

Intégration de la maintenance en conception

NABDI Souad

Laboratoire des Techniques Industrielles (LTI)
Faculté des Sciences et Techniques (FST), Route
d'Immouzer, B.P.2202, Fès, Maroc
Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
nabdisouad@gmail.com

HERROU Brahim

Laboratoire des Techniques Industrielles (LTI)
Faculté des Sciences et Techniques (FST), Route
d'Immouzer, B.P.2202, Fès, Maroc
Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
herroubrahim@yahoo.fr

Résumé—Dans le contexte de la concurrence actuelle, les nouveaux produits mis sur le marché sont de plus en plus complexe. Cette complexité vient en partie du fait que les fonctions que doivent assurer les systèmes requièrent l'intégration de plusieurs composants utilisant des technologies différentes. Le concepteur doit intégrer dans son processus toutes les phases du cycle de vie du système et de ses composants. Il doit opter pour des solutions qui sont simples à produire, peu coûteuses, très fiables, sécuritaires, faciles à entretenir et ayant un coût global sur tout le cycle de vie qui soit attrayant pour le consommateur. De ce fait, l'intégration de la maintenance dans la conception d'un équipement conduit à considérer les concepts de fiabilité, de maintenabilité, disponibilité, sécurité et soutien logistique. Cette approche des choses vise à influencer les décisions pendant la conception afin de réduire le coût global de maintenance durant tout le cycle de vie de l'équipement. Les concepts globaux de Sûreté de fonctionnement et du Soutien logistique offrent un cadre méthodologique, pour assurer dès conception, respectivement les facteurs de mise en sécurité, de conformité et de disponibilité du futur produit par rapport à son milieu. C'est pour cela qu'il est important de développer tous ces concepts et d'analyser leur pertinence.

Dans cette optique, ce travail est une contribution à l'intégration du concept de la maintenabilité dans la phase de conception d'un équipement, et qui a pour objectif principal de déterminer les indicateurs de maintenabilité à prendre en considération en conception, ainsi de présenter une approche d'évaluation de ces indicateurs et de proposer des pistes d'amélioration pour remédier aux anomalies d'exploitation.

Nous allons en premier définir les concepts de base de notre travail, puis analyser les indicateurs de maintenabilité présents dans la littérature afin de déterminer ceux qui peuvent être intégrés et évaluer en conception. Enfin, nous allons présenter un processus d'évaluation et suggérer des recommandations d'amélioration de la maintenabilité au stade de la conception.

Mots clés : *Maintenabilité ; conception ; amélioration*

I. INTRODUCTION

Dans un environnement de plus en plus concurrentiel, aujourd'hui, la compétitivité industrielle dépend non seulement de la maîtrise des technologies essentielles mais aussi de la stratégie adoptée et de la gestion du processus global de la conception, d'où la nécessité d'une structuration méthodique du processus de la conception. Ainsi, l'intégration des paramètres de la sûreté de fonctionnement devient un enjeu majeur dans les processus de conception des produits et systèmes mécaniques. Cependant si plusieurs travaux dans la littérature font références à cette intégration, sont peu qui explicitent les modalités des possibilités de sa mise en œuvre.

De ce fait, notre travail consiste à définir le processus de conception d'un produit, à définir les paramètres de la sûreté de fonctionnement et de se focaliser sur le paramètre de la maintenabilité et ses indicateurs tout en déterminant parmi eux qui peuvent être intégrés en phase de conception.

