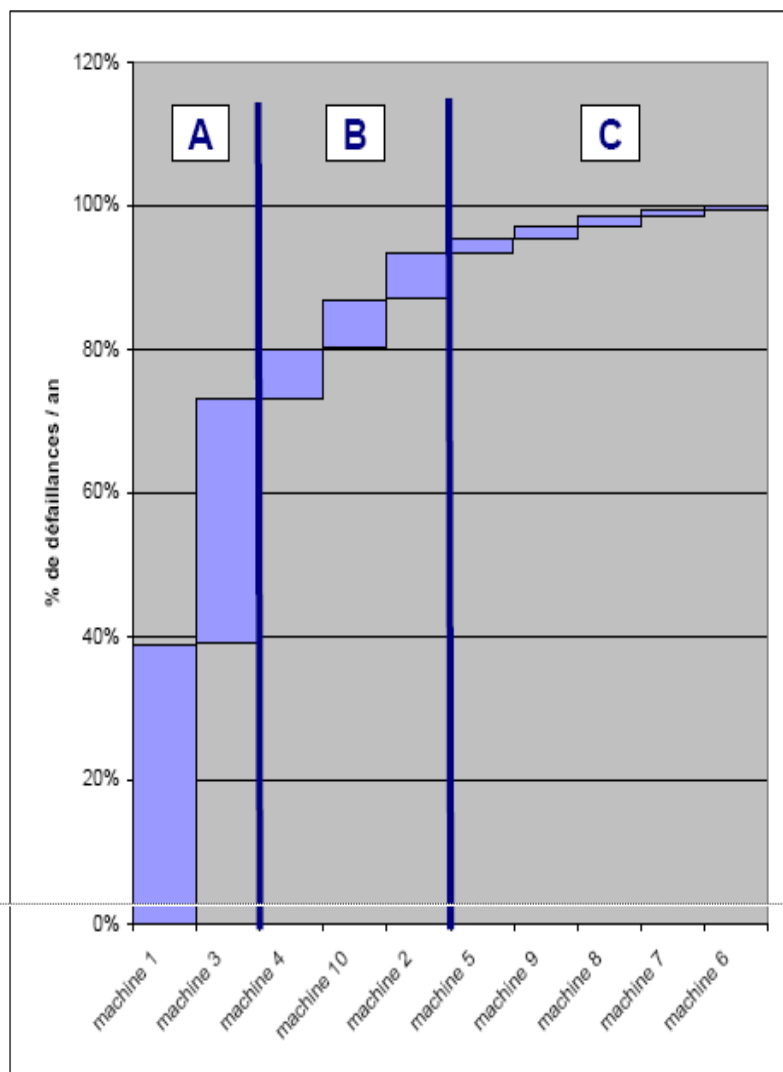
Un atelier d'assemblage de composants CMS comporte un parc de 10 machines.

Une étude réalisée à partir de l'historique des défaillances de l'année passée permet d'établir le nombre de défaillances par machine

Le responsable du service maintenance vous demande de traduire ces chiffres en un graphe de Pareto
Solution :

machines	nb de défaillances / an
machine 1	176
machine 2	29
machine 3	154
machine 4	32
machine 5	9
machine 6	3
machine 7	4
machine 8	6
machine 9	8
machine 10	31

Les machines 1 et 3 sont donc responsables de 73% des défaillances sur l'ensemble du parc



(= ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE, DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE)

II.9.1 Objectifs de l'AMDEC

L'AMDEC est une procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets.

On distingue 2 types d'AMDEC :

- **AMDEC de conception** : Analyse prévisionnelle des défaillances

Amélioration de la conception Définition de la maintenance

- **AMDEC de maintenance** : Analyse des défaillances observées

II.9.2 Méthodologie d'une AMDEC Constitution d'un groupe de travail

Décomposition fonctionnelle du système Evaluation des défaillances potentielles

Amélioration de la maintenance Modification ponctuelle de la conception

Détermination des modes de défaillance, de leurs effets et de leurs causes

Evaluation et notation de chaque cause de défaillance

- D : probabilité de non détection de la cause de la défaillance
- O : probabilité d'apparition ou d'occurrence de la cause de la défaillance
- G : gravité de la défaillance

Calcul de criticité et hiérarchisation

L'indice de criticité C est obtenu par : $C = D \times O \times G$.

Déduction des actions correctives à mener

Exemple d'AMDEC : ANALYSE DU SYSTEME "GASTON"

Niveau 1 : SOCIETE / CLIENT Niveau 2 : SERVICE Niveau 3 : INDIVIDU		Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets			Date : Version : Page :
REF.	DESCRIPTION	MODE	EFFET		CAUSE
			Effet Niveau 2	Effet Niveau 1	
GASTON	Individu pourvu des fonctions marche, mémoire, écriture, parole, ...	• Dégradation fonction marche	• Absence au travail	• Pas de réponse au téléphone → client mécontent	• Chute • Accident
		• Perte fonction parole	• Perte efficacité par manque de communication orale	• Perte de temps dans transmission informations car pas de communications avec le client	• Chute • Accident
		• Perte fonction mémoire	• Non réalisation du travail	• Non avancement de l'étude → client non satisfait	• Chute • Accident