I. 1. INTRODUCTION

Le monde industriel et le monde des transports disposent de machine et d'installation de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des couts d'exploitation et la maitrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes, un rôle prépondérant. [2]

L'intérêt de la maintenance est traditionnellement base sur le fait qu'une défaillance est mauvaise et qu'elle doit donc être prévenue à tout prix. Cette approche est théorique ; il est parfois techniquement impossible de pratiquer une technique préventive et souvent économiquement peu rentable en comparaison des bénéfices potentiels.

Le problème est plutôt de trouver un minimum de maintenance sans porter préjudice à la performance de l'outil de production, à la qualité des produits fabriques, à la sécurité des hommes et des équipements et à la protection de l'environnement.

Alors, dans ce chapitre, nous introduisons l'approche de maintenance, nous donnons les différents types de maintenance et présentons les causes de défaillances.

I. 2. DEFINITION DE LA MAINTENANCE

AFNOR définit la maintenance comme étant "l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé"**(**norme X 60-010**)** [3].

Le terme "maintenir" contient la notion de "prévention" sur un système en fonctionnement. Le terme "rétablir" contient la notion de "correction" consécutive à une perte de fonction. Un " état spécifié " ou un "service déterminé" implique la prédétermination des objectifs à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques.

L'institut allemand de normalisation DIN définit la maintenance comme "l'ensemble des mesures visant à maintenir ou à rétablir l'état prévu d'un bien ainsi qu'à constater et à juger l'état actuel"(norme 31051).

I. 3. LES DIFFERENTES METHODES DE MAINTENANCE

D'après les normes **AFNOR X 60010** et **60011**, on peut distinguer essentiellement deux méthodes de maintenance (voir figure I-1) :

- ***la maintenance corrective***, effectuée après défaillance du matériel,
- ***la maintenance préventive***, effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un matériel. Elle peut opérer :

- ✓ selon un échéancier établi d'après le temps ou le nombre d'unités d'usage : c'est ***la maintenance systématique*** **;**
- ✓ ou en fonction d'un type d'événement prédéterminé et révélateur de l'état de dégradation du matériel (information d'un capteur de mesure, mesure d'une usure, etc.) : c'est ***la maintenance conditionnelle***.

I. 3. 1. La maintenance corrective

Il s'agit d'une "opération de maintenance effectuée après défaillance" (norme AFNOR X 60010). La maintenance corrective correspond à une attitude défensive dans l'attente d'une défaillance aléatoire. Elle s'applique automatiquement aux défaillances soudaines, comme par exemple la rupture brusque d'une pièce mécanique. Hormis ce cas, ce type de maintenance sera réservé à du matériel peu coûteux, non stratégique pour la production, et dont la défaillance aurait peu d'influence sur la sécurité.

La maintenance corrective comprend deux types d'interventions

- *Le dépannage*, appelé aussi maintenance palliative, est une intervention immédiate et rapide visant une remise en état provisoire du matériel. Cette intervention peut être parfaitement justifiée pour des matériels secondaires, sans incidence directe sur la production ; mais elle peut devenir nécessaire par manque de temps dans le cas où on ne peut pas arrêter la production ou par absence de pièces de rechange. Le dépannage est une pratique fréquente en cours de mise au point, de rodage ou au contraire en fin de vie du matériel.

Le dépannage est caractérisé par une faible sécurité puisque la défaillance peut survenir à n'importe quel moment ; il est donc nécessaire d'effectuer une réparation le plus tôt possible.

- *la réparation*, appelée aussi maintenance curative, est une remise en état définitive du matériel, soit directement après une défaillance soit après un dépannage. La réparation se caractérise par une sécurité élevée puisque le risque de défaillance est fortement diminué par rapport au dépannage, et le matériel retrouve pratiquement ses caractéristiques de fonctionnement.

I.3.2. La maintenance préventive

"La maintenance préventive est effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu" (norme AFNOR X 60010). Les interventions sont prévues, préparées et programmées avant la date probable d'apparition d'une défaillance.

Dans la maintenance préventive, on trouve dans une première phase des visites périodiques permettant de suivre l'état du matériel et de connaître les lois de dégradation et les seuils d'admissibilité. Dans une deuxième phase, lorsque le comportement du matériel sera connu, on évoluera vers la maintenance systématique.

I. 3. 2. 1. La maintenance systématique

C'est une « maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage » (norme AFNOR X 60010).

Les interventions sont effectuées à intervalles fixes (par exemple après un certain nombre d'heures de fonctionnement ou nombre de kilomètres, etc.). Ces intervalles sont déterminés d'abord sur la base des préconisations du constructeur, puis ensuite en se basant sur les résultats recueillis lors des visites préventives périodiques.

La maintenance systématique s'applique surtout pour :

- des composants et sous-ensembles du matériel dont les durées de vie sont bien connues ;

- des équipements soumis à une législation impérative (chaudières, appareils sous pression, ascenseurs, etc.) ;

- des équipements à coûts de défaillance élevés (par exemple des équipements faisant partie d'une chaîne de production) ;

- des équipements dont une défaillance met en cause la sécurité du personnel ou des usagers.

Les avantages de la maintenance systématique sont :

- les interventions et les arrêts sont programmés en accord avec la production ;

- le coût de chaque intervention est connu, donc la gestion financière du service maintenance est facilitée.

Les inconvénients de la maintenance systématique sont :

- Le coût des interventions peut fortement augmenter car leur périodicité est calée sur la durée de vie minimum des équipements.

- Le démontage d'un matériel pour un remplacement systématique d'une pièce nécessite souvent le changement d'autres pièces par précaution, ce qui augmente encore le coût de l'intervention. De même, la fiabilité des machines après remontage se trouve parfois réduite du fait d'erreurs humaines.

I. 3. 2. 2. La maintenance conditionnelle

C'est "une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (autodiagnostic, information donnée par un capteur, mesure d'une usure, etc.) révélateur de l'état de dégradation d'un bien » (norme AFNOR X60010).

Cette forme de maintenance permet d'assurer le suivi du matériel pendant son fonctionnement dans le but de prévenir les défaillances attendues.

Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation et le démontage du matériel.

L'intervention n'a lieu que si certains paramètres mesurables atteignent un seuil critique prédéterminé et révélateur d'une défaillance imminente.

Pour pratiquer une maintenance conditionnelle, il est nécessaire que le matériels ‘y prête, c'est-à-dire il faut trouver une corrélation entre un paramètre mesurable et l'état du matériel. Comme exemple de paramètres, on peut citer :

- des paramètres physiques (pression, débit, température, tension, intensité, etc.) ;
- le niveau d'huile ;
- la fréquence de vibration ou le niveau de vibrations et de bruits ;
- les mesures de jeux mécaniques ;
- la teneur en résidus d'usure des lubrifiants (cette teneur permet un diagnostic dans le cas des moteurs et circuits hydrauliques).

Les avantages de la maintenance conditionnelle sont :

- l'utilisation des organes de matériel au maximum de leur possibilité, ce qui permet d'éviter le gaspillage des pièces de rechange et de réduire leur stock ;
- l'élimination des défaillances inattendues, d'où une fiabilité et une productivité supérieures ;
- la réduction des arrêts de production ;
- la réduction de la durée et du coût des interventions, puisque celles-ci sont planifiées.

La mise en place d'une maintenance conditionnelle nécessite :

- une recherche des points de surveillance du matériel et des paramètres à mesurer ;
- l'établissement des seuils d'admissibilité pour chaque paramètre ;
- le choix et l'achat de l'instrumentation de mesure ;
- la formation d'un personnel qualifié pour les relevés de mesures et leur exploitation.[4]

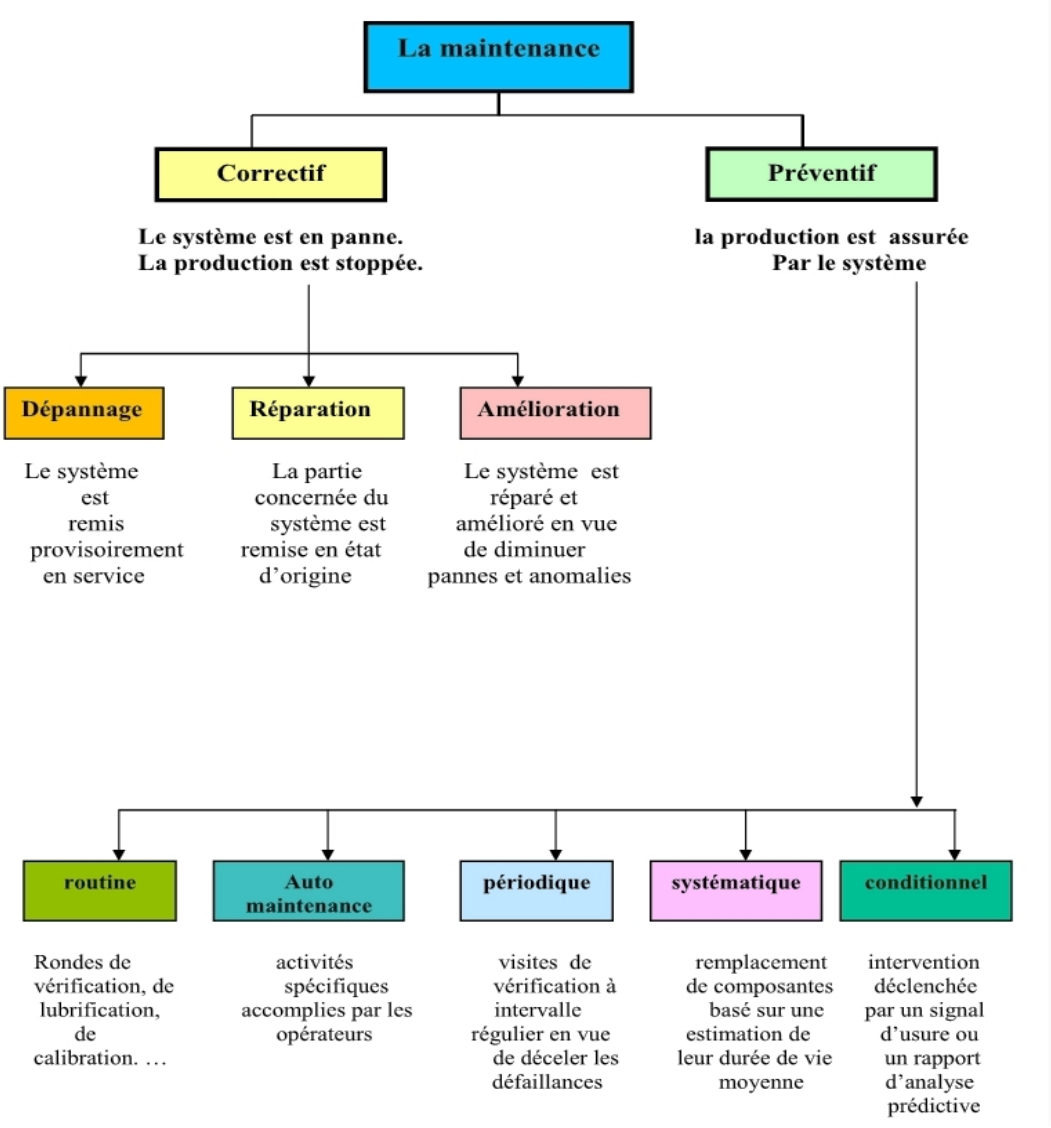

Fig. I. 1: Représentation synthétique de la maintenance

I. 4. NIVEAUX DE MAINTENANCE

Les normes AFNOR préconisent cinq niveaux de maintenance. Une politique de maintenance bien définie doit clairement identifier les niveaux de maintenance réalisés à l'intérieur de l'entreprise et ceux confiés à des entreprises de sous-traitance ou à des constructeurs.

I. 4. 1. Niveau 1

Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles, etc.

Ce type d'intervention peut être fait par l'exploitant du matériel, sur place, sans outillage et à l'aide des instructions d'utilisation.

I. 4. 2. Niveau 2

Dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventives, telles que graissage ou contrôle du bon fonctionnement.

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité déqualification moyenne, sur place, avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance et en utilisant ces mêmes instructions. On peut se procurer les pièces de rechange transportables nécessaires sans délai et proximité immédiate du lieu d'exploitation.

I. 4. 3. Niveau 3

Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures, et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général, réalignement des appareils de mesure.

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien spécialisé, sur place ou dans le local de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance.

Ainsi que des appareils de mesure et de réglage, et éventuellement des bancs d'essais et de contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du matériel, ainsi que les pièces approvisionnées par le magasin.

I. 4. 4. Niveau 4

Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons de travail par les organismes spécialisés.

Ce type d'intervention peut être effectué par une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé doté d'un outillage général (moyens mécaniques, de câblages, de nettoyage, etc.), éventuellement de bancs de mesure et étalons de travail nécessaires, et à l'aide de toutes documentations générales ou particulières.

I. 4. 5. Niveau 5

Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations confiées à un atelier central ou à une unité extérieure.

Par définition, ce type de travaux est donc effectué par le constructeur, ou le reconstructeur, avec les moyens définis par le constructeur, et donc proches de la fabrication.

En règle générale, les qualifications des personnels et les coûts associés s'accroissent avec le niveau de maintenance (tableau I-1). [5]

Niveau	Personnel d'intervention	Nature de l'intervention	Moyens requis
1	Exploitant, sur place	Réglage simple d'organes accessibles sans aucun démontage, ou échanges d'éléments accessibles en dans les consignes de toute sécurité conduite.	Outillage léger défini dans les consignes de conduite
2	Technicien habilité (dépanneur) sur place	Dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou opérations mineures de maintenance préventive	Outillage standard et rechanges situés à proximité
3	Technicien spécialisé, sur place ou en atelier de maintenance	Identification et diagnostics de pannes, réparations par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, de contrôle
4	Équipe encadrée par un technicien spécialisé, en atelier central	Travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Révisions	Outillage général et spécialisé
5	Équipe complète polyvalente, en atelier central	Travaux de rénovation, de reconstruction, réparations importantes confiées à un atelier central Souvent externalisés	Moyens proches de ceux de la fabrication par le constructeur

Tableau I.1 : les Cinque niveaux de maintenance.

I. 5. CLASSEMENT DES MACHINES

Par rapport de classement des machines industrielles et pour ne pas surveiller inutilement des machines qui n'ont pas une importance capitale, les industriels établissent souvent le classement suivant :

- ✓ **Vitales :** machines non doublées dont la panne entraîne l'arrêt de la production. Les frais et les délais de remise en état sont importants. Les pertes de production sont inacceptables.
- ✓ **Importante :** machines doublées ou non dont la panne entraîne une baisse sensible de la production. Les frais et délais de remise en état sont importants, les pertes de production aussi.
- ✓ **Secondaire :** machines doublées ou dont une panne ne remet pas en cause les capacités de production.

I. 6. TECHNIQUES D'ANALYSE

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation (ou de performance).

Il existe différentes techniques d'analyse (figure I.2) tels que l'analyse vibratoire, l'émission acoustique, la thermographie, l'analyse des huiles et des lubrifiants, la variation de résistance dans un circuit électrique, etc…

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts. On établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps.

Sur cette courbe, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance. Ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme (par exemple pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils).

I. 6. 1. L'analyse vibratoire

C'est la plus connue et la plus largement utilisée car elle est adaptée aux composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. [6]

I. 6. 2. L'analyse d'huile

Elle est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, moteurs thermiques…). Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser (particules d'usure) pour déduire l'état de l'équipement.

I. 6. 3. La thermographie infrarouge

Elle présente un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance. Elle est réservée au contrôle d'installations électriques.

Elle est peu utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement.

La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée.

I. 6. 4. L'analyse acoustique

Elle permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement.

I. 6. 5. Le contrôle par ultrasons

Il permet de détecter des défauts de faibles amplitudes à hautes fréquences tels que l'initiation de la dégradation d'un roulement.

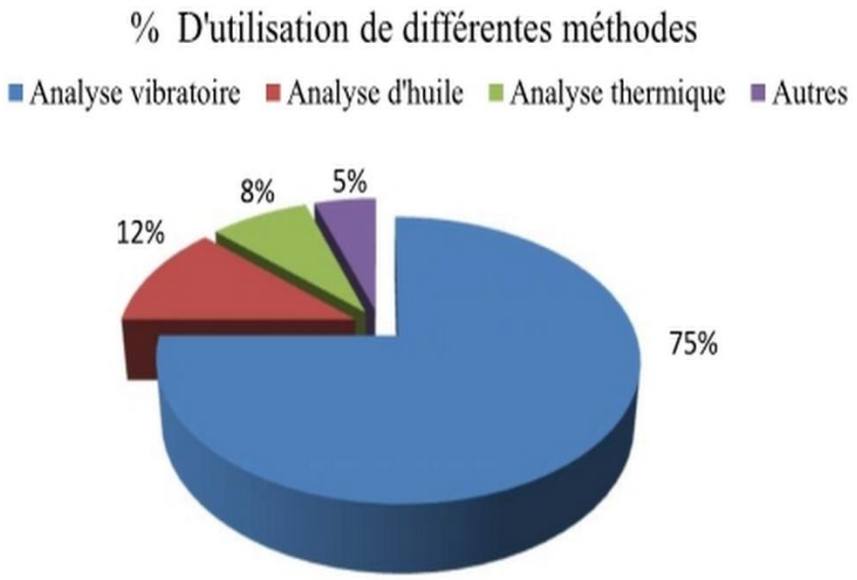

Fig. I. 2 : Différentes méthodes d'analyse

I. 7. CHOIX D'UNE TECHNIQUE D'ANALYSE

Chaque méthode a son champ d'application privilégié. Par exemple, l'analyse vibratoire convient aux défauts liés à la cinématique et à la structure de la machine, mais dans une plage de fréquences déterminées (situées généralement entre quelques Hertz et plusieurs dizaines de KHz).

Elle couvre aussi les défauts spécifiques aux roulements (à plus hautes fréquences). Au-delà de 20 KHz, il est souvent préférable d'utiliser un contrôle par ultrasons ou par émission acoustique. L'analyse acoustique se limite à la détection de bruits dans les fréquences audibles, mais lorsque la dégradation d'un roulement se manifeste en une fréquence audible, il est souvent trop tard pour intervenir.

L'analyse d'huile consiste principalement à analyser les particules présentes dans l'huile, ce qui va révéler une usure anormale d'un ou plusieurs organes. Elle doit être appliquée dans le cas de machines où l'huile joue un rôle primordial et lorsque l'analyse des débris d'usure est significative [7].

	Principales Avantages	**Principales limitations**	**Champs d'applications privilégié**
Analyse vibratoire	– Détection de défauts a un stade précoce – Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi – Autorise une surveillance continue. – Permet de surveiller l'équipement à distance. (télémaintenance)	– Spectres parfois difficiles à interpréter. – Dans le cas de la Surveillance continue, installations relativement couteuses.	– Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure.
Analyse d'huile	– Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement. – Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules.	– Ne permet pas de localiser précisément le défaut – Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon.	– Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse contamination par le processus (étanchéité), et
Analyse acoustique	– Permet de détecter l'apparition de défauts audibles – Autorise une surveillance continue	– Sensibilité au bruit ambiant. – Diagnostic souvent difficile à réaliser – Problèmes de répétabilité des mesures.	– Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire
Thermog-raphie IR	– Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation. – Interprétation souvent immédiate des résultats.	– Détection de défauts a un stade moins précoce que l'analyse vibratoire – Contrôle limité à ce que " voit" la caméra (échauffements de surface). – Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi.	– Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier).

Tableau. I.2: Différences techniques d'analyse de d'état d'une machine tournante

I. 8. AUTRE TRAVAUX CONNEXES DE LA MAINTENANCE

Ces activités complètent les actions de la maintenance citées ci-dessus et participent pour une part non négligeable à l'optimisation des couts d'exploitation.

I. 8. 1. La rénovation

C'est l'inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défaillants, conservation des pièces bonnes

I. 8. 2. La reconstitution

Elle permet la remise en 'état défini par le cahier de charge initial, qui impose le remplacement de pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes. La reconstruction peut être assortie d'une modernisation ou de modifications.

Les modifications apportées peuvent concerner, en plus de la maintenance et de la durabilité, la capacité de production, l'efficacité, la sécurité, etc.

I. 8. 3. La modernisation

C'est le remplacement d'équipements, accessoires et appareils ou éventuellement de logiciel apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien.

Cette opération peut aussi bien être exécute dans le cas d'une rénovation, que celui d'une reconstruction.

I. 8. 4. Les travaux neufs

L'adjonction à la fonction maintenance de la responsabilité des travaux neufs, est très répandue, en particulier dans les entreprises de taille moyenne. Elle part du principe que, lors de tout investissement additionnel de remplacement ou d'extension, il est logique de consulter les spécialistes de la maintenance qui, d'une part, connaissent bien le matériel anciennement en place, et d'autre part auront à maintenir en état de marche le matériel nouveau.

A partir de là, on prend souvent la décision de leur confier l'ensemble des responsabilités de mise en place des nouvelles installations. On crée alors un service appelé (maintenance-travaux neufs)

I. 8. 5. La sécurité

La sécurité est l'ensemble des méthodes ayant pour objet, sinon de supprimer, du moins de minimiser les conséquences des défaillances ou des incidents dont un dispositif ou une installation peuvent être l'objet, conséquences qui ont un effet destructif sur le personnel, le matériel ou l'environnement de l'un et de l'autre.

Sachant qu'un incident mécanique, Une panne, peuvent provoquer un accident, sachant aussi que la maintenance doit maintenir en état le matériel de protection ou même que certaines opérations de maintenance sont-elles mêmes dangereuses, il apparait que la relation entre la maintenance et la sécurité est particulièrement étroite. [4]