



www.afnor.org/editions

Driss Bouami

Le GRAND LIVRE *de la* MAINTENANCE



Concepts,
démarches,
méthodes, outils
et techniques

afnor
ÉDITIONS

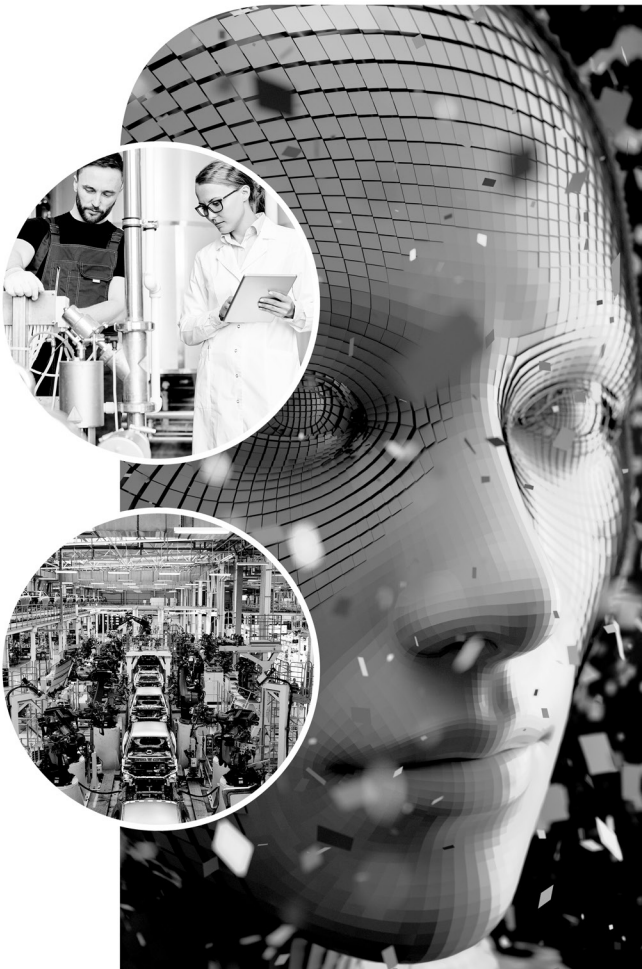
Le **GRAND**
LIVRE *de la*
MAINTENANCE



www.afnor.org/editions

Driss Bouami

Le GRAND LIVRE *de la* MAINTENANCE



Concepts,
démarches,
méthodes, outils
et techniques

afnor
ÉDITIONS



Vous voulez nous faire partager
une remarque ou une suggestion ?
Contactez-nous :
fabrication-editions@afnor.org

© AFNOR 2019

ISBN 978-2-12-465682-0

Édition : Dominique Cohen

Secrétariat d'édition, maquette et mise en page : Gilda Masset

Fabrication : Philippe Malbec

Crédit photo : Adobe Stock, 2019



Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1^{er} juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5, et Code Pénal art. 425).

AFNOR – 11, rue Francis de Pressensé, 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex

Tél. : +33 (0) 1 41 62 80 00 – www.afnor.org/editions

L'auteur

Driss Bouami est docteur d'État en sciences mécaniques de l'université de technologie de Compiègne, ingénieur en génie mécanique de l'École Mohammadia d'ingénieurs de Rabat et détenteur d'un certificat de spécialisation en sciences des matériaux de l'École centrale de Paris. Professeur, directeur de recherche et consultant principalement en maintenance, mais aussi en qualité, *lean management* et sécurité, il est l'auteur de plus de 160 publications et communications dans les domaines précités. Driss Bouami est également ex doyen de la faculté des Sciences et Techniques de Fès, ex directeur de l'École Mohammadia d'ingénieurs de Rabat et ex directeur de l'Office marocain des œuvres sociales pour les étudiants.

Sommaire

Avant-propos	XI
1 Les concepts généraux de la maintenance	1
1.1 Les concepts de la maintenance.....	1
1.2 La maintenance et l'entretien	7
1.3 L'évolution de la maintenance.....	9
1.4 Les enjeux de la maintenance	13
1.5 La maintenance et les 5 M	14
1.6 La maintenance et le cycle de vie.....	17
1.7 La maintenance et la roue de Deming.....	18
1.8 La maintenance centrée sur les dépenses ou sur les résultats	19
1.9 Les meilleures maintenances	21
1.10 Les défaillances	22
1.11 La sûreté de fonctionnement.....	30
1.12 Les coûts de maintenance et <i>Life Cycle Cost</i> (LCC)	74
1.13 Les objectifs de la maintenance	94
2 Les opérations, les niveaux, les échelons et les formes de la maintenance	109
2.1 Les opérations de maintenance.....	109
2.2 Les niveaux de maintenance	112
2.3 Les échelons de maintenance.....	116
2.4 Les formes de maintenance et leur choix.....	117
2.5 La maintenance préventive	125
2.6 La maintenance systématique.....	152

(VIII) Le grand livre de la maintenance

2.7	La maintenance conditionnelle.....	157
2.8	La maintenance prévisionnelle 4.0 cognitive.....	169
2.9	La maintenance de routine.....	184
2.10	La maintenance corrective	203
3	Les formes connexes de la maintenance	215
3.1	La maintenance améliorative	215
3.2	La maintenance conceptuelle	236
3.3	La maintenance d'acquisition.....	245
4	Les démarches de maintenance et les démarches connexes	255
4.1	La démarche <i>Root Cause Analysis</i>	255
4.2	La maintenance basée sur la fiabilité (MBF) [<i>Reliability Centred Maintenance (RCM)</i>]	257
4.3	La <i>Total Productive Maintenance (TPM)</i>	260
4.4	L'industrie et la maintenance 4.0	284
4.5	Le management des risques industriels.....	312
4.6	Le <i>Just In Time (JIT)</i> et le <i>Kanban</i>	348
4.7	Le <i>Lean Management</i>	360
4.8	Les démarches <i>Six Sigma</i> et <i>Lean Six Sigma</i>	369
5	Les méthodes et les outils de la maintenance.....	391
5.1	L'analyse fonctionnelle	391
5.2	L'AMDEC (analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité).....	409
5.3	Le diagnostic de panne.....	429
5.4	La consignation	438
5.5	La méthode de démontage	446
5.6	Le reconditionnement.....	450
5.7	L'agrafage ou la couture métallique.....	452
5.8	L'alignement d'arbres	454
5.9	La méthode SMED (<i>Single Minute Exchange of Die</i>).....	456
5.10	La méthode des 5 S	461
5.11	L'analyse PM	474
5.12	La <i>Value Stream Mapping</i> (cartographie de la chaîne de valeur)....	478

5.13	La méthode DMAIC.....	492
5.14	Les systèmes <i>Poka Yoke</i>	510
5.15	La méthode MAXER	512
6	Les techniques de contrôle et d'analyse non destructives pour les maintenances conditionnelle et prévisionnelle	517
6.1	L'analyse vibratoire.....	517
6.2	La méthode des ondes de choc	521
6.3	L'analyse d'huile.....	523
6.4	La thermographie	534
6.5	Les méthodes thermiques	541
6.6	La détection de fuites.....	549
6.7	Le contrôle visuel	553
6.8	Le ressuage.....	556
6.9	La magnétoscopie	558
6.10	Les radiographies X et gamma	561
6.11	Le contrôle par ultrasons	565
6.12	Le contrôle par courants de Foucault.....	569
6.13	Le contrôle par émission acoustique	574
6.14	Le mesurage d'épaisseur.....	576
6.15	La stroboscopie.....	581
	Bibliographie.....	585

Avant-propos

Le monde industriel a connu, et connaît encore, des mutations profondes voire des révolutions tant sur le plan technologique, méthodologique qu'économique.

L'automatisation, la robotisation et l'informatisation ont investi tous les secteurs apportant une meilleure efficacité. Les innovations et améliorations technologiques sont de plus en plus nombreuses, rapides et pertinentes tant en électricité, chimie, électronique qu'en mécanique. Ces secteurs connaissent des évolutions amélioratives, voire des percées technologiques et méthodologiques avec des retombées immenses sur le monde dont, en particulier, l'industrie.

Les méthodes et outils d'organisation et de gestion ont connu, elles aussi, des développements bénéfiques de grande envergure avec l'avènement des *Lean Manufacturing* et *Lean Management*, du *Lean Six Sigma*, des systèmes de management de la qualité, de la production, de la maintenance, de la sécurité, etc.

En outre, la mondialisation a étendu son influence sur tous les pans de l'économie. Elle a condamné les entreprises à améliorer, sans cesse, leur compétitivité qu'elles doivent entretenir, sans répit, à coups d'améliorations et d'innovations afin de ne pas être laminées par la concurrence qui est de plus en plus rude voire acharnée. Dans ce foisonnement de défis et de contraintes, la maintenance n'est pas restée figée. Elle s'est développée, elle aussi, au fil des ans, pour accompagner la mutation du monde industriel. C'est ainsi que, d'un entretien limité et statique, elle est devenue plus complète et plus dynamique en adoptant la démarche améliorative qui remet, sans cesse, en cause les stratégies, méthodes et outils pour une meilleure efficacité. C'est ainsi que la maintenance est devenue par strates successives de progrès :

- systématique avec une détermination plus fine des périodicités d'intervention grâce aux méthodes et outils statistiques tels que la Loi de Weibull ou de Poisson ;
- conditionnelle avec des méthodes et outils efficaces de contrôle et d'analyse non destructifs permettant la détection précoce des défaillances et leur

(XII) Le grand livre de la maintenance

caractérisation afin de ne faire l'intervention réparatrice qu'au moment opportun ;

- prévisionnelle ou prédictive par une bonne connaissance des lois de développement de défaillances grâce, en particulier en mécanique, à la mécanique de la rupture et à la maîtrise des matériaux, leur élaboration et traitement ce qui permet la détermination de la durée de vie résiduelle d'un équipement en présence de défauts ;
- productive en impliquant les opérateurs exploitant les équipements dans des interventions de premier et deuxième niveaux très bénéfiques pour le maintien des conditions de base de l'équipement et la détection de ses anomalies (auto-maintenance) et en cherchant à maximiser le taux de rendement synthétique et, partant, la production de bonne qualité ;
- corrective avec des méthodes nouvelles de diagnostic informatisé de pannes et avec l'aide à la réparation par la réalité augmentée ;
- conceptuelle en prenant en compte les exigences de la maintenance au stade de la conception de l'équipement ;
- d'acquisition par la prise en considération des exigences de maintenance à l'achat des équipements, leur installation, qualification et la maîtrise de leur renouvellement ;
- améliorative en cherchant les solutions idoines afin d'accroître la disponibilité (fiabilité, maintenabilité et supportabilité), la capacité et la productivité, de réduire les coûts et de maîtriser la qualité, la sécurité et la protection de l'environnement. Dans ce cadre, elle s'adosse aussi au *Lean Management* et au *Lean Six Sigma* tant au niveau des méthodes que des outils ;
- organisée à travers des démarches structurées telle que la maintenance basée sur la fiabilité, la *Root Cause Analysis*, la maintenance basée sur la sécurité, la maintenance basée sur le profit, le *Lean Maintenance*, etc. ;
- totale en cherchant à maximiser le taux de rendement synthétique et autres rendements (global et économique) en impliquant tous les acteurs concernés, y compris les utilisateurs des équipements selon une démarche participative et ordonnée visant l'efficacité ;
- économique par la réduction, autant que possible, des coûts de maintenance directs (dépenses) et indirects (pertes) et par la réduction du *Life Cycle Cost* ;
- informatisée par la gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) et par la Maintenance assistée par ordinateur (MAO) dont la télémaintenance qui connaît un développement soutenu et qui permet la détection de panne, son diagnostic et, éventuellement, sa réparation à distance. La GMAO et la MAO ont donné naissance à la maintenance 4.0 (ou maintenance cognitive ou *smart*) connectée et exploitant les capteurs intelligents, les *Cyber Physical Systems*, l'Internet des objets, le *Cloud*, le *Data*

Mining et le *Machine Learning*, qui détermine les durées de vie résiduelles et préconise et gère les actions de maintenance à mener ;

- > collaborative : elle conjugue ses efforts avec les autres fonctions de l'entreprise (production, qualité, ingénierie, finances, achats, etc.), afin d'atteindre les objectifs de cette entreprise qui sont d'ailleurs partagés ;
- > participative : elle implique tout le personnel de l'entreprise pouvant contribuer à amener la maintenance vers l'efficacité dont particulièrement les opérateurs des équipements et elle met en œuvre tous les moyens de formation et de motivation pour des ressources humaines à haut rendement. Elle s'appuie en cela, aussi, sur les méthodes du *Kaizen* et autres méthodes de résolution de problème visant, donc, l'amélioration et l'efficacité.

Ce livre, qui verra une suite sur l'organisation et la gestion de la maintenance, traite tous les aspects évoqués plus haut et les développements qu'a connus et connaît encore la maintenance sur le chemin du progrès et de l'excellence.

Il a été conçu de façon très pratique afin d'être exploitable et utile aussi bien pour les professionnels de la maintenance que pour les dirigeants, les enseignants et les étudiants. Il comporte la plupart des démarches, méthodes, techniques et outils aussi bien directement qu'indirectement liés à la maintenance en insistant sur le côté pratique avec des descriptions de mise en œuvre accompagnées des outils et imprimés requis pour des applications professionnelles aisées.

1

Les concepts généraux de la maintenance

1.1 Les concepts de la maintenance

DÉFINITION

- 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 (norme NF EN 13306).

Cette définition appelle les remarques suivantes.

La maintenance est l'ensemble des actions techniques (réparations, échange standard, serrage, nettoyage, etc.) mais aussi administratives et de management. La maintenance, ce n'est pas uniquement réparer ou faire de la maintenance technique, c'est aussi de la gestion et de l'organisation. Sans ces deux dernières, les résultats pourraient être très mauvais. En effet, si l'on dispose d'une équipe de maintenance composée d'orfèvres en matière d'intervention mais, malheureusement, pour une négligence administrative ou de gestion, les pièces de rechange requises ne sont pas disponibles. La durée d'arrêt pourrait être alors allongée outre mesure ce qui générerait des pertes financières pouvant être très importantes. Le résultat de la maintenance est alors mauvais bien que, sur le plan technique, l'équipe de maintenance soit excellente. Le management et l'administration sont deux nécessités impérieuses pour la maintenance comme pour toute autre activité d'ailleurs (voir figure 1.1, page suivante).

Les deux grands ensembles d'action de maintenance, techniques, d'un côté, et administratives et de management, de l'autre, sont les suivants :

- actions administratives et de management :
 - organisation du service de maintenance,
 - formation du personnel,
 - définition des processus, procédures et instruction de maintenance,
 - définition des formes d'actions techniques à mener et établissement de leurs gammes,

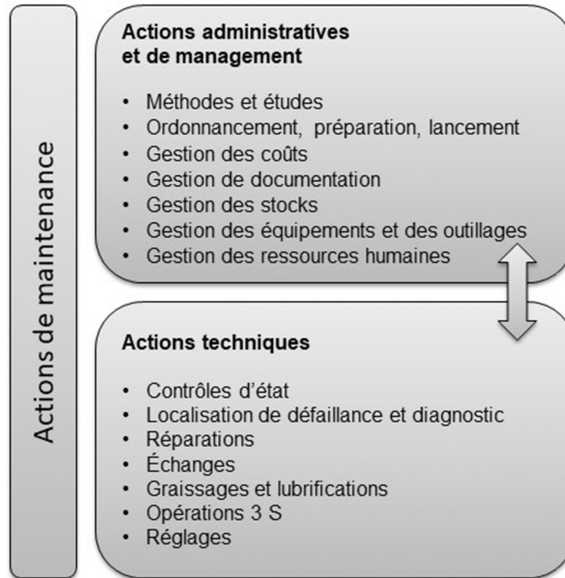


Figure 1.1 Les deux groupes d'actions de la maintenance

- ordonnancement, préparation et lancement de ces actions,
 - enregistrement des informations sur les interventions,
 - gestion des stocks de pièces et fournitures de maintenance,
 - analyse de ces données,
 - définition des actions amélioratives à mener,
 - établissement de tableaux de bord,
 - exploitation de données pour améliorer la politique de maintenance ;
- actions d'intervention technique :
- contrôles, inspections, vérifications,
 - étalonnages,
 - réparations,
 - remplacements,
 - réglages,
 - resserrages,
 - graissages et lubrifications,
 - nettoyages,
 - rangements,
 - actions d'aides visuels à la décision,
 - réfection de peinture, etc.

Dans tous les cas, la maintenance est une combinaison d'actions administratives et de management et d'actions d'intervention technique. En effet, quelle que soit

la forme d'intervention technique choisie : remplacement, contrôle, resserrage, graissage, etc., un travail de gestion est nécessaire (prévision, préparation, ordonnancement, enregistrement des données sur l'intervention, analyses, études amélioratives, etc.). En outre, les unes ont besoin des autres pour être réalisées dans de bonnes conditions. En effet, pour bien gérer, on a besoin du retour d'expérience à partir des actions techniques menées. De l'autre côté, pour bien exécuter les interventions techniques, on a besoin de méthodes, d'études et de gestion.

Si on analyse les choses en termes de processus, on peut affirmer que les actions administratives relèvent plutôt des processus de management et de soutien tandis que celles d'intervention relèvent tout naturellement des processus de réalisation.

Si on adopte la démarche systémique, on peut considérer la maintenance comme un système avec une partie opérative (actions techniques) et une partie pilotante (administration et gestion) et un système de retour d'expérience (indicateurs et tableaux de bord) (voir figure 1.2).

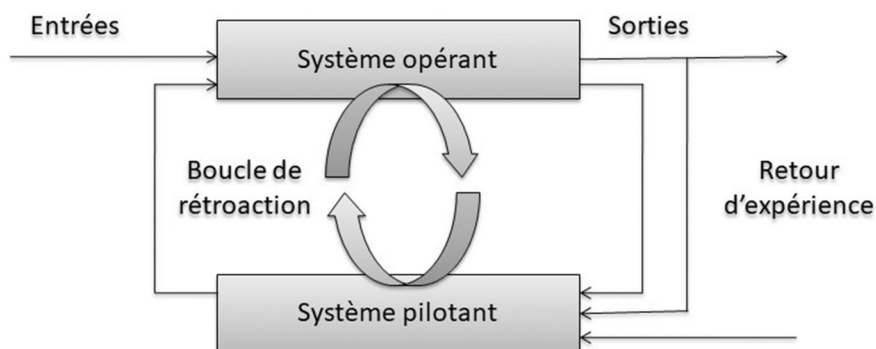


Figure 1.2 Composition d'un système

Il est clair que les actions administratives et de management sont réalisées de façon quasi permanente tandis que les actions d'intervention technique sont menées soit :

- avant la manifestation de la défaillance, elles sont alors de type préventif ;
- après la manifestation de la défaillance, elles sont alors de type correctif.

Elles peuvent être faites, aussi, de façon quasi continue : rondes, auto-maintenance ou encore le suivi de paramètres par des capteurs dédiés fixés en permanence sur les équipements.

(4) Le grand livre de la maintenance

Elles peuvent être menées de façon discontinue : remplacements systématiques, contrôle de paramètres à des intervalles de temps donnés, graissage et lubrifications à des périodicités déterminées.

Par ailleurs, il convient de préciser que :

- maintenir sous-tend la notion de prévention tandis que rétablir concerne, plutôt, la réparation après défaillance. On constate que, d'ores et déjà, les deux modes principaux de maintenance, le préventif et le correctif, apparaissent dans cette définition ;
- la prévention vient en premier, ce qui montre que la maintenance préventive est préférée à la corrective pour les avantages indéniables qu'elle présente aussi bien sur le plan technique que sur le plan économique comme cela sera démontré plus loin ;
- l'état spécifié peut être :
 - l'état initial avant dégradation ou nominal du bien,
 - l'état demandé par l'utilisateur selon ses besoins.

Être en mesure d'assurer un service déterminé signifie que l'équipement est maintenu de façon à ce qu'il soit prêt à assurer une fonction déterminée même si, après l'intervention, il n'est pas utilisé immédiatement, mais il est en état de disponibilité.

La définition précédente, quoique suffisamment explicite, ignore la notion de coût qui est l'un des objectifs majeurs de toute intervention de maintenance. En effet, celle-ci devra être réalisée au coût global minimal.

Le coût global ou *Life Cycle Cost* est le cumul, sur une période déterminée, du coût d'acquisition de l'équipement ainsi que des coûts de maintenance et d'exploitation desquels on retranche la valeur résiduelle du bien en fin de la période concernée. En somme, ce sont toutes les dépenses et pertes générées par l'équipement sur une période donnée.

Dans cette définition, la maintenance est appliquée à un bien (voir tableau 1.1). Celui-ci est défini par la norme NF EN 13306 comme suit :

DÉFINITION

- Tout élément, composant, mécanisme, sous-système, unité fonctionnelle, équipement ou système qui peut être considéré individuellement.

NOTE

Un nombre donné de biens, par exemple un ensemble de biens, ou un échantillon, peut lui-même être considéré comme un bien.

Tableau 1.1 Éléments maintenables

	Électronique	Mécanique
Composant	Puce, diode, résistance	Arbre, roue dentée
Mécanisme	servomécanisme	Système de lubrification
Sous-ensemble	Alimentation	Système de refroidissement
Unité fonctionnelle	Carte électronique	Réducteur
Équipement	Ordinateur	Fraiseuse
Système	Système de MAO	Fabrication de cahiers

On peut extrapoler et dire que la notion de bien peut aussi s'appliquer aux 5 M (*Men, Machine, Method, Material et Medium*), comme on le verra plus loin.

En outre, dans cette définition, apparaît la notion de fonction requise. La norme NF EN 13306 en donne la définition suivante :

DÉFINITION

- **Fonction requise** : fonction ou ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaires pour fournir un service donné.

La notion d'analyse fonctionnelle, qui consiste à identifier et caractériser les fonctions d'une entité, sera traitée plus loin relativement dans le détail.