II. DEFINITION DES CONCEPTS

A. Conception industrielle

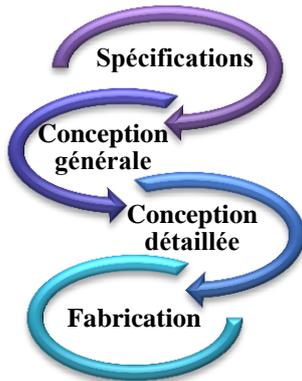
La communauté scientifique présente la notion de la conception comme étant un concept avec des significations très variées selon les individus et les domaines [1]. Et nous pouvons trouver aucun modèle universel pour l'activité de la conception. Ainsi, pour Y. D. Wang et C. Marty [2] la conception est une activité de création qui nécessite plusieurs techniques de résolution des problèmes et un certains baguages de connaissance. Elle est aussi un processus de transformation d'un domaine fonctionnel à un autre domaine physique qui satisfait les exigences fonctionnelle des différentes contraintes [2]. On ajoute que la conception est définie comme étant une activité économique et compétitive qui vise à concevoir un objet technique avec la meilleure solution technologique compte tenu de différentes contraintes, elle est aussi un processus itératif qui nécessite d'agir et de valider chaque aspect de la conception par un expert [1], [2].

Il est ainsi bien difficile de trouver une définition commune pour le processus de conception. Toutes les définitions que nous venons de présenter, sont valables mais elles sont différentes par la manière d'envisager le problème de conception en mécanique.

B. Démarche et processus de la conception industrielle

La démarche représente l'ensemble des activités à suivre lors d'un processus de conception comme suit :

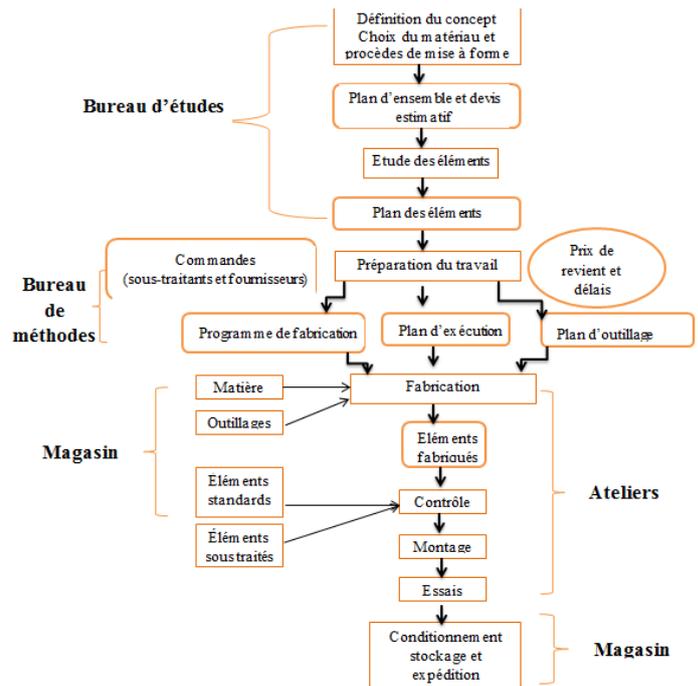
Fig. 1: La démarche de la conception industrielle



- *Phase de spécifications* : les services requis du système et les contraintes de développement sont définis avec le client. Ensuite, les exigences auxquelles l'objet technique doit répondre, sont précisées dans un cahier des charges. Chaque fonction du futur objet est définie complètement et sans ambiguïté par un ou plusieurs critères quantifiables
- *Phase de conception générale* : cette étape représente une phase d'avant-projet ou une représentation schématique de la cinématique et de l'architecture. Elle sera définie pour permettre d'analyser les divers schémas conceptuels possibles
- *Phase de conception détaillée* : c'est la conception proprement dite de l'objet réel à l'aide des acquis et des expériences de conceptions antérieures
- *Phase de fabrication* : phase où l'objet est physiquement réalisé et où des vérifications de conformité seront effectuées

Le processus de conception est décomposé en quatre étapes comme suit : [3]

Fig. 2: Organigramme élémentaire de processus de conception



- *Etape liée au bureau d'étude* : durant cette étape le bureau d'étude est censé de bien définir le besoin présenté par un client puis de déterminer un plan d'ensemble dans lequel le devis estimatif est bien présenté, en suite, il définit une étude des éléments et de leurs plan
- *Etape liée au bureau de méthodes* : dans cette étape on définit les fournisseurs, le prix de revient et le délai, ainsi on définit le plan de travail avec un programme de travail détaillé et un plan d'exécution et d'outillage
- *Etape liée à l'atelier* : c'est à cette étape où on commence la fabrication et le montage du produit avec un contrôle et des essais continus tout en approvisionnant des pièces ou matière première que ce soit au prêt des fournisseurs ou bien du magasin
- *Etape liée au magasin* : on respecte les conditions de conditionnement et du stockage du produit pour l'expédition à la fin

