

IV.1 Introduction :

La sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'un système à remplir une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données ; elle englobe principalement quatre composantes : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité. La connaissance de cette aptitude à remplir une ou plusieurs fonctions permet aux utilisateurs du système de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur assure. Par extension, la sûreté de fonctionnement désigne également l'étude de cette aptitude et peut ainsi être considérée comme la « science des défaillances et des pannes ».

IV.2 La fiabilité (en anglais Reliability) :

« C'est l'aptitude (la probabilité) d'une entité à accomplir une fonction requise pendant un intervalle de temps donné, dans des conditions données » (NORME X60—500).

La fiabilité est la probabilité qu'un produit fonctionne correctement sans panne dans des conditions d'utilisation données pendant une durée spécifique.

Il s'agit d'une probabilité, notée $R(t)$.

$R(t)$ = probabilité que l'entité ne soit pas défaillante dans l'intervalle de temps $[0;t]$

Cette définition suppose que soit bien définis :

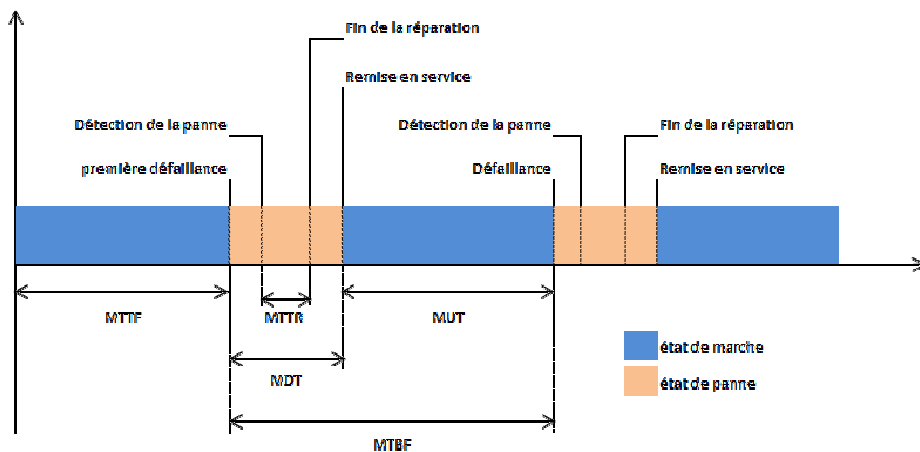
- Les conditions d'utilisation ;
- Le temps moyen souhaité entre les pannes.

IV.2.1 Indices de fiabilité :

IV.2.1.1 Temps moyen de bon fonctionnement : MTBF

MTBF (Mean Time Between Failure) désigne le temps moyen entre défaillances consécutives.

$MTBF = \text{Somme des Temps de Bon Fonctionnement} / \text{nombre de défaillances}$



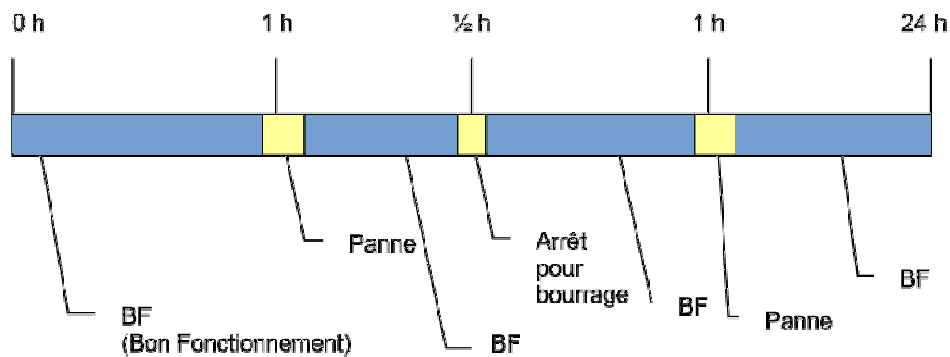
La Somme des Temps de Bon Fonctionnement inclut les temps d'arrêt hors défaillance et les temps de micro arrêts. La MTBF peut s'exprimer en unités plus parlantes pour les opérationnels, par exemple : nombre de pannes pour 100 heures de production. le MTBF est est par définition la durée de vie moyenne du système.

Exemple : un compresseur industriel a fonctionné pendant 8000 heures en service continu avec 5 pannes dont les durées respectives sont : 7 ; 22 ; 8,5 ; 3,5 et 9 heures. Déterminer son MTBF.

$$MTBF = \frac{8000 - (7 + 22 + 8,5 + 3,5 + 9)}{5} = 1590 \text{ heures}$$

Exemple :

Fonctionnement d'un équipement sur 24 heures



$$MTBF = 21,50 / 4 = 5,375 \text{ heures.}$$

IV.2.1.2 Taux de défaillance λ

Le taux de défaillance instantané est le taux de défaillance d'un système ayant fonctionné pendant une durée t.

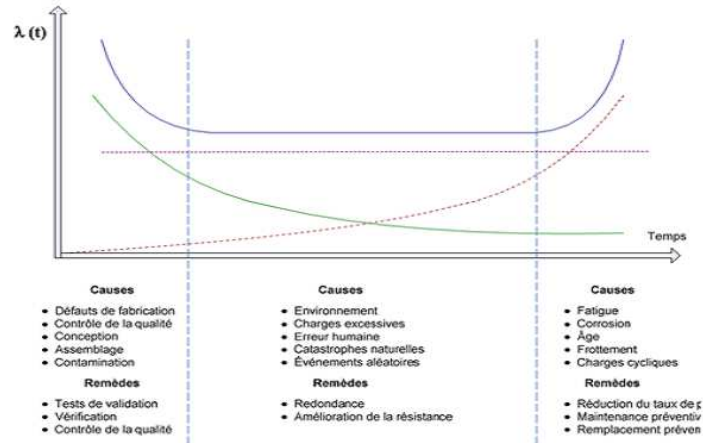
Appelé également taux de panne, il est égal à l'unité de temps sur la MTBF :

$$\lambda = 1 / MTBF$$

Pour l'exemple précédent: $\lambda = 1 / 5,37 = 0,19$ panne / heure

Pour un équipement (système réparable) le taux de défaillance se traduit souvent par une courbe dite « courbe en baignoire » mettant en évidence 3 époques :

- Zone 1 => époque de jeunesse
- Zone 2 => époque de maturité, fonctionnement normal, défaillance aléatoire indépendante du temps
- Zone 3 => époque d'obsolescence, défaillances d'usure ou pannes de vieillesse



Application

On étudie une génératrice suite à son déclassement après 16500 heures. Pendant cette période, la génératrice a cumulée 218 arrêts. Les données sont résumées dans le tableau ci-dessous. On veut savoir quelle est l'évolution de la fiabilité de la génératrice et sa phase d'usure en fonction des intervalles d'arrêts.

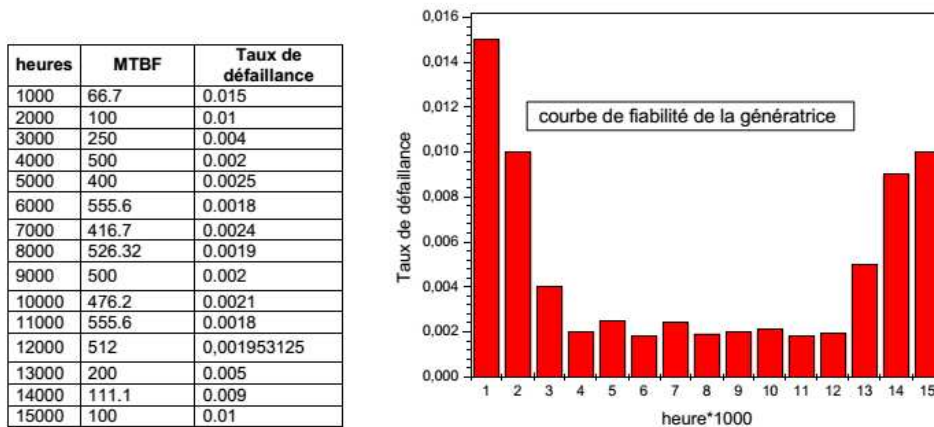
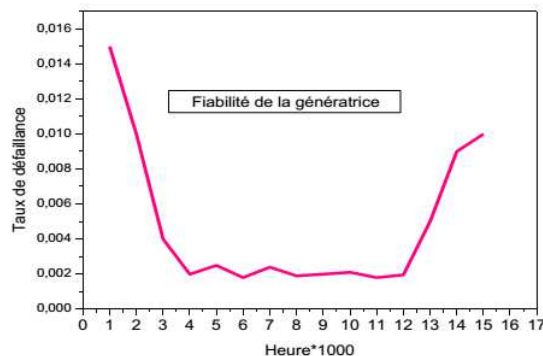


Figure 1.6 : Fiabilité de la génératrice et courbe en baignoire



IV.2.2 Fiabilité des systèmes

Lorsque les équipements sont composés de plusieurs équipements formant ainsi un système, il faut ajuster le calcul de la fiabilité au système. De façon générale, les systèmes sont en série ou en parallèle.

IV.2.2.1 Système en série

Un système constitué de n éléments est dit en série si la défaillance d'un élément entraîne celle du système et si les défaillances sont indépendantes.



La fiabilité du système en série se calcul ainsi :

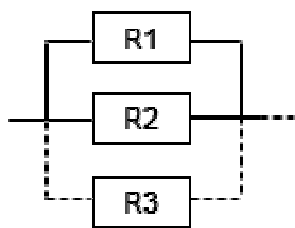
$$R(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times R_3(t) \times \dots \times R_n(t)$$

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots$$

$$MTBF = 1 / \lambda$$

IV.2.2.2 Système en parallèle :

Un système est dit en parallèle s'il suffit qu'un seul des éléments fonctionne pour que le système fonctionne.



$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

La fiabilité du système en série se calcule ainsi :

$$R(t) = 1 - ((1-R_1(t)) \times (1-R_2(t)) \times \dots \times (1-R_n(t)))$$

Remarque :

Plus il y a de composantes en parallèle, meilleure est la fiabilité.

Habituellement, on utilise cette propriété pour accroître la sécurité de fonctionnement d'un système.

Exemple :

- système de freins d'urgence sur une automobile
- deux pompes en parallèle

IV.3 Maintenabilité :

« Dans les conditions d'utilisation données pour lesquelles il a été conçu, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir

une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits. » (NF X60-010).

La maintenabilité caractérise la facilité à remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement. Cette notion ne peut s'appliquer qu'à du matériel maintenable, donc réparable.

« Les moyens prescrits » englobent des notions très diverses : moyens en personnel, appareillages, outillages, etc.

La maintenabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs :

IV.3.1 Calcul de la maintenabilité

La maintenabilité concerne l'action de maintenance comme telle. Par la maintenabilité, on recherche l'optimisation du temps d'intervention afin d'augmenter le temps de production en diminuant les délais dus au :

- temps pour l'attente de pièce de remplacement
- temps pour compléter les documents
- temps de préparation de l'action

Son indice est le MTTR et se calcule de manière suivante :

$$\text{MTTR} = \text{Temps total d'arrêts} / \text{Nombre d'arrêts}$$

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR (Mean Time To Repair) ou encore Moyenne des Temps Techniques de Réparation

Pour l'exemple traité en fiabilité : $\text{MTTR} = 2,5 / 3 = 0,83$ heure

IV.3.1.1 Taux de réparation μ

Il est égal à l'unité de temps sur la MTTR : $\mu = 1 / \text{MTTR}$

IV.4 Disponibilité

« Aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, de sa maintenabilité et de l'organisation de la maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées » (NF X60-010).

Pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité, il doit :

- Avoir le moins possible d'arrêts de production
- Être rapidement remis en bon état s'il tombe en panne

La disponibilité est un indice qui est en général mesuré car il inclut les précédents. Il détermine la disponibilité d'un équipement à effectuer son travail dans le temps. On le calcule ainsi :

$$D = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

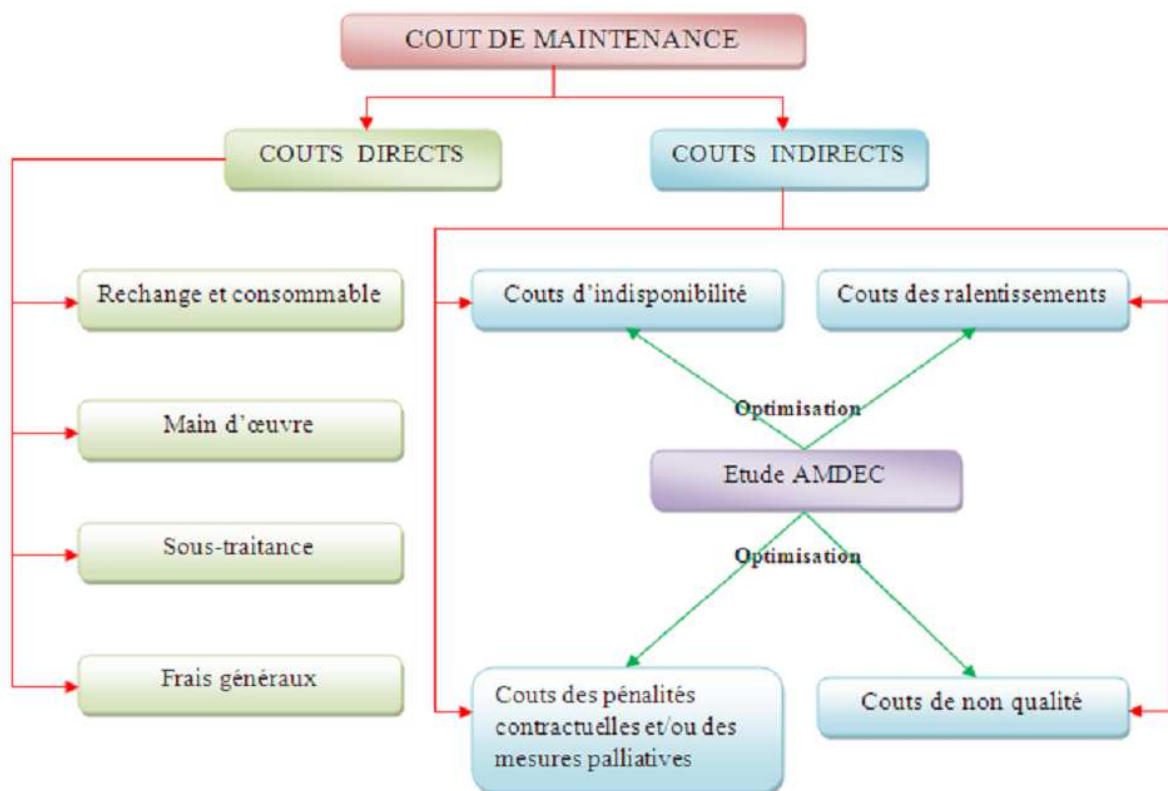
IV-5 la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et leur Criticité)

IV-5-1 Définition :

L'AMDEC est une méthode qualitative et inductive qui définit une règle ou une loi à partir de l'expérience : un raisonnement inductif visant à identifier les risques de pannes potentielles contenues dans un avant-projet de produit ou de système, quelles que soient les technologies, de façon à les supprimer ou à les maîtriser. (Norme AFNOR X 60-510 de décembre 1986.)

IV-5-2 butes et objectifs d'application d'une AMDEC :

L'étude AMDEC permet principalement d'optimiser les coûts indirects (Figure). En effet elle constitue une méthode de diagnostic intelligente dans la mesure où elle permet de prévoir un certain nombre de faiblesses, de défauts, d'anomalies et de pannes au niveau de l'ensemble des éléments qui concourent à la fabrication d'un produit.



La méthode AMDEC a pour objectif aussi à :

- Identifier les causes et les effets de l'échec potentiel d'un procédé ou d'un moyen de production,
- Identifier les actions pouvant éliminer (ou du moins réduire) l'échec potentiel.

IV-5-3 types d'AMDEC :

IV-5-3-1 L'AMDEC « produit » :

Elle est utilisée pour l'aide à la validation des études de définition d'un nouveau produit fabriqué par l'entreprise, elle est mise en œuvre pour évaluer les défauts potentiels du nouveau produit et leurs causes. Cette évaluation de tous les défauts possibles permettra d'y remédier, après hiérarchisation, par la mise en place d'actions correctives sur la conception et préventive sur l'industrialisation.

IV-5-3-2 L'AMDEC « processus » :

Elle est utilisée pour étudier les défauts potentiels d'un produit nouveau ou non, engendrés par le processus de fabrication. Elle est mise en œuvre pour évaluer et hiérarchiser les défauts potentiels d'un produit dont les causes proviennent de son processus de fabrication.

IV-5-3-3 L'AMDEC « moyen de production » :

Elle permet de réaliser l'étude du moyen de production lors de sa conception ou pendant sa phase d'exploitation. A la conception pour améliorer la maintenabilité, la fiabilité donc la disponibilité d'un moyen de production. En cours d'exploitation pour une amélioration liée à une reconception ou pour mettre en place d'un plan de maintenance adapté en fonction de la gravité des risques évalués.

IV-5-4 LA DEMARCHE AMDEC :

La réalisation d'une AMDEC comprend cinq étapes :

IV-5-4-1 Etape 1: Initialisation :

La phase d'initialisation comprend trois étapes qui sont :

- Définition du système et des objectifs à atteindre ;
- Constitution du groupe de travail ;
- Mise au point de supports de l'étude ;
-

1- Définition du système et des objectifs à atteindre :

L'AMDEC est un travail systématique et long, peut générer beaucoup de documents et donc devenir inutilisable. On aura donc intérêt à se limiter à des équipements qui posent problème. De même, les objectifs de l'étude seront précisés en termes d'amélioration attendues de disponibilité, de maintenance ou autre.

2- Constitution du groupe de travail :

Le groupe de travail comprend :

- Un représentant du service procédant à l'investissement du moyen de production.
- Le concepteur du moyen étudié.
- L'utilisateur futur du moyen étudié.
- Le mainteneur futur du moyen étudié.
- Un spécialiste (expert d'un sujet traité ponctuellement).
- Les services : qualité, fiabilité, sécurité,...

3- Mise au point de supports de l'étude :

Les méthodes d'évaluations des facteurs (Gravité, Fréquence, Détection, Criticité) seront plus détaillées au moment d'évaluation de la criticité. Une feuille d'analyse AMDEC est à réaliser Selon les sources, il existe plusieurs types de fiches AMDEC :

ANALYSE DES MODES DE D2FAILLANCE, DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE						AMDEC						
Système :..... Sous-système :.....				Phase de fonctionnement ;.....		Date analyse :.....			Page :...			
N°	Elément	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action corrective	
							F	G	D	C		

IV-5-4-2 Etape 2: Analyse fonctionnelle « AF » :

L'analyse fonctionnelle a pour but d'identifier la fonction de chaque élément étudié pour prévoir les modes de défaillance possibles (détaillée dans le chapitre 3).

IV-5-4-3 Etape 3 : Analyse des défaillances :

A partir de l'analyse fonctionnelle, la démarche AMDEC consiste en une recherche :

- Des modes de défaillance ;
- Des effets de défaillance ;
- Des causes de défaillance ;
- La criticité de défaillance ;

1- Défaillance :

C'est le résultat d'un non fonctionnement, ou d'un non satisfaction aux spécifications, généré par une pièce ou un ensemble. La défaillance peut être :

- Complète : il s'agit de la cessation de la réalisation de la fonction d'un dispositif.
- Partielle : il s'agit de l'altération de la réalisation de la fonction d'un dispositif.

Remarque : Modes de défaillance génériques : La norme AFNOR X 60510 propose une liste de 33 modes de défaillance relatifs aux parties « commande », mais généralement on travaille avec 5 modes de défaillance génériques suivants:

Perte de la fonction.

- Fonctionnement intempestif.
- Refus de s'arrêter.
- Refus de démarrer.
- Fonctionnement dégradé.

2- Cause de défaillance :

C'est l'événement à l'origine du mode de défaillance, la ou les causes sont à rechercher à la conception, la construction, l'installation, l'utilisation et la maintenance de l'équipement.

Remarque : plusieurs causes peuvent être associées à un même mode de défaillance, ainsi une même cause peut provoquer plusieurs modes de défaillance.

3- L'effet constaté :

C'est la conséquence de la défaillance sur laquelle on distingue deux types :

- L'effet global : c'est la conséquence de défaillance sur la mission du système et sa sécurité.
- L'effet local : c'est la conséquence de défaillance au niveau du sous-système étudié.

4- Détection :

Ce sont les symptômes (anomalies, indicateurs,...) observés, détectés qui permettent de repérer assez tôt l'évolution d'un mécanisme défaillant.

IV-5-4-4 Etape 4 : Cotation de criticité :

Les modalités de cette cotation sont à définir lors de la mise au point des supports de l'étude, en fonction de l'étude et des objectifs. L'indice de criticité C, aussi appelé nombre de priorité de risque (NPR) ou encore Indice de Priorité de Risque (IPR), est le résultat du produit de La fréquence, de la détection et de la gravité qui caractérise le niveau de fiabilité du système analysé $C = G * F * D$

1- L'indice G :

Relatif aux conséquences provoquées par l'apparition du mode de défaillance en termes de

- Qualité des pièces produites.
- Sécurité des hommes ou des biens.
- Temps d'intervention qui correspond au temps actif de maintenance corrective (diagnostic + réparation ou échange+remise en service). La gravité G est le plus souvent cotée de 1 jusqu'à 5 .

2- L'indice F :

Relatif à la fréquence d'apparition de la défaillance, cette fréquence exprime la probabilité combinée d'apparition du mode de défaillance par l'apparition de la cause de la défaillance. La fréquence F allant de 1 jusqu'à 4 (Tableau III.6).

3- L'indice D :

Relatif à la possibilité de détecter la défaillance (le couple : Mode-Cause de défaillance) avant qu'elle ne produise l'effet. La détection D est évaluée de 1 pour une défaillance détectable, à 4 pour une défaillance indétectable.

Niveau de la gravité G		Définitions
Gravité mineure	1	Défaillance mineure : - Arrêt de production inférieur à 2 minutes. -Aucune dégradation notable du matériel.
Gravité significative	2	Défaillance significative : - Arrêt de production de 2 à 20 minutes, ou repos possible d'intervention. -Remise en état de courte durée ou petite réparation sur place nécessaire. -Déclassement du produit.
Gravité moyenne	3	Défaillance moyenne : - Arrêt de production de 20 à 60 minutes. -Chargement du matériel défectueux nécessaire. -Retouche du produit nécessaire ou rebat (non qualité détectée à la production).
Gravité majeure	4	Défaillance majeure : - Arrêt de production de 1 à 2 heures. -Intervention importante sur sous ensemble. -Production de pièces non-conformes, non détectées.
Gravité catastrophique	5	Défaillance catastrophique : - Arrêt de production supérieur à 2 heures. -Intervention lourde nécessitant des moyens coûteux. -Problème de sécurité du personnel ou l'environnement.

Niveau de la fréquence F		Définitions
Fréquence très faible	1	Défaillance rare: mois d'une défaillance par année.
Fréquence faible	2	Défaillance possible; mois d'une défaillance par trimestre.
Fréquence moyenne	3	Défaillance fréquente: mois d'une défaillance par semaine.
Fréquence forte	4	Défaillance très fréquente: plusieurs défaillances par semaine.

Niveau de détection D		Définitions
Détection évidente	1	Défaillance détectable à 100 % : -Détection à coup sûr de la cause de la défaillance. - Signe avant coureur évidant d'une dégradation.
Détection possible	2	Défaillance détectable : -Signe avant coureur de la défaillance facilement détectable mais nécessitant une action particulière de l'opérateur (visite, contrôle visuel,...).
Détection improbable	3	Défaillance détectable : - Signe avant coureur de la défaillance difficilement détectable, peu exploitable au nécessitant une action au des moyens complexes (démontage, appareillage,...).
Détection impossible	4	Défaillance détectable : -Aucun signe avant coureur de la défaillance.

IV-5-4-5 Etape 5 : Actions menées :

Les actions menées consistent à :

- Classer les problèmes rencontrés ;
- Proposer l'amélioration ;
- Calcul de la nouvelle criticité

Classement des problèmes rencontrés :

Les actions menées sont décidées par le groupe de travail pour pouvoir éliminer tous points critiques. À partir de la valeur de la criticité, on peut classer les problèmes par ordre décroissant et les répartir en différentes classes.

Valeur de la criticité	Politique de la maintenance
$C < 16$	Mise sous correctif.
$16 \leq C < 32$	Mise sous préventif à la fréquence faible.
$32 \leq C < 36$	Mise sous préventif à la fréquence élevée.
$36 \leq C < 48$	Recherche d'amélioration.
$48 \leq C < 64$	Reprendre la conception.

Proposition d'amélioration :

Le choix du type d'action corrective à mettre en place doit être guidé par le critère le plus pénalisant dans la note de criticité par exemple:

- Si la criticité d'une défaillance est élevée du fait de la fréquence, l'action corrective doit viser à la diminuer la fréquence.
- Quand aucune action corrective ne peut permettre de ramener l'indice de gravité au dessous de 4. Il faudrait définir une action visant à maintenir les deux autres critères (fréquence, détection) à une valeur égale à 1.
- De la même manière, quand aucune action corrective ne permet de ramener l'indice de fréquence au dessous de 4. Il faudrait définir une action corrective qui permet de ramener la gravité et la détection à une valeur égale à 1.

Un nouveau calcul de la criticité permet de valider les solutions retenues à partir de l'estimation des nouveaux indices F', G', D' :

- L'indice F' : L'amélioration de la fréquence F s'obtient par une action sur la fiabilité du composant analysé, sur les conditions d'utilisation ou par une action de maintenance préventive systématique.
- L'indice G' : L'amélioration de la gravité s'obtient par une action sur la maintenabilité ou sur l'aptitude à diagnostiquer et à réparer plus rapidement. cela peut entraîner des modifications de conception.
- L'indice D' :L'amélioration de la détection s'obtient en agissant sur la validation de la conception et/ou sur une aide à la supervision par une maintenance préventive.
- L'indice C' : $C' = F' * G' * D'$ qui permettra de quantifier le progrès réalisé.

ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE							AMDEC MACHINE				
Système : SYSTEME DE GRAISSAGE DE MACHINE OUTIL Sous-système : POMPAGE DE LUBRIFIANT				Phase de fonctionnement : MACHINE NORMALE		Date de l'analyse :					
Element	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	Criticité				Action corrective	
						F	G	N	C		
Moteur	Entrainer la pompe	Pas de rotation	Pas d'alimentation	Arrêt machine mano*		1	2	4	8	MPS : contrôle contacteur	
			Absence de commande	Arrêt machine mano*		21	2	4	8		
		Rotation inversée	Moteur HS	Arrêt machine mano*			1	4	4	12	PR : moteur
			Erreur de câblage	Arrêt machine mano*			1	2	4	84	
Crépine d'aspiration	Filter le lubrifiant	Colmatage partiel ou total	Présence d'impuretés diverses au remplissage	Arrêt machine mano*	Visuel (manomètre)	1	3	3	9	MR : grille sur bouchon de remplissage	
			Mauvais filtage	Détérioration crépine	Usure pompe		1	2	3		6
		Pas de débit	Rupture accouplement	Arrêt machine mano*			1	4	4	16	PR : accouplement
			Rupture interne / blocage	Arrêt machine mano* + détérioration moteur			1	4	4	16	
Pompe	Débitier le lubrifiant sous pression	Débit insuffisant	Lubrifiant non conforme	Arrêt machine mano*	Visuel (manomètre)	1	4	2	8	D : formation opérateur	
			Usure interne	Arrêt machine mano*		1	4	3	16		
		Obturation	Impureté dues à l'usure	Arrêt machine mano*	Visuel (manomètre)		1	4	3	12	MPT : vérifier montée en pression
			Raccords desserrés par vibrations / joints défectueux	Arrêt machine mano*	Visuel (manomètre)						
Circuit pompe	Etablir la liaison hydraulique entre la pompe et la soupape de décompression	Fuite								MPT : vérifier montée en pression MPA : resserrer les raccords PR : joints, raccords, tuyaux	

* Cet arrêt machine est commandé par le mano-contact si la pression dans le circuit primaire est insuffisante à la fin du cycle de graissage.

Legende
D : divers
MPT : maintenance préventive trimestrielle
MPS : maintenance préventive semestrielle
MPA : maintenance préventive annuelle
MR : modification à réaliser
PR : pièce de rechange

Références :

1. Introduction au concept FMD : Fiabilité - Maintenabilité – Disponibilité, cours en ligne jackadit
2. Fiabilité, maintenabilité, disponibilité, Pr. Ahmed BELLAOUAR, M.A. Salima, BELEULMI UNIVERSITE Constantine 1
3. Cours : Sécurité de Fonctionnement, W. BENZAOUI, Université Kasdi Merbah-Ouargla