S'agissant de la panne, la norme NF EN 13306 la définit comme suit :

DÉFINITIONS

- **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.
- **Panne masquée** : situation dans laquelle une panne existe dans une partie du bien, mais ne peut être détectée en raison d'une panne du bien lui-même ou à cause d'une autre panne de cette même partie ou d'une panne d'une autre partie.
- **Panne latente** : panne existante, mais qui n'a pas encore été détectée.
- **Panne partielle** : panne caractérisée par le fait que le bien ne peut accomplir que quelques-unes mais pas toutes les fonctions requises.

1.1.1 Le management de la maintenance

DÉFINITION

- Toutes les activités des instances de direction qui déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités concernant la maintenance et qui les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance, l'amélioration des méthodes dans l'entreprise, y compris dans les aspects économiques (norme NF EN 13306).

Le management de la maintenance consiste à piloter toutes les actions visant à atteindre les objectifs fixés. Il nécessite la mise en œuvre d'une communication, basée sur des échanges d'informations avec toutes les autres fonctions de l'entreprise comme des tableaux de bord et suivi d'indicateurs, des comptes rendus et rapports, des recommandations sur les conséquences des choix industriels.

En matière de management, il convient de noter que la maintenance ne sert pas uniquement à préserver un état, elle recherche aussi les solutions pour améliorer cet état en termes de disponibilité, qualité, capacité, productivité, coûts, sécurité et protection de l'environnement (voir figure 1.3).

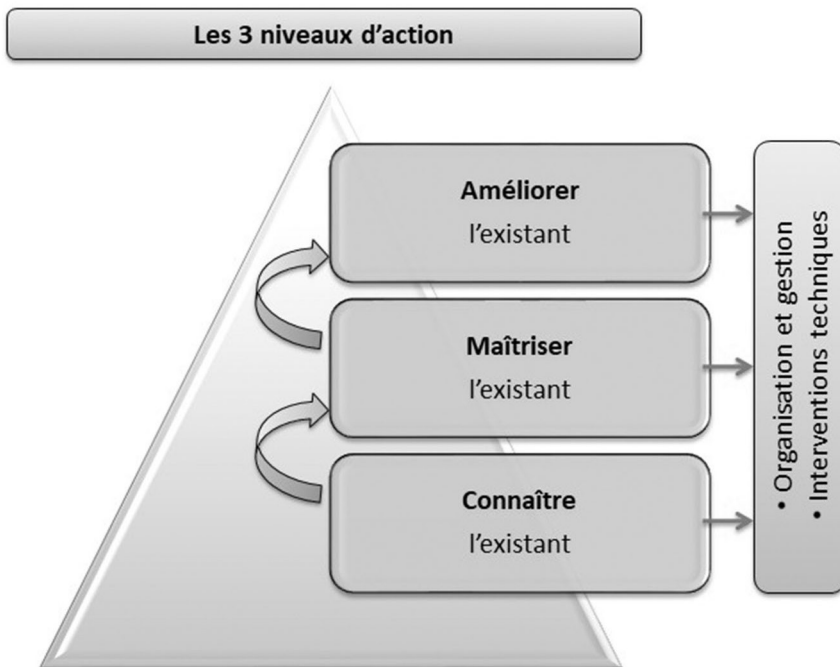


Figure 1.3 Les trois niveaux d'action de la maintenance

1.1.2 La politique de maintenance

La politique de maintenance consiste à fixer les orientations (méthode, programme, budget, etc.) dans le cadre des objectifs fixés par la direction de l'entreprise. La politique de maintenance conduit, en particulier, à faire des choix entre :

- > maintenance préventive et/ou corrective, systématique ou conditionnelle ;
- > maintenance internalisée et/ou externalisée ;
- > politique d'approvisionnement en pièces de rechange ;
- > développement des ressources humaines ;
- > management qualité de la fonction maintenance ;
- > établissement du système sécurité, etc.

DÉFINITION

- 1.1.3 La stratégie de maintenance Méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de maintenance (norme NF EN 13306).

La stratégie de maintenance, qui résulte de la politique de maintenance, impose des choix pour atteindre, voire dépasser, les objectifs fixés.

Ces choix sont à faire pour :

- > développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance ;
- > élaborer et optimiser les gammes de maintenance ;
- > établir les standards de travail ;
- > définir les méthodes et moyens de sécurité ;
- > établir des flux d'informations (*Flow Charts*) ;
- > organiser les équipes de maintenance ;
- > gérer les stocks et les optimiser ;
- > gérer les ressources humaines de la maintenance : sélection, recrutement, formation, communication, motivation, etc.

On peut donc considérer les formes de maintenance (corrective, systématique, conditionnelle, prévisionnelle, de routine et améliorative) comme des stratégies de maintenance.

1.2 La maintenance et l'entretien

Pendant longtemps, on avait confondu maintenance et entretien ou bien on a confiné la maintenance à l'entretien, bien que ces deux notions soient très différentes comme le montre le tableau 1.2 (page suivante).

Tableau 1.2 Comparaison entre maintenance et entretien

Entretien	Maintenance
Subir les défaillances	Maîtriser les temps de fonctionnement et de maintenance
Statique : aucune amélioration et aucune optimisation	Dynamique : amélioration continue pour des objectifs toujours plus ambitieux
Cloisonnement par rapport aux autres fonctions	Coopération avec les autres fonctions : partage des objectifs et des actions
Entretien sans se soucier de son coût	Recherche du coût minimal de maintenance
Entretien dépendant de la production	Maintenance au même niveau hiérarchique que production

L'entretien est l'ensemble des réparations ou des dépannages, faits après défaillance ou encore les travaux qui sont faits de façon systématique, généralement chaque année, pour prendre soin des équipements tels que les graissages, les nettoyages, les lubrifications, les remplacements, etc. Le cloisonnement, dont il est question dans le tableau précédent (voir tableau 1.2), provient du fait qu'aucun travail d'entretien n'était confié aux exploitants et que peu ou pas de concertation n'était faite avec ces derniers, de même qu'aucune collaboration n'était assurée avec les autres départements de l'entreprise.

L'entretien est aussi statique en ce sens qu'il n'y a pas de remise en cause des périodicités d'intervention, de recherche de causes de défaillance et encore moins de propositions de solutions d'amélioration.

La maintenance, en revanche, est dynamique car elle recherche les solutions adéquates pour mieux atteindre les objectifs fixés. Elle permet de maîtriser les équipements et ne subit pas la loi de ces derniers. En maintenance, il y a aussi une recherche continue de l'optimum par, en particulier, une meilleure planification et préparation des travaux, par une amélioration des équipements et par un choix judicieux de la politique de maintenance à appliquer dans chaque cas.

Cela rentre dans le cadre du management de la maintenance évoqué plus haut, dont la définition est ci-après, qui fixe les objectifs, la stratégie et les moyens à mettre en œuvre pour une maintenance efficiente donc qui remplit les fonctions requises, atteint les objectifs mais au moindre coût global.

DÉFINITION

- Le management de la maintenance consiste en toutes les activités des instances de direction qui déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités concernant la maintenance et qui les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance, l'amélioration des méthodes dans l'entreprise, y compris dans les aspects économiques (norme NF EN 13306).

1.3 L'évolution de la maintenance

À l'instar des autres fonctions de l'entreprise, la maintenance subit l'influence de l'environnement interne de l'entreprise, mais aussi et surtout externe (technologique, économique, social, écologique, etc.) (voir figure 1.4).

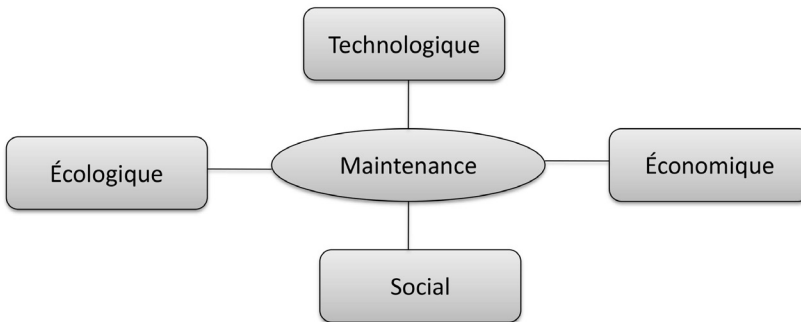


Figure 1.4 Principaux milieux influant sur la maintenance

Par conséquent, elle est continuellement appelée à évoluer pour faire face à la mouvance de ces environnements, particulièrement l'externe, et pour atteindre des objectifs de plus en plus ambitieux : disponibilité accrue, meilleure fiabilité, maintenabilité plus grande, qualité meilleure, sécurité renforcée, protection de l'environnement assurée, durabilité plus longue.

L'évolution de la maintenance s'est faite, grosso modo, selon la chronologie suivante (voir figure 1.5) :

- Jusqu'à la fin du XIX^{e} siècle, c'est l'entretien qui était appliqué. Il consistait à prendre soin des équipements, à les nettoyer, à en assurer le graissage et la lubrification. Il consistait aussi à intervenir après panne pour réaliser des opérations de dépannage ou de réparation. On considérait alors que la panne ne pouvait pas se produire, car on considérait, à tort d'ailleurs, que la conception était bien faite et que seuls des soins devaient être apportés à l'équipement ; par la suite, les pannes qui survenaient ont prouvé que la conception n'était pas infaillible et que les équipements pouvaient et devaient être améliorés.
- Au début du XX^{e} siècle, les dégâts matériels et humains qu'avaient provoqués les pannes de certains équipements dangereux, tels que les chaudières et les réservoirs de gaz, ont poussé les organismes nationaux et internationaux à imposer que des visites et des contrôles réglementaires soient exécutés systématiquement.

- Vers la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'entretien classique continuait à être appliqué et des améliorations des équipements étaient également apportées aux équipements quand cela s'avérait nécessaire. La maintenance préventive systématique à base de remplacements et de révisions a fait son apparition ; ces interventions systématiques n'étaient, toutefois, pas optimisées et, souvent, on remplaçait des pièces qui pouvaient encore continuer à fonctionner convenablement. La maintenance était alors trop onéreuse et on la considérait, à juste titre d'ailleurs, comme un gouffre financier. La maintenance était improvisée.
- Les années 1960-1970 ont généré trois mouvements :
- la prise en compte des aspects fiabilité et maintenabilité. C'est la période qui vit la naissance de la maintenance centrée sur la fiabilité (*Reliability Centred Maintenance*), la périodicité des interventions était déterminée grâce à des modèles statistiques appropriés (Weibull, exponentiel, etc.), par l'analyse des résultats d'essais ou par l'analyse de l'historique des pannes. La fiabilité commençait à être prise en compte tout comme la maintenabilité au stade de la conception. La maintenance devenait plus fiabiliste ;
 - la prise en compte de l'aspect économique : les impératifs de compétitivité devenant de plus en plus forts, les entreprises se sont vues contraintes à une quête incessante d'économie, de rationalisation. C'est alors que l'aspect coût a fait son apparition. Les dépenses de la maintenance aussi bien directes que celles qui résultent de la défaillance. La maintenance commençait à avoir une comptabilité propre et ses dépenses n'étaient plus noyées dans les frais de production. La maintenance commençait à affirmer son identité et son autonomie par rapport à la production. Elle devenait une activité productrice qui exige des investissements, des dépenses mais qui, en contrepartie, rapporte ce qu'aurait coûté la non-efficacité des équipements à la suite d'une absence ou d'une mauvaise application de la maintenance. La maintenance devenait plus économique ;
 - la naissance de la maintenance par contrôle et analyse qui sera baptisée, plus tard, maintenance conditionnelle. On s'est rendu compte que les remplacements systématiques n'apportaient pas de réelles garanties de fiabilité, d'autant plus que les démontages et remontages introduisaient, eux-mêmes, des défaillances ou les initiaient. La règle d'or était, et est toujours d'ailleurs, de ne pas toucher à une machine qui fonctionne même pour vérifier que les composants sont toujours bons car il fut constaté que, dans 15 à 20 % des cas, lorsque l'on démonte une machine pour y vérifier l'état des composants, on introduit des anomalies qui n'y existaient pas. Il est préférable de surveiller la *machine* plutôt en fonctionnement et de

n'intervenir que lorsqu'une défaillance commencerait à se manifester. Des moyens de contrôle et d'analyse non destructifs commençaient à conquérir l'industrie, moyens de contrôle par ultrasons, radiographies X et γ , ressuage, courants de Foucault, magnétoscopie, techniques de contrôle vibratoire, d'analyse d'huile, etc. La maintenance devenait plus scientifique et plus objective.

→ Depuis les années soixante-dix, deux courants fondamentaux se sont affirmés et se sont adossés aux démarches suivantes :

- *Life Cycle Cost* (LCC) ou coût global : on s'est aperçu que la prise en compte du simple investissement de départ (pour le choix d'un équipement, d'une politique de maintenance, etc.) ne suffisait pas à permettre une bonne décision car on ne prenait pas en considération le long terme. En effet, une voiture A moins coûteuse à l'achat qu'une voiture B peut s'avérer plus coûteuse dans le temps par ses dépenses de maintenance et d'exploitation plus élevées. C'est alors que le LCC fit son apparition. C'est un coût qui intègre aussi bien l'investissement de départ que les différentes dépenses, cumulées sur une certaine période, de la maintenance et de l'exploitation. Il est un bon outil de choix et de décision objectifs. La maintenance est devenue, ainsi, plus économique ou rentable ;
- la maintenance productive totale qui a connu sa véritable naissance à partir de 1970. C'est une maintenance qui nécessite un certain nombre d'actions de correction et de prévention visant la maximisation de l'efficacité des équipements. Parmi les actions qu'elle préconise, nous pouvons citer : la participation des exploitants aux travaux de maintenance particulièrement ceux de niveau 1 (graissage, réglages, resserrages, vérifications, nettoyages) et la participation de tous à travers des cercles de la maintenance pour l'amélioration de celle-ci. La maintenance devient plus participative et améliorative.

→ Depuis le début des années 2000, on est entré dans l'ère de l'informatisation tous azimuts : la gestion de la maintenance assistée par ordinateurs (GMAO), la maintenance assistée par ordinateurs (MAO), la télémaintenance dont, en particulier, l'exploitation de capteurs pour la détection précoce de défaillance ou de dérives, le diagnostic informatisé, l'utilisation de robots pour des interventions, le recours aux systèmes experts pour le diagnostic et l'action, l'exploitation d'Internet, la réalité augmentée, etc. On a assisté à la naissance et au développement de la maintenance 4.0 ou cognitive qui est la conjonction de la GMAO et de la MAO en utilisant les TIC et les outils de l'intelligence artificielle.

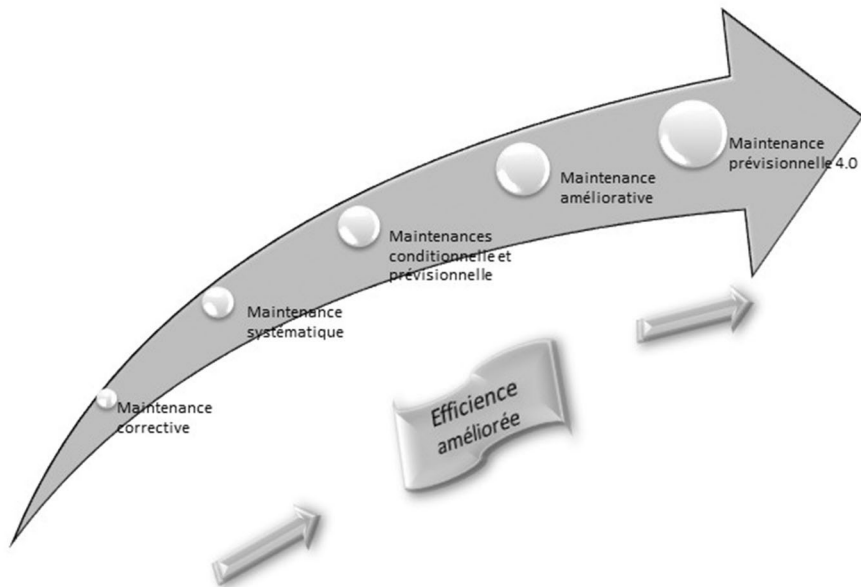


Figure 1.5 Évolution de la maintenance

Les principaux facteurs qui ont permis et entretenu cette évolution de la maintenance sont :

- **technologiques** : l'électronique et l'informatique ont conquis les équipements industriels. Les robots et les automatismes s'installent partout pour pallier les erreurs humaines, assurer la qualité et améliorer la productivité. La production ainsi robotisée et automatisée demande de moins en moins d'exploitants. En revanche, les opérateurs dont elle a besoin sont ceux de la maintenance mais avec des capacités techniques plus élevées car les machines sont de plus en plus truffées de capteurs pour en surveiller le fonctionnement les instruments utilisés pour les contrôles et les analyses sont de plus en plus sophistiquées. L'identification, la localisation des défaillances et la révélation de leurs causes sont de plus en plus réalisées pour des systèmes experts de diagnostic de panne. Les interventions de maintenance sont facilitées par la réalité augmentée qui permet une documentation encours d'intervention et aussi une aide à l'intervention elle-même. La maintenance est rentrée dans l'ère de la MAO (maintenance assistée par ordinateur) ;
- **économiques** : dans un contexte caractérisé par la mondialisation des marchés, l'abolition des protectionnismes et par la libéralisation des échanges, la concurrence est de plus en plus rude et seules les entreprises compétitives peuvent la soutenir, voire la gagner. La compétitivité

nécessite que l'entreprise fabrique des produits ayant la qualité requise et au moindre coût. La pratique d'une maintenance de bon aloi contribue à :

- réduire, de façon conséquente, les coûts par une diminution des gaspillages, une amélioration de la disponibilité, une garantie de la sécurité, etc.,
 - assurer la qualité des machines, donc celle des produits fabriqués ;
- > **humains** : l'efficacité du service de maintenance est conditionnée par la qualité du personnel impliqué surtout dans un contexte caractérisé par la complexité des machines et la mutation technique et scientifique de la maintenance. Si la maintenance a pu progresser, c'est grâce aussi à l'élévation progressive du niveau d'instruction de ses opérateurs qui assimilent ainsi plus facilement les méthodes de maintenance plus élaborées et qui ont su s'approprier plus facilement les méthodes et les outils de la maintenance aussi bien techniques que de gestion et d'organisation.

1.4 Les enjeux de la maintenance

1.4.1 Les enjeux économiques

Le manque ou la mauvaise application de la maintenance conduisent inéluctablement à des défaillances qui peuvent se manifester soit par une simple indisponibilité de l'outil de production, soit avec un accident qui peut entraîner des pertes matérielles, voire humaines. Dans l'un comme dans l'autre de ces deux cas, les pertes financières peuvent être immenses et justifier, à elles seules, la recherche incessante de l'amélioration de la maintenance.

Il importe de noter que le coût d'indisponibilité de l'outil de production, à la suite d'une panne, peut atteindre des valeurs considérables selon le secteur d'activité sans compter les pertes d'image de marque difficilement chiffrables, mais très pénalisantes pour l'entreprise. Lorsque la panne cause des dégâts matériels ou humains, les pertes financières sont davantage élevées.

1.4.2 Les enjeux technologiques

La pratique de la maintenance, particulièrement sur le plan technique, est un excellent moyen de maîtrise de la technologie et l'un des meilleurs vecteurs de transfert de technologie. En effet, le fait de démonter et de remonter une machine, de la nettoyer, de la régler, d'y remplacer des composants... d'en consulter ou constituer la documentation conduit à sa connaissance profonde, ce qui permet dans, une première étape, d'améliorer l'équipement et, dans une étape suivante, de créer des machines analogues. La maintenance est une excellente école de la technologie.

1.4.3 Les enjeux sociaux

Les besoins humains qui peuvent se concrétiser à travers la maintenance sont principalement :

- la sécurité ;
- la protection de l'environnement ;
- l'emploi.

Parmi les fonctions et les objectifs de la maintenance, la sécurité et la protection de l'environnement s'imposent d'évidence, particulièrement dans un monde technologique de plus en plus dangereux et de plus en plus agressif pour l'environnement et l'homme. Il est à noter que la cannibalisation et le reconditionnement d'organes de machine pour en allonger la durée de vie sont des méthodes contribuant à la protection de l'environnement.

Par ailleurs, la maintenance nécessite souvent le recours à la sous-traitance, ce qui entraîne la prolifération de petites et moyennes entreprises de maintenance pour le reconditionnement de pièces, la fabrication de rechange, la chaudronnerie, les contrôles et analyses non destructifs, le nettoyage, les protections de surface. Ce sont des emplois qui sont créés et qui contribuent à résorber le chômage, l'un des maux majeurs de toute société.

En outre, il convient de noter que la robotisation et l'informatisation de production ont pour conséquence de réduire l'effectif du personnel de production, mais celui de la maintenance demeure nécessaire et ne subit, souvent, qu'une réduction limitée. Néanmoins, une réadaptation du métier de mainteneur est à faire.

Il est indéniable qu'opérateur de maintenance est un des emplois les plus stables et l'un des profils les plus recherchés. En effet, même en période de récession ou d'arrêt d'activité de production, le personnel de maintenance continue à travailler pour entretenir le parc machine et autres équipements annexes en attendant la reprise de l'activité. La maintenance est l'une des activités les plus pérennes.

1.5 La maintenance et les 5 M

La maintenance est une fonction de soutien dont l'objectif est de maintenir un bien dans un état dans lequel il peut remplir, de façon efficiente, une fonction requise d'un processus déterminé. Il est évident que tout processus a besoin des 5 M pour transformer les intrants en extrants (voir figure 1.6).

Pour que le processus puisse réaliser ses fonctions en satisfaisant les exigences de qualité, coût et temps, il a besoin des 5 M et, partant, il est nécessaire que ces 5 M soient, eux aussi, bien maintenus, sinon ils ne pourraient pas assurer la réalisation optimale du processus (voir tableau 1.3).