En conclusion, on peut en déduire que dans les méthodologies existantes, on trouve souvent trois étapes nécessaires pour la conception [4]:

- La définition du problème, qui aboutit aux exigences
- La définition conceptuelle, qui met en place la structure fonctionnelle, les principes physiques et propose un concept

- La définition détaillée, qui offre une description complète de la conception

C. Typologies de conception

Dans la littérature, il est possible d'identifier plusieurs typologies de conception, que l'on peut classer selon la proportion de connaissances nouvelles qu'elles nécessitent : [4]

- Selon Dieter [5], la *reconception* est une situation courante. Elle peut concerner des modifications à apporter à un produit commercialisé, nécessitées par de nouvelles exigences ou un manque de performances. Il peut s'agir également d'une mise à jour, planifiée dans le cycle de vie du produit avant son introduction sur le marché, afin qu'il reste compétitif. En général, la reconception part d'une solution existante d'un produit existant pour les faire évoluer
- La *conception routinière* concerne l'utilisation de principes de solutions possibles qui sont souvent catalogués. L'ensemble des sous problèmes et leurs solutions sont connus même si le problème est nouveau, les stratégies et méthodes sont connues. Culverhouse traite la notion du « repeat design » comme étant une conception qui vise à mettre en place des modifications pour réduire les coûts, simplifier une conception existante en utilisant des techniques de conception établies
- La *conception adaptative* dans laquelle on part d'une structure fonctionnelle établie, on maintient des principes de solution connus et on adapte l'architecture aux exigences changées
- Le « *variant design* » est une conception qui nécessite des connaissances nouvelles [5]. Il peut s'agir d'innovation d'un produit existant sans changement du principe de solution, telles changements de tailles et de dispositions, application d'amélioration des procédés de fabrication ou de l'usage d'une technologie existante
- La *conception innovante* nécessite plus de connaissances nouvelles, la décomposition du problème est connue, mais il n'existe pas d'alternative connue pour tous les sous problèmes, dans cette conception tous les attributs ne sont pas connus à l'avance
- La *conception créative*, ni les attributs ni les méthodes ne sont pas connus [5]. L'élément clé est la transformation de l'inconscient en conscient
- La *conception stratégique* nécessite d'étendre les connaissances de conception et de production d'une entreprise

D. Sureté de fonctionnement

1) Définitions

La sûreté de fonctionnement est un concept générique a principalement été défini en 1995 par J.C. Laprie dans son ouvrage [6] comme étant « la propriété qui permet aux utilisateurs du système de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre ». Selon Alain Villemeur, la sûreté de fonctionnement est « l'aptitude d'une entité à satisfaire à une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données » [7]. De ce fait, et par extension, la sûreté de fonctionnement est considérée comme la science des défaillances et des pannes.

De ces deux définitions, on identifie deux sens pouvant être donnés à la sûreté de fonctionnement :

- Le sens propre correspondant à l'aptitude d'une entité à disposer de ses performances fonctionnelle (la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité) et à ne pas engendrer de risque majeur qui définit la sécurité
- Le sens large correspondant aux activités d'évaluation de l'aptitude par l'étude de la sûreté de fonctionnement

Par conséquent, la sûreté de fonctionnement se mesure par ses attributs qui sont : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité.

Ce concept générique a acquis sa notoriété dans les secteurs de la défense, de l'aéronautique, de l'espace, du nucléaire, puis dans les télécommunications et les transports. [8]

En 2002 l'AFNOR définit la sûreté de fonctionnement comme étant l'ensemble des propriétés qui décrivent la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent : fiabilité, maintenabilité et logistique de maintenance. [9]

Ainsi, la fiabilité est une fonction de temps qui estime par des méthodes statistiques l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pour un intervalle de temps donné [9]. L'augmentation de la complexité d'un système mécanique, fait diminuer sa fiabilité. Elle se caractérise par sa courbe $R(t)$ appelée également « loi de survie » et son taux de défaillance $\lambda(t)$

La disponibilité d'un équipement ou d'un système de sa part est une mesure de performance à laquelle Ait-Kadi [10] propose une définition comme « la probabilité que le système soit en état d'opération à un instant t et ce, indépendamment des états précédents »

On peut définir la sécurité d'un système comme étant l'absence de risques inacceptables. Cette définition affirme que la mise en sécurité d'un système n'est atteignable qu'à travers

un processus de réduction du risque. Le risque est une combinaison de la probabilité d'un dommage (blessure physique ou atteinte à la santé) et de la gravité de ce dommage. [11]

2) Principales méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement

L'analyse et l'évaluation de la sûreté de fonctionnement se fait à l'aide de plusieurs méthodes présentes dans la littérature. En effet, ces méthodes peuvent être classées en deux catégories : des méthodes classiques (AMDEC, APR, AMDE, etc...) présentées dans le tableau 1, et des méthodes qui prennent en compte de manière satisfaisante la dynamique des variables continues et répondent essentiellement aux limites des méthodes classiques.

TABEAU 1: LES METHODES CLASSIQUES D'ANALYSE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT [10]

Méthodes	Inductive/ déductive	Quantitative/ qualitative	Phase -clés
Analyse préliminaire de risques (APR)	Inductive	Qualitative	Repérer a priori les risques à étudier
Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)	Inductive	Qualitative	Recenser les conséquences des défaillances
Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticités (AMDEC)	Inductive	Quantitative	Évaluer les conséquences des défaillances
Arbre de causes	Déductive	Qualitative	Organiser les éléments ayant contribué à un accident
Arbre d'évènement	Inductive	Quantitative	Évaluer les conséquences possibles d'un évènement
Arbre de défaillances	Déductive	Quantitative	Évaluer les scénarios d'un accident potentiel

Les méthodes de modélisation de la deuxième catégorie que nous allons présenter sont classées selon deux points de vue : les méthodes qui permettent de décrire les aspects dysfonctionnels (les défaillances et les réparations) et le comportement du système en présence de dysfonctionnements, et les méthodes qui permettent la description comportementale des systèmes dynamiques. Nous présentons des exemples de méthodes tels que les graphes de Markov, les réseaux de Pétri, les réseaux de Pétri stochastiques, la simulation de Monte Carlo, la méthode des graphes de flux dynamiques, etc...

- *Les graphes de Markov* : La modélisation avec les graphes de Markov permet de prendre en compte les dépendances temporelles et fonctionnelles beaucoup plus largement que les méthodes classiques. En effet,

l'existence d'une défaillance de mode commun entre deux composants en redondance s'exprimera simplement par l'ajout d'arcs supplémentaires entre états du système correspondant au fonctionnement simultané de ces deux composants et les états où ils sont tous les deux défaillants

- *Les réseaux de Pétri stochastiques* : L'utilisation de cette méthode permet de prendre en compte, de manière plus structurée que dans les graphes de Markov, l'occurrence des défaillances et leur influence sur le comportement du système. Ils sont obtenus à partir des réseaux de Pétri classiques [12] en associant des durées de franchissement aléatoires aux transitions [13]
- *La simulation de Monte Carlo* : c'est une méthode numérique basée sur le tirage de nombres aléatoires [14]. Elle permet d'estimer l'espérance mathématique d'une variable aléatoire qui est une fonction de plusieurs paramètres. Cette estimation est obtenue en moyennant les résultats issus d'un grand nombre d'histoires. Son utilisation dans les études de sûreté de fonctionnement permet de lever l'hypothèse markovienne et permet ainsi de traiter des systèmes à l'échelle industrielle
- *La méthode des graphes de flux dynamiques* : **Dynamic Flowgraph Methodology (DFM)** [15] est une technique de modélisation et d'analyse pour étudier les risques des systèmes embarqués (systèmes de contrôle numérique : digital control systems). Elle a été utilisée dans les études de risque des systèmes aérospatiaux et nucléaires. Cette approche a pour but d'identifier les scénarios redoutés et d'élaborer une stratégie de test des systèmes étudiés. Elle permet de prendre en compte l'aspect dynamique des systèmes embarqués et l'interaction entre la partie logicielle et la partie matérielle des systèmes.

III. MAINTENABILITE : EVALUATION ET INTEGRATION EN CONCEPTION

A. Définitions

Kapur et Lamberson définissent la maintenabilité comme étant « la probabilité d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné ». Selon la norme Afnor X 60-500 la maintenabilité est « l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits ».

Dans l'ouvrage « Military HandBook », La maintenabilité représente l'aptitude d'un système à être maintenu ou remis dans un état de fonctionnement spécifique, lorsque la maintenance est exécutée par un personnel ayant les compétences requises et utilisant les procédures et les ressources matérielles prescrites. En d'autre terme, elle représente la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en état de fonctionnement après une défaillance. Nous trouvons dans la littérature Plusieurs références, (Dhillon, 1999), (Dhillon, 2002), (Ireson et al, 1995), (Ebeling, 1997), (Military HandBook – 791, 1988) ou (norme NF X60-301, 1982), qui présentent les critères qui confèrent à un système un bon niveau de maintenabilité.

Un équipement est maintenable s'il peut être réparé rapidement. La réparation est l'ensemble des opérations élémentaires de rétablissement incluant les délais logistiques. La maintenabilité fait allusion à la rapidité des tâches de réparation alors que la fiabilité s'intéresse à la réduction du nombre de défaillances.

B. Problématique

La maintenance est liée habituellement à deux facteurs, l'un interne correspondant à la maintenabilité intrinsèque de l'équipement reposant sur la conception de l'entité, l'autre externe, correspondant aux conditions d'usage et à la capacité technique et organisationnelle de l'utilisateur final. [16]

En se focalisant sur la maintenance qui peut être prise en compte au moment de la conception, elle intègre aussi de sa part deux facteurs, l'un lié aux lois d'usure, donc à la fiabilité des composants de l'équipement, l'autre aux facilités de montage / démontage des différents sous ensemble de l'équipement. Par contre, côté utilisateur, c'est avant tout ses capacités à réaliser des tâches de maintenance de niveau 1 voire de niveau 2 qui devraient être prise en compte.

Ainsi, selon Christensen et la norme ISO 12100-1, la conception des machines a un impact majeur sur les interventions de maintenance qui seront effectuées par la suite. En effet, la non considération des nécessités et exigences des futures interventions de maintenance lors de la conception engendrera tôt ou tard des situations dangereuses qui auraient pu être évitées lors de la conception, et ce, à moindre coût. De même, il est clairement explicité par plusieurs travaux que les mesures de prévention prises au stade de la conception sont préférables à celles mises en œuvre par l'utilisateur.

Par ailleurs, la fonction maintenance continue à évoluer et à se réformer. Après être passé de la maintenance corrective à la maintenance préventive puis à la maintenance conditionnelle, les entreprises progressent continuellement et vont maintenant

vers une maintenance prédictive et une prise en compte des contraintes de maintenance lors du choix des équipements nouveaux et de leur conception.

D'où la nécessité de l'intégration de la maintenance en phase de conception tout en faisant appel à son paramètre de maintenabilité et ses indicateurs.

C. Indicateurs de maintenabilité et leur intégration en conception

Dans la littérature, la maintenabilité est caractérisée par plusieurs indicateurs regroupés en quatre familles : les indicateurs de durées des activités de maintenance, les indicateurs de fréquences des activités de maintenance, les indicateurs de temps de main d'œuvre et les indicateurs de coûts des activités de maintenance. [17]

3) Indicateurs de durées des activités de maintenance

Les indicateurs de durée des activités de maintenance estiment la durée des étapes actives du cycle de maintenance corrective ou préventive. Ces indicateurs sont basés sur la durée des étapes de la phase active de maintenance présentées dans la Fig.3. Nous allons ainsi mesurer à titre d'exemple quelques indicateurs résumés dans le Tableau 2.

Fig .3: Etape du cycle de maintenance

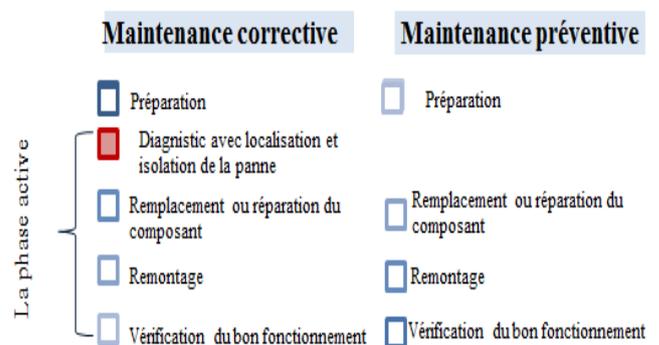


TABLEAU 2: INDICATEURS DE DUREES DE MAINTENANCE ACTIVE

Indicateur		Maintenance corrective	Maintenance préventive
Moyenne de temps actifs		$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \times MTTR_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$	$\bar{M}pt = \frac{\sum_{j=1}^M f_j \times Mpt_j}{\sum_{j=1}^M f_j}$
		Maintenance corrective et préventive : $\bar{M} = \frac{(\lambda \times MTTR) + (f \times \bar{M}pt)}{\lambda + f}$	
Médiane des temps actifs	Distribution normale	$\tilde{M}ct = MTTR$	$\tilde{M}pt = \bar{M}pt$
	Distribution log normale	$\tilde{M}ct = antilog \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \times \log MTTR_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$	$\tilde{M}pt = antilog \frac{\sum_{j=1}^M f_j \times \log Mpt_j}{\sum_{j=1}^M f_j}$
	Distribution exponentielle	$\tilde{M}ct = 0.69 \times MTTR$	$\tilde{M}pt = 0.69 \times \bar{M}pt$
Maximum des temps actifs	Distribution normale	$Mct_{max} = MTTR + (z \times \sigma_{MTTR})$ $z = 1.28$ ou 1.65 pour 90% ou 95%	$Mpt_{max} = \bar{M}pt + (z \times \sigma_{\bar{M}pt})$ $z = 1.28$ ou 1.65 pour 90% ou 95%
	Distribution log-normale	$Mct_{max} = antilog(\log MTTR + (z \times \sigma_{\log MTTR}))$	$Mpt_{max} = antilog(\log \bar{M}pt + (z \times \sigma_{\log \bar{M}pt}))$
	Distribution exponentielle	$Mct_{max} = z_c \times MTTR$ $z_c = 2.312$ ou 3.00 pour 90% ou 95%	$Mpt_{max} = z_c \times \bar{M}pt$ $z_c = 2.312$ ou 3.00 pour 90% ou 95%

Nous ajoutons que La moyenne des temps techniques de réparation et la moyenne des temps de maintenance préventive d'un composant, respectivement $MTTR_i$ et Mct_i sont obtenues en additionnant les durées des étapes actives du processus de maintenance correspondant.

4) Indicateurs de fréquences des activités de maintenance

Ce sont des indicateurs qui indiquent le temps moyen entre deux activités de maintenance corrective, deux activités de maintenance préventive ou bien deux activités de maintenance corrective et préventive. Les expressions correspondantes sont comme suit :

TABLEAU 3: INDICATEURS DE FREQUENCES DES ACTIVITES DE MAINTENANCE

Indicateur	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Temps moyens entre activités	$MTBF = \frac{1}{\lambda}$	$MTPM = \frac{1}{f}$
	$MTBM = \frac{1}{\lambda + f}$	

Nous ajoutons aussi un autre indicateur de temps moyen entre deux remplacement MTBR, c'est un indicateur essentiel pour le dimensionnement des pièces de rechange car il permet de déterminer la fréquence de remplacement des composants.

5) Indicateurs de temps de main d'œuvre

Dans cette catégorie, les indicateurs couramment rencontrés sont : le temps moyen de main d'œuvre par heure de fonctionnement, par activité de maintenance, par mission, par mois ou par an. Le premier peut être considéré comme l'indicateur principal pour calculer les autres indicateurs de la catégorie. [17]

TABLEAU 4: INDICATEURS DE TEMPS DE MAINS D'OEUVRE

Indicateur	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Temps moyen de main d'œuvre par heure de fonctionnement	$MLHc/OH = \sum_{i=1}^N \lambda_i \times Mct_i \times Nc_i$	$MLHp/OH = \sum_{j=1}^M f_j \times Mpt_j \times Np_j$
	$MLH/OH = \frac{\lambda \times (MLHc/OH) + f \times (MLHp/OH)}{\lambda + f}$	
Temps moyen de main d'œuvre par activité	$MLHc/MA = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \times Mct_i \times Nc_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$	$MLHp/MA = \frac{\sum_{j=1}^M f_j \times Mpt_j \times Np_j}{\sum_{j=1}^M f_j}$
	$MLH/MA = \frac{\lambda \times (MLHc/MA) + f \times (MLHp/MA)}{\lambda + f}$	

6) Indicateurs de coûts des activités de maintenance

Les coûts de maintenance prennent en compte les éléments tels que la main d'œuvre, les pièces de rechange, les équipements supports et les infrastructures . Les indicateurs permettant d'évaluer ces coûts sont similaires à ceux relatifs aux de temps de main d'œuvre. Ainsi, on a le coût moyen de maintenance par heure de fonctionnement, par activité de maintenance, par mission, par mois ou par an.

TABLEAU 5: INDICATEURS DE COUTS DE MAINTENANCE

Indicateur	Maintenance corrective	Maintenance préventive
Coût par heure de fonctionnement	$MCc/OH = \sum_{i=1}^N \lambda_i \times MCc_i$	$MCp/OH = \sum_{j=1}^M f_j \times MCp_j$
	$MC/OH = \frac{\lambda \times (MCc/OH) + f \times (MCp/OH)}{\lambda + f}$	
Coût moyen par activité	$MCc/MA = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \times MCc_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}$	$MCp/MA = \frac{\sum_{j=1}^M f_j \times MCp_j}{\sum_{j=1}^M f_j}$
	$MC/MA = \frac{\lambda \times (MCc/MA) + f \times (MCp/MA)}{\lambda + f}$	

Nous résumons de ce qui précède que les paramètres nécessaires au calcul des indicateurs de maintenabilité utilisés en exploitation sont :

- Les taux de pannes des composants, λ_i
- Les fréquences des activités de maintenance préventive, f_j
- Les moyennes des temps techniques de réparation des composants, $MTTR_i$

- Les moyennes des temps d'exécution des activités de maintenance préventive, M_{ptj}
- Le nombre d'opérateurs affectés à maintenance corrective de chaque composant, N_{ci}
- Le nombre d'opérateurs affectés à chaque activité de maintenance préventive, N_{pj}
- Les coûts de maintenance corrective des composants, MC_{ci}
- Les coûts des activités de maintenance préventive, MC_{pj}

En somme, quatre familles d'indicateurs sont utilisées dans la littérature. Dans chaque famille, les indicateurs sont calculés à partir des mêmes paramètres. Nous avons montré que deux familles d'indicateurs peuvent être évaluées en conception par leur facilité et la disponibilité des données nécessaires pour l'évaluation : les indicateurs de durée et les indicateurs de fréquence des activités de maintenance. Le choix d'un ou de plusieurs indicateurs dépend de l'utilisateur final et des données disponibles pour l'évaluation. Un indicateur agrégé, combinant plusieurs autres indicateurs, peut aussi être utilisé selon le besoin.

D. Evaluation de la maintenabilité en conception

Dans la littérature une approche pour l'intégration de la maintenance en conception est proposée avec des outