

PLACE DES MODELES D'OPTIMISATION DANS LE PROCESSUS D'AIDE A LA DECISION EN MAINTENANCE ¹

Houda El Aoufir* et Driss Bouami**

Résumé. - Dans un contexte économique de plus en plus concurrentiel, les services de maintenance doivent répondre aux objectifs de sûreté de fonctionnement fixés par les exploitants à un coût minimal. L'optimisation des stratégies de maintenance, bien qu'ayant fait l'objet, en tant que discipline de recherche, de multiples développements durant ces dernières décennies, reste d'utilisation peu courante dans les entreprises. Dans cet article, après une définition des objectifs de l'optimisation de la maintenance et un rappel succinct de sa démarche, nous explicitons, à la lumière de notre recherche dans le domaine, pourquoi, malgré les avantages certains qu'elle peut procurer à l'entreprise, l'optimisation de la maintenance reste encore peu exploitée par les industriels. Nous liions les causes d'abord aux pré-requis des modèles d'optimisation, puis à la pertinence même des modèles utilisés dans un contexte de prise de décision. Ensuite, nous montrons comment l'optimisation de la maintenance peut être insérée au sein d'un processus plus complet d'aide à la décision intégrant d'autres outils. Parmi ces outils, nous présentons plus particulièrement l'intérêt du calcul des coûts de la maintenance que nous avons développés et appliqués dans une industrie marocaine et l'apport des techniques d'aide multicritère à la décision.

Mots-clés : Maintenance – optimisation – aide à la décision multicritère - stratégies – coûts de maintenance

¹ Cet article a fait l'objet d'une communication au colloque Conception et Production Intégrée- 24-26 octobre 2001 à Fès-Maroc.

* Doctorante d'Etat en gestion de la maintenance, enseignante à l'Ecole Supérieure de Technologie de Salé-MAROC, houda_elaoufir@yahoo.fr.

** Ingénieur mécanicien, Docteur Es-Sciences, responsable du mastère de management de la maintenance et doyen de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, bouami@menara.co.ma.

1. Introduction

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise². Bien menée, la fonction de maintenance peut fortement contribuer aux objectifs de disponibilité et de durabilité de l'outil de production, de qualité des produits, de sécurité des biens et des personnes et de respect de l'environnement. Elle peut également générer, selon les types d'industrie, des économies importantes sur le prix de revient des produits. Sur le plan des techniques, de la philosophie et des méthodes de travail, la maintenance a fait l'objet ces cinquante dernières années de divers développements : maintenance prédictive, systèmes experts d'aide au diagnostic, Total Productive Maintenance, Maintenance Basée sur la Fiabilité, intégration de la maintenance dès la phase de conception, Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité, Life Cycle Cost, Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur, Télémaintenance...). Ces techniques et ces méthodes ont été progressivement adoptées par les entreprises du fait des avantages certains qu'elles procurent. Sur le plan de la recherche, divers modèles mathématiques d'optimisation de la maintenance ont vu le jour depuis les années 1960. Leur utilisation reste cependant très limitée dans les entreprises.

Cet article se donne pour objectif d'apporter des éclaircissements sur cet aspect et de donner des voies de solution en relation avec le contexte de la prise de décision en maintenance. Dans un premier temps, nous définissons les objectifs de l'optimisation de la maintenance et nous présentons un bref historique des avancées dans le domaine. Ensuite, nous analysons, à la lumière de notre propre expérience et de nos recherches, les raisons du manque de succès des modèles d'optimisation de la maintenance dans les entreprises. Nous développons, à cet effet, les pré-requis des modèles d'optimisation et leurs limites dans le contexte de la prise de décision en maintenance. Enfin, nous proposons d'intégrer l'optimisation dans le champ plus vaste de l'aide à la décision en maintenance. Nous modélisons le processus d'aide à la décision en maintenance comme un ensemble d'activités et d'outils que nous développons en insistant plus particulièrement sur l'apport du calcul des coûts de la maintenance ; celui-ci a fait l'objet d'une expérimentation de notre part sur le terrain et de l'aide multicritère à la décision qui peut à notre sens donner un nouveau souffle à la recherche dans ce domaine.

2. Bref historique de l'optimisation de la maintenance

L'optimisation de la maintenance consiste à trouver le meilleur compromis, au vu d'objectifs bien définis par les décideurs, et sous des contraintes spécifiques aux fonctions de

² Définition de la norme NF EN 13306 – juin 2001.

production et de maintenance, entre différentes stratégies³ de maintenance. Du fait de la forme mathématique du problème tel qu'il a été formulé historiquement, cette discipline a été rattachée initialement au champ de la recherche opérationnelle. Les objectifs étaient alors la minimisation du coût global espéré de la stratégie sous des contraintes relatives aux ressources de la fonction maintenance et aux niveaux de fiabilité, de disponibilité ou de sécurité requis par les exploitants. Les premiers travaux ont été conduits depuis le début des années 1960 par Barlow, Proschan, Mc Call, Radner et Hunter. Une synthèse intéressante de ces travaux et de ceux qui suivirent figure dans [She 82], [Val 89], [Ave 97], [Dek 98]. Les modèles développés peuvent être classés³ selon différentes logiques, nous citons les plus courantes : l'aspect mono ou multi-éléments des systèmes, la nature des défaillances (progressives ou catalectiques, aléatoires ou régulières), les lois de fiabilité (exponentielle, normale, Weibull...), le critère d'optimisation (coût global, disponibilité...), les stratégies de maintenance (remplacement, inspection ...), les formalismes utilisés pour la modélisation (chaînes de Markov, réseaux de Pétri, statistiques bayésiennes...) et les techniques de résolution (systèmes experts, algorithmes génétiques...).

Parallèlement aux modèles mathématiques, d'autres approches ont été développées : nous citons la *Total Productive Maintenance* [Nak 86], [Shi 94], la *Reliability Centred Maintenance* [Mou 91] ou la Maintenance Basée sur la Fiabilité [Ric 96]. Ces approches plus méthodologiques, ne faisant pas appel à des mathématiques complexes, se sont progressivement intégrées à l'organisation de la maintenance et jouent aujourd'hui un grand rôle dans la structuration de la fonction maintenance dans les industries. Cependant, un grand fossé existe entre ces approches principalement qualitatives et l'approche de l'optimisation de la maintenance, rendant difficile l'appropriation du bénéfice évident que pourraient tirer les entreprises des prises de décision rationnelles sur les stratégies de maintenance appropriées.

3. Pourquoi les modèles mathématiques d'optimisation de la maintenance ne sont-ils pas utilisés couramment dans les entreprises ?

Nous analysons, à ce niveau, les raisons pour lesquelles l'utilisation des modèles d'optimisation de la maintenance est demeurée limitée dans la pratique industrielle. Nous avons identifié d'une part les pré-requis, qui ne sont pas toujours disponibles sur le terrain, à l'utilisation des modèles d'optimisation (développés dans 3.1) et d'autre part les limites de la logique optimisatrice à apporter une réponse pertinente au problème de prise de décision en maintenance (développés en 3.2).

³ Définie par la norme NF EN 13306 comme une méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de la maintenance, la stratégie de maintenance désigne plus couramment les types de maintenance (corrective, systématique, conditionnelle...).

3.1 Les pré-requis de l'optimisation de la maintenance

Les modèles d'optimisation de la maintenance nécessitent généralement

- la description du système étudié (nombre d'éléments, configuration de fiabilité...);
- la modélisation du processus de dégradation (lois de fiabilité, caractéristiques de sûreté de fonctionnement...);
- la description des stratégies envisageables, leurs règles de mise en œuvre et la définition des variables de commande (périodicités d'intervention, intervalles d'inspection...);
- la définition et l'évaluation des paramètres de gestion intervenant dans les stratégies (temps d'attente, délais d'intervention, coûts directs⁴ et indirects⁵ de la maintenance);
- le choix d'un critère d'optimisation (coût, disponibilité...) et la formulation de la fonction objective en fonction des variables de commande et des paramètres de gestion;
- l'élaboration d'algorithmes de résolution (les fonctions à optimiser ayant rarement des formes simples).

Le recours à ces modèles nécessite par conséquent

- l'existence d'un retour d'expérience suffisant (en quantité et en qualité) pour modéliser les lois de survie des équipements;
- l'existence d'évaluations fiables des coûts directs et indirects de la maintenance (la majorité des modèles d'optimisation repose sur un compromis entre les coûts directs et les coûts indirects attendus des stratégies);
- une sensibilisation de tous les intervenants à l'importance d'une saisie rigoureuse des informations relatives aux interventions (essentiellement les temps et les coûts);
- de la formation dans le domaine des techniques d'analyse statistique du retour d'expérience et d'analyse du risque;
- l'utilisation d'outils « sur mesure » d'aide à la décision adaptés et simples. Les outils GMAO doivent être complétés par des modules de calcul pour la production d'indicateurs techniques et économiques pertinents et de codes informatiques pour la simulation des stratégies envisageables.

⁴ Les coûts directs sont les coûts directement imputables à la maintenance (personnel, matières et stock-maintenance, outillages et appareils, méthodes, locaux, informatique...).

⁵ Les coûts indirects sont les coûts engendrés par les défaillances des équipements sur le processus de production (retards, mévente, pertes de matières et d'énergie, heures improductives, non-qualité...).

3.2 Les limites des modèles d'optimisation de la maintenance

Nous avons identifié diverses limites à l'utilisation des modèles d'optimisation comme moyens d'aide à la décision en maintenance :

- la diversité des contextes et la spécificité des modèles : chaque modèle d'optimisation de la maintenance est spécifique à une situation et à des hypothèses particulières. Le fait de vouloir représenter une situation donnée par un modèle induit soit la réduction de certains aspects de la réalité en vue d'adapter celle-ci à un modèle existant, soit le développement d'un nouveau modèle plus réaliste et éventuellement plus complexe de formulation et de résolution. Pratiquement, ceci suppose une plus large diffusion des modèles (actuellement limités aux chercheurs dans le domaine), des ressources spécialisées en entreprise, un apprentissage⁶ des modèles et une plus grande collaboration avec les laboratoires de recherche. Par ailleurs, les modèles utilisent souvent des hypothèses simplificatrices (systèmes mono-éléments, taux de défaillance constants...) qui ne sont pas toujours satisfaisantes pour les praticiens qui ne peuvent prétendre à des hypothèses plus réalistes qu'au prix d'une plus grande complexité mathématique ;
- la formulation de la fonction à optimiser : la grande majorité des modèles existants reposent sur la minimisation d'une fonction de coût global réalisant un compromis entre les coûts directs de la stratégie et les coûts indirects des défaillances. Ce choix entraîne implicitement que seules sont considérées dans les modèles les actions dont les conséquences sont facilement chiffrables en termes de coûts. La prise en compte d'autres enjeux tels que la sécurité, la qualité et le respect de l'environnement pose le problème de la formulation d'une fonction homogène qui tient compte de l'ensemble de ces variables. Ainsi, la modélisation du problème par une fonction monocritère à optimiser demeure, dans ce contexte, plus une question de facilité de formulation et de résolution que de pertinence de représentation ;
- la volonté de rechercher « un optimum » : les stratégies de maintenance ont des impacts différents sur le coût direct, le coût indirect, la disponibilité, la qualité, la sécurité... Or, le choix d'une stratégie ou d'une autre dépend dans une large mesure du système de préférences du décideur qui, dans ce contexte, n'est pas forcément unique. La décision fait intervenir divers responsables (financier, maintenance, production, qualité, sécurité...) qui bien souvent ont des préférences antagonistes. La logique « optimisatrice », en choisissant un axe de signification préférentiel (exemple : le coût global) ne permet la prise en compte des préférences de chacun qu'à travers la quantification des répercussions de ces différentes préférences sur l'axe choisi. Ceci constitue une limite fondamentale à la formulation du

⁶ Nous désignons par apprentissage des modèles la constitution progressive d'un ensemble de modèles applicables et l'amélioration continue de la capacité à résoudre les problèmes, à adapter les modèles ou à en concevoir de nouveaux. Nous évoquons cet aspect dans [EIA 01].

problème d'une manière satisfaisante pour l'ensemble, à la simulation des alternatives et à la possibilité d'insérer de nouveaux éléments au cours du processus de prise de la décision.

Les modèles d'optimisation de la maintenance ont donc certes foisonné ces quarante dernières années dans l'espace de la recherche ; ils sont restés néanmoins d'utilisation limitée dans les entreprises pour les principales raisons identifiées et récapitulées dans le tableau 1.

<i>Difficultés liées aux pré-requis de l'optimisation</i>	<i>Limites liées à la conception et à l'utilisation des modèles</i>
données de retour d'expérience insuffisantes connaissance imprécise des coûts directs et indirects de la maintenance manque de formation et de sensibilisation des ressources concernées inadéquation du système de gestion de la maintenance (problèmes d'organisation, système d'information défaillant...)	hypothèses simplificatrices et non toujours réalistes spécificité des modèles et pluralité des situations difficulté de formuler une fonction homogène intégrant les divers enjeux non prise en compte de l'aspect « pluriel » et « conflictuel » de la prise de décision

Tableau 1 : Pré-requis et limites de l'utilisation des modèles d'optimisation à des fins d'aide à la décision maintenance.

4. Proposition d'un processus évolutif de prise de décision intégrant les modèles d'optimisation

4.1 Modèle proposé

Nous définissons le processus⁷ d'aide à la prise de décision en maintenance comme un ensemble d'activités et d'outils concourant au choix des meilleures stratégies de maintenance selon des critères pré-définis.

Pour que ce processus soit évolutif, intégré au contexte de la maintenance et orienté vers l'amélioration continue, ce dernier doit inclure diverses activités que nous synthétisons et présentons dans le tableau 2, accompagnées des outils les plus appropriés à leur réalisation.

⁷ Un processus est défini par la norme ISO 9000 comme un ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie. Dans [LOR 01], il est défini comme un ensemble d'activités liées entre elles par des flux d'information ou de matière significatifs qui se combinent pour fournir un produit matériel ou immatériel important et bien défini, élément précis de valeur, contribution spécifique aux objectifs stratégiques.

Activité	Outils
A1 : Collecte et pré-traitement des informations brutes sur la maintenance	Système documentaire de la maintenance, GMAO, Techniques de Maintenance Assistées par Ordinateur
A2 : Analyse du comportement des matériels et calcul d'indicateurs pertinents de sûreté de fonctionnement	Méthodes d'analyse du retour d'expérience (chaînes de Markov, statistiques bayésiennes, jugements d'experts ...) - Modules (logiciels) de calcul de sûreté de fonctionnement
A3 : Calcul des coûts directs et indirects de la maintenance et production d'indicateurs économiques	Modules de calcul des coûts directs et indirects de la maintenance, tableaux de bords
A4 : Identification des priorités d'amélioration sur les équipements	Analyses statistiques des coûts et des temps de maintenance, diagrammes Pareto, analyses AMDEC, calcul et analyse du taux de rendement global
A5 : Amélioration de la maintenance	TPM, MBF, Méthodes et techniques de maintenance, Modèles d'optimisation de la maintenance, LCC, Méthodes d'aide multicritère à la décision

Tableau 2 : Activités et outils du processus d'aide à la décision en maintenance.

Dans les entreprises, les activités A2, A3 et A5 restent encore, selon notre constat, menées de façon non formalisée. L'activité A2 nécessite des ressources particulières (humaines et logicielles) et, bien que l'analyse du retour d'expérience ait fait l'objet de nombreux développements [Pag 80], [Vil 88], [Aup 94], [Zwi 95], [Zou 99] sur le plan de la recherche et des outils de calcul, l'application reste encore assez restreinte à des domaines particuliers (aérospatial, aéronautique, production de l'énergie, industrie pétrolière...). Concernant l'activité A3, nous avons noté à la fois un vide bibliographique, l'insuffisance des outils de gestion actuels (GMAO standards) et un grand besoin chez les industriels. Nous nous sommes particulièrement intéressés à cet aspect dans le cadre de nos travaux, le calcul des coûts de la maintenance faisant partie, à notre sens, des points clés de toute démarche rationnelle d'amélioration de la maintenance. Le paragraphe 4.2 offre une synthèse des méthodes que nous avons développées et, en partie, appliquées. Dans la figure 1, nous faisons également référence dans la panoplie d'outils présentés, à l'aide multicritère à la décision. Nous développons en 4.3 notre conception des apports potentiels de ces techniques, encore insuffisamment exploitées, à l'activité A5 du processus, toujours en relation avec l'analyse faite en 3.1 et en 3.2 sur la pertinence des modèles d'optimisation de la maintenance.

La figure 1 présente notre modélisation du processus.

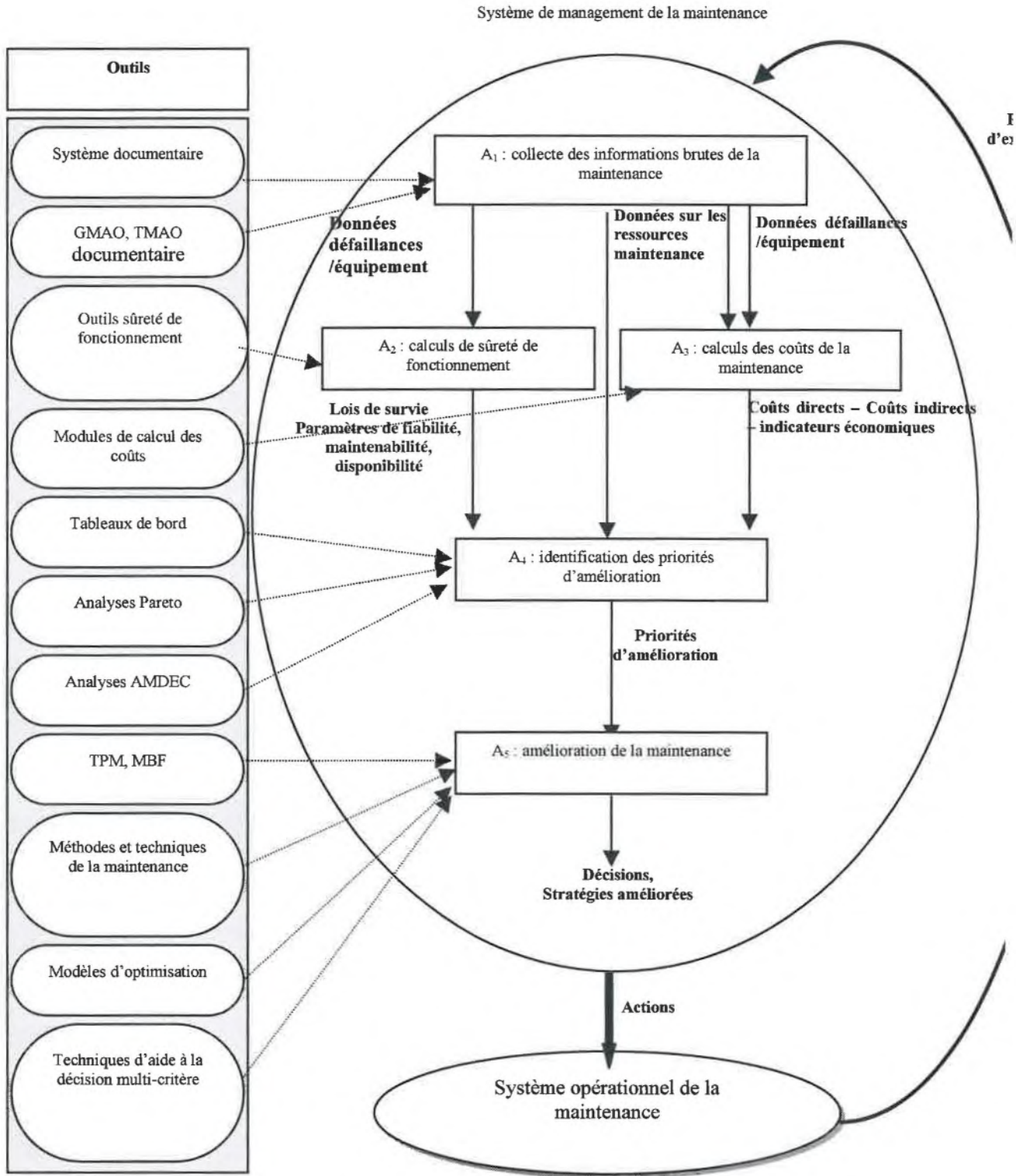


Figure 1 : Processus d'aide à la prise de décision en maintenance.

4.2. Le calcul des coûts de la maintenance

Notre étude bibliographique sur les coûts de la maintenance nous a permis de relever l'insuffisance des modèles actuels de calcul des coûts pour accompagner les démarches d'amélioration. Concernant les coûts directs, nous avons développé deux méthodes :

- la première [ELA 99], basée sur des concepts affinés de comptabilité analytique (voir figure 2), permet de calculer les coûts directs selon divers niveaux d'analyse (centre de charge, types et activités de maintenance) en prenant en compte aussi bien les charges directement imputables que les frais de structure de la fonction maintenance. Ses principaux inconvénients demeurent néanmoins le calcul *a posteriori*, les répartitions arbitraires des frais de structure, et la non-explication du processus de formation du coût direct, ce qui rend difficile la recherche de leviers d'actions dans une perspective d'amélioration ;
- la seconde méthode (voir figure 3) permet de dépasser les limites de la première en se basant sur les principes de la gestion par activités (ABC/ABM⁸). La méthode consiste à décomposer les processus de la maintenance en activités, à définir des unités d'œuvre par activité et à valoriser les coûts par activité de maintenance, ce qui permet d'affecter directement les charges aux activités les consommant et de faire le lien entre les coûts subis, les processus les ayant généré et les performances techniques.

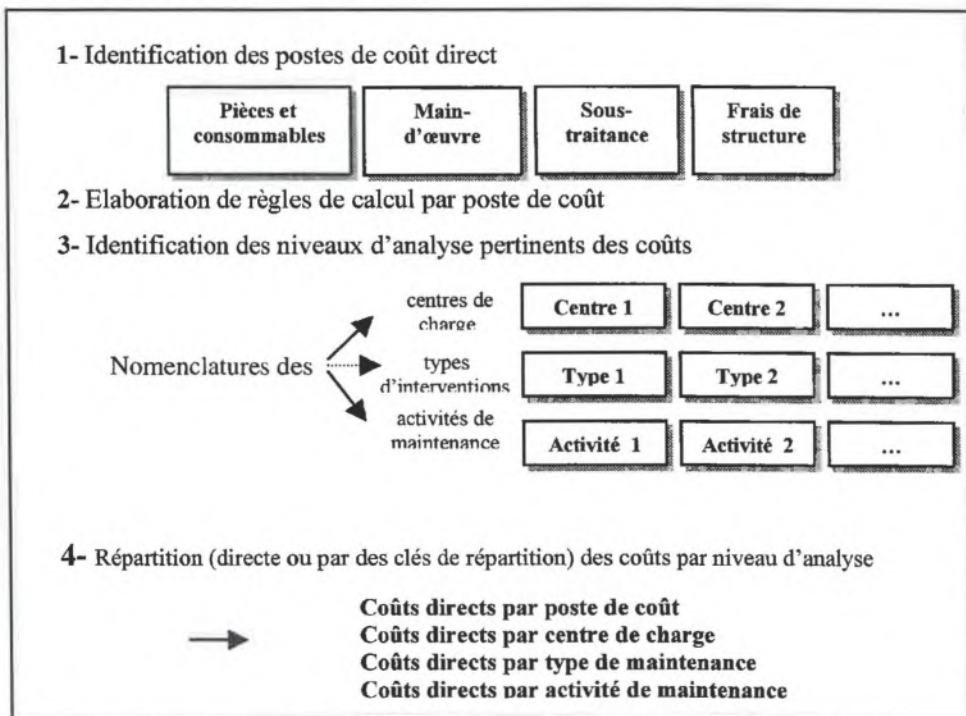


Figure 2 : Logique d'une comptabilité analytique des coûts directs de la maintenance.

⁸ Activity Based Costing/ activity Based Management [Rav 98], [Lor 01].

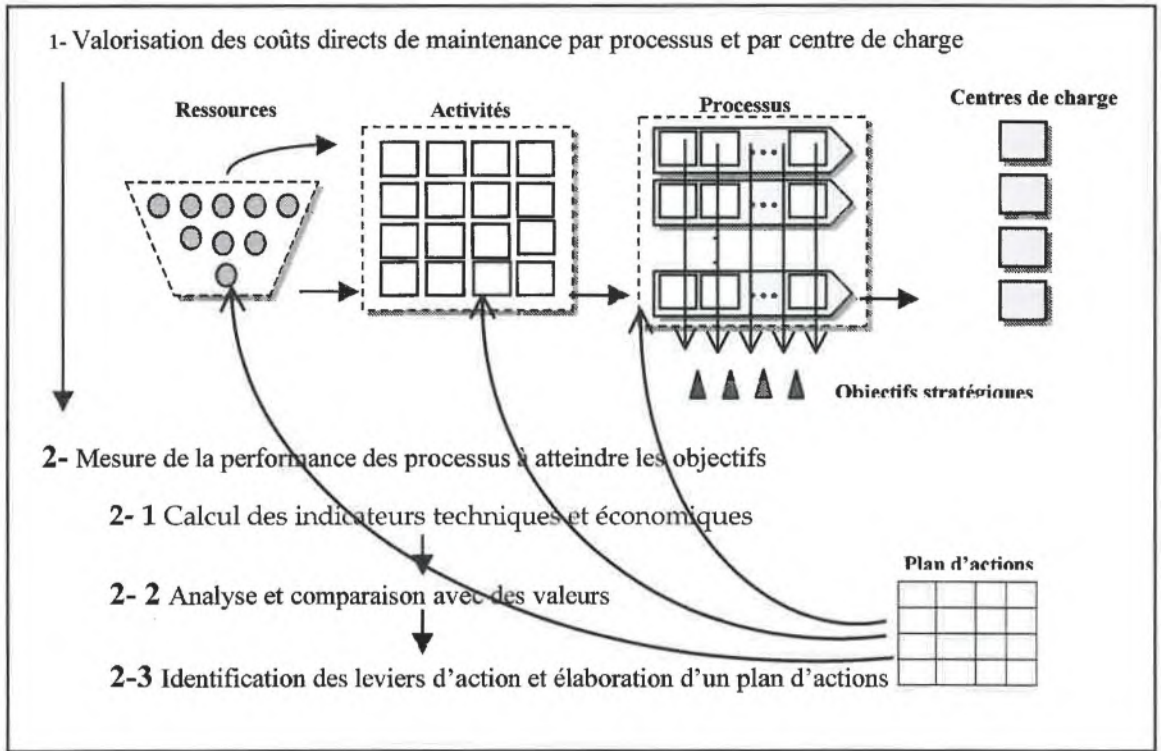


Figure 3 : Logique de la gestion de processus des coûts directs de la maintenance.

Cette seconde méthode est plus propice au calcul prévisionnel, à l'analyse des performances, et à la recherche de leviers d'actions. L'approche a fait l'objet d'une expérimentation⁹ sur le terrain dans une industrie agro-alimentaire marocaine.

Elle a permis, après la phase d'identification des processus, des activités, des unités d'œuvre et des charges par nature pour une période de gestion, de valoriser des interventions de maintenance. Les différences calculées entre les évaluations antérieures des coûts et celles qui ont été effectuées à l'aide de la nouvelle méthode ont permis de sensibiliser les responsables à l'importance d'un calcul fiable des coûts directs de la maintenance. Sa mise en place nécessite néanmoins des efforts non négligeables d'adaptation du système d'information de la maintenance et de formation des utilisateurs.

Concernant les coûts indirects, nous avons développé une méthodologie de calcul qui permet de dépasser les faiblesses des modèles présentées dans [Bou 88], [Fou 92] et [Ric 96]. Sa logique est décrite brièvement⁹ à travers les trois étapes suivantes.

⁹ Dans la première référence, le coût indirect est calculé globalement pour l'ensemble de l'installation, en évaluant la différence, dans le compte de résultat de l'entreprise, entre les situations réelle et idéale « zéro-défaillance ». Dans la seconde, le coût indirect est une perte horaire globale proportionnelle à la

1- L'analyse du système de production qui comporte :

- une modélisation des activités de production. L'outil de représentation utilisé est le diagramme des flux [Bit 98] ;
- l'identification des causes de pertes équipements, qui aboutit à la détermination d'une nomenclature de causes de pertes (exemple : arrêt pour changement d'outil, arrêt pour maintenance préventive, perte de vitesse au démarrage, production de non-conformes...) ;
- l'identification des postes de coût indirects, ces derniers ont été essentiellement regroupés en pertes matières, heures improductives, mesures palliatives, coûts de mévente, coûts de non qualité et pénalités commerciales. Des règles de calcul ont été élaborées pour le calcul de ces coûts.

2- L'enregistrement des pertes par équipement et par cause de pertes et la valorisation de ces dysfonctionnements par poste de coût grâce à un système d'information approprié ;

3- L'exploitation des enregistrements pour :

- la production des coûts indirects par période de gestion, par équipement, par cause de pertes et par poste de coût ;
- l'analyse des coûts indirects à des fins d'amélioration (la chasse aux pertes) ;
- la production d'indicateurs orientés vers la mesure des performances et la prise de décision (exemple : le coût indirect pour causes inhérentes à la fonction production, maintenance ou qualité, le coût d'indisponibilité horaire, le coût indirect horaire en fonctionnement).

L'intérêt d'une telle démarche est qu'étant basée à la fois sur une approche descendante (mise en place d'un enregistrement des pertes dans le processus physique de production avec identification des causes de pertes localement sur les équipements, enregistrement des dysfonctionnements et valorisation des pertes par nature) et sur une approche ascendante (calcul des coûts indirects des équipements et évaluation d'indicateurs de performance relatifs aux fonctions techniques et aux équipements à l'intention du management), elle est plus propice à la détermination des priorités d'action et d'amélioration (voir figure 4).

disponibilité de l'installation. Dans la troisième, c'est une perte horaire proportionnelle au taux de rendement global de l'installation

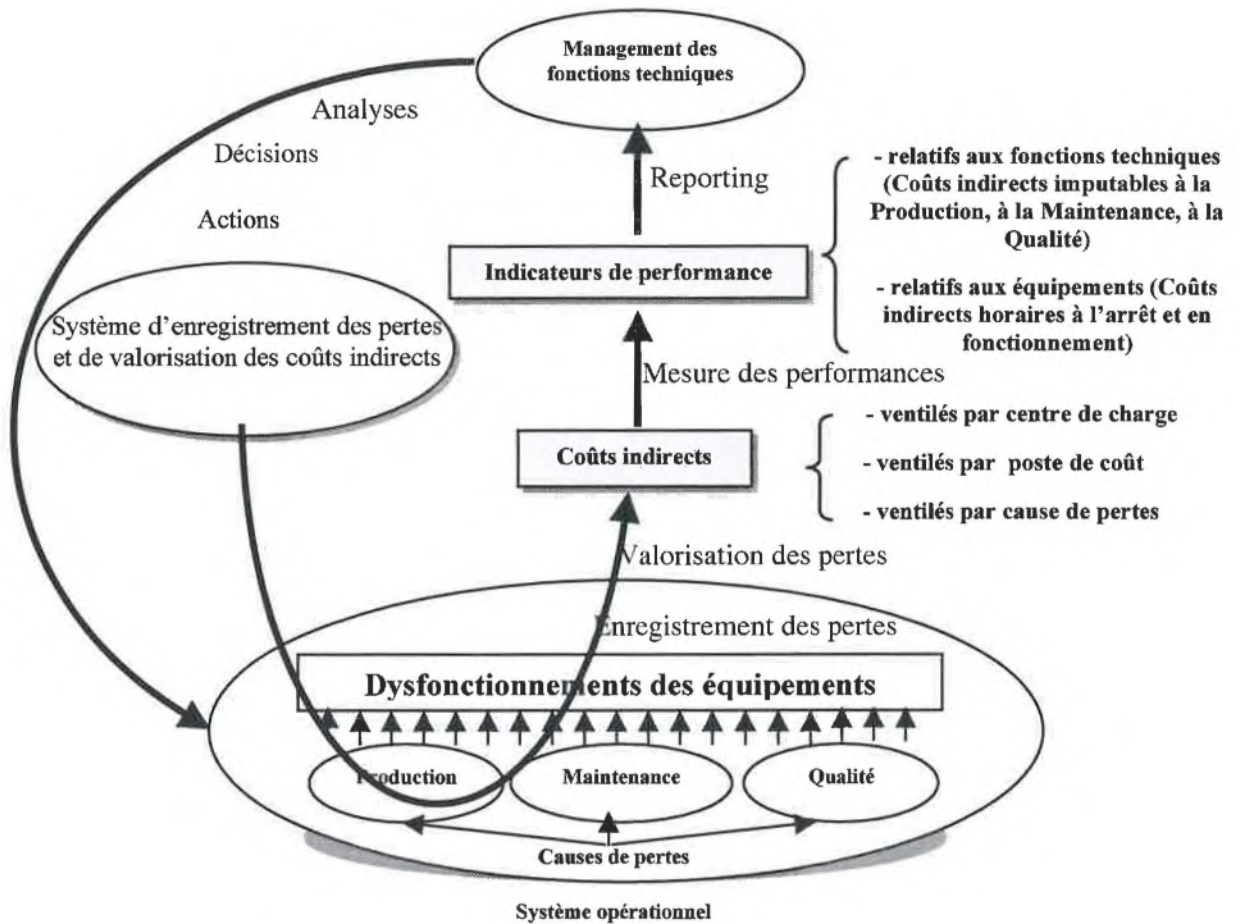


Figure 4 : Le calcul des coûts indirects.

Le développement de méthodologies et d'outils permettant un calcul fiable des coûts directs et indirects de la maintenance est une étape importante du processus d'aide à la décision en maintenance. Bien menés, ces calculs permettent le suivi économique de la fonction de maintenance, la détection des priorités d'amélioration et la mesure des résultats après action. C'est également un pré-requis incontournable (nécessaire mais non suffisant) à l'utilisation des modèles d'optimisation de la maintenance.

4.3. Apport des techniques d'aide multicritère à la décision

Nous avons mis en évidence dans le paragraphe 2 diverses entraves à l'application des modèles d'optimisation de la maintenance dans les entreprises. Outre la difficulté de concevoir des modèles ayant des hypothèses réalistes et de résoudre le problème de l'apprentissage des modèles, nous avons souligné leur difficulté à prendre en compte l'aspect multicritère de la décision : difficulté de formuler une fonction objective homogène, de laisser les décideurs exprimer clairement leurs préférences sur plusieurs axes, et d'aider à trouver un compromis (au

lieu d'imposer « une solution optimale » !). Une voie de solution qui semble permettre de lever ces difficultés est le recours aux techniques d'aide multicritère à la décision. Nous faisons référence ici aux travaux prenant leur origine des premiers constats de Simon [Sim 57], [Roy 71], [Kee 78] sur « le mythe de l'optimisation monocritère » et sur les formalismes développés depuis. Les ouvrages [Roy 93] et [Pom 93] offrent une bonne synthèse des formalismes et des outils informatiques d'aide à la décision existants. Nous pensons que le processus d'aide à la décision en maintenance ne peut que s'enrichir de l'utilisation de ces techniques et qu'elles sont amenées à supplanter dans la pratique, sauf dans des cas particuliers et très précis de prise de décision, l'emploi des modèles d'optimisation. En effet, dans le contexte de prise de décision de la maintenance :

- les décideurs ont plus besoin d'appréhender le problème sous tous les axes de préférences (sécurité, coût, fiabilité, qualité ...) que de réaliser une analyse unidimensionnelle non compatible avec une vision plurielle ou conflictuelle ;
- les décideurs doivent pouvoir émettre leurs préférences, discuter, éventuellement revenir sur leurs choix à d'autres instants. Cet aspect est possible à l'aide des techniques d'aide à la décision multicritère ;
- les critères sur la base desquels les décisions sont prises peuvent évoluer au cours du temps, les actions qui font l'objet des choix également ;
- les modèles d'aide à la prise de décision doivent être faciles à comprendre et à intégrer par l'ensemble des décideurs, faute de quoi, la collaboration de ces derniers peut être remise en cause ;
- contrairement aux modèles d'optimisation qui tentent d'évaluer les conséquences des actions en situation d'incertitude (élément qui peut être mal intégré par des décideurs souvent rebelles à l'utilisation des statistiques), les techniques d'aide multicritère se contentent de structurer la vision des décideurs et de les guider dans leurs choix, sans forcément prétendre à une résolution du problème.

Le schéma de leur application à l'aide au choix des stratégies de maintenance serait le suivant :

- la définition du problème de décision sous la forme d'un ensemble d'actions potentielles $A=\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ et de critères de jugements $C=\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$. A titre d'exemple, les actions de maintenance seraient la maintenance corrective, la maintenance préventive systématique à périodicité fixe, la maintenance conditionnelle, opportuniste... Les critères peuvent être la fiabilité, la disponibilité, le coût, la sécurité, la qualité, le respect de l'environnement...
- la modélisation des utilités U_{ij} ($1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$) des actions relativement aux critères. A cet effet, une réflexion devra être menée sur la construction des utilités, sur la normalisation des

notations (les unités de mesure de la satisfaction par rapport à chaque critère n'étant pas « naturellement homogènes ») et sur les poids (coefficients d'importance) des critères ;

- l'agrégation des performances en vue de permettre une relation d'ordre entre les actions potentielles et de guider le choix des décideurs ;
- la réalisation d'études de sensibilité des résultats aux procédures de pondération des critères, aux procédures d'agrégation des performances et aux changements d'avis des utilisateurs du modèle relativement aux notes attribuées, en vue d'éprouver la robustesse de la méthode.

Ainsi, l'utilisation des techniques d'aide multicritère à la décision semble être une voie intéressante pour structurer les avis des décideurs dans un contexte multicritère et conflictuel. L'aide à la décision multicritère pourrait également être appliquée à d'autres types de décisions en maintenance telles que la décision relative à l'achat d'un nouveau matériel ou d'un nouveau logiciel, aux choix entre différents fournisseurs de pièces de rechange, ou entre différents prestataires de services de maintenance. Notons néanmoins que, malgré l'offre logicielle variée, leur utilisation se heurte encore à deux principaux types de difficultés :

- des difficultés d'ordre pratique
 - ces techniques demandent qu'on fasse appel à un spécialiste (un expert en aide multicritère à la décision) ;
 - elles nécessitent une définition exhaustive des critères de décision et un arbitrage de leur importance, ce qui génère souvent des situations de conflit entre des objectifs également voulus ;
 - elles nécessitent une modélisation des actions et de leurs répercussions qualitativement ou quantitativement sur chacun des axes de préférences ;
 - lorsque les actions possibles sont nombreuses et que les choix ne sont pas évidents (difficulté de trier simplement les actions), se pose le problème de l'agrégation des performances. Celle-ci requiert souvent un formalisme étranger au décideur qui peut alors mal réagir vis-à-vis de l'outil. Sur le plan de la robustesse, les résultats doivent être accompagnés d'études de sensibilité.
- des difficultés d'ordre psychologique
 - ces techniques restent encore mal connues (plus encore dans le domaine de la maintenance) et d'utilisation limitée¹⁰ ;

¹⁰ On trouvera dans [Pom 93] des références intéressantes d'applications dans les domaines des investissements publics (localisation d'aéroport, d'usine, de sites pour le stockage des déchets ; choix de projets de recherche et développement, choix de trajets d'autoroute), de l'allocation des ressources, de la

- elles relèvent plus de l'art et de l'expérience du spécialiste à modéliser le problème que de mathématiques compliquées (mis à part le problème de l'agrégation des performances). Elles souffrent encore d'un manque de crédibilité par faiblesse du formalisme ;
- leur logique déstabilise le décideur habitué à une démarche optimisatrice. Celle-ci est plus rassurante psychologiquement, car, une fois le modèle élaboré et accepté, le décideur est convaincu de l'optimalité de la solution alors que les techniques d'aide à la décision multicritère favorisent l'apparition de conflits et donc de stress au cours du processus de prise de décision.

5. Conclusion

Dans cet article, nous posons la problématique de la prise de décision en maintenance et nous soulignons le fossé qui existe d'une part entre les démarches qualitatives et quantitatives et d'autre part entre la théorie des modèles développés et leur utilisation dans la pratique industrielle. Nous avons mis en évidence les pré-requis de l'utilisation des modèles d'optimisation de la maintenance, nous en avons tracé les limites, et nous avons proposé de les intégrer à un processus plus complet d'activités concourant à la prise de décision rationnelle. Parmi les outils du processus proposé, nous avons choisi de mettre l'accent plus particulièrement sur deux outils : le calcul des coûts de la maintenance et les techniques d'aide à la décision multicritère. Le premier a fait l'objet de développements dans le cadre de nos travaux de recherche. Une brève description en a été donnée dans cet article. Le second, bien que n'ayant fait l'objet l'heure actuelle que de rares applications, présente un intérêt que nous avons tenté de dégager et qui, à notre sens, est amené à croître dans la sphère de la recherche en méthodes d'aide à la prise de décision en maintenance.

6. Bibliographie

- [Lor 01] Lorino P., *Méthodes et pratiques de la performance – Le pilotage par les processus et les compétences*, Editions d'organisation, 2001.
- [EIA 01] El Aoufir H., Bouami D., 'Aide à la décision des stratégies de remplacement mono-élément – prise en compte de divers facteurs coûts', Actes du 8ème Séminaire CONFERE. Marrakech – Maroc, 6-7 juillet 2001, pp-44-50.
- [Bev 00] Bevilacqua M., Braglia M., 'The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection', *Reliab. Eng. And Syst. Saf.*, 2000, n°70, p. 71-83.

gestion de production, de la gestion de crédits publics, des choix d'équipements informatiques. Dans [Bev 00], une technique d'aide à la décision multicritère est appliquée au choix des stratégies de maintenance dans une raffinerie italienne.

- [ELA 99] El Aoufir H., Bouami D., 'Les coûts de la maintenance : identification et aide à la décision', Actes du Colloque International Conception Production Intégrée CPI'99. Tanger - Maroc, 25-26 novembre 1999, pp-445-460
- [Zou 99] Zouakia R., Développement d'outils d'aide à la maintenance et à la conception des systèmes fiables, Thèse de doctorat, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, 1999.
- [Bit 98] Biteau R. et S., Maîtriser les flux industriels, Editions d'organisation, 1998.
- [Dek 98] Dekker R., Scarf P.A., 'On the impact of optimisation models in maintenance decision making', Reliab. Eng. And Syst. Saf., 1998, n°60, p. 111-120.
- [Rav 98] Ravignon L., Bescos P.L., Joalland M., Le Bourgeois S., La méthode ABC/ABM – piloter efficacement une PME, Editions d'organisation, 1998.
- [Ave 97] Aven T., Dekker R., 'A useful framework for optimal replacement models', Reliab. Eng. And Syst. Saf., 1997, n°58, p. 61-67.
- [Ric 96] Richet D., Gabriel M., Malon D., Blaison G., Maintenance basée sur la fiabilité – Un outil pour la certification, Masson, 1996.
- [Zwi 95] Zwingelstein G., Diagnostic des défaillances, Hermès, 1995.
- [Aup 94] Aupied J., Retour d'expérience appliqué à la sûreté de fonctionnement des matériels en exploitation, Eyrolles, 1994.
- [Shi 94] Shirose K., Le guide TPM de l'unité de travail, Dunod, 1994.
- [Roy 93] Roy B., Bouyssou D., Aide multicritère à la décision : méthodes et cas, Economica, 1993.
- [Pom 93] Pomerol J. C., Barba-romero S., Choix multicritère dans l'entreprise, Hermes, 1993.
- [Fou 92] Fougerousse S. et Germain J., Pratique de la maintenance industrielle par le coût global, AFNOR, 1992.
- [Mou 91] Moubray J., Reliability Centred Maintenance – RCM II, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, 1991.
- [Val 89] Valdez-Flores C., Feldman R.M., 'A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single unit systems', Nav. Res. Log. Quat., 1989, n°36, p. 419-446.
- [Vil 88] Villemeur A., Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Eyrolles, 1988.
- [Bou 88] Boucly F., Maintenance : Les coûts de non-efficacité des équipements, AFNOR, 1988.
- [Nak 86] Nakajima S., La Maintenance productive totale – mise en oeuvre, AFNOR, 1986.
- [She 82] Sherif Y.S., 'Reliability analysis : optimal inspection and maintenance schedules of failing systems', Micr. And Reliab., 1982, n°22, p. 55-115.
- [Pag 80] Pages A., Gondran M., Fiabilité des systèmes, Collection EDF, Eyrolles, 1980.
- [Kee 78] Keen P. G. W., 'Decision support systems : the next decade, Decision Support systems', vol 3, 1978, p.253-265.
- [Roy 71] Roy A., 'Problems and methods with multiple objective functions, Mathematical Programming', 1971, vol 1, p. 239-266.
- [Sim 57] Simon H. A., Models of Man, Wiley, 1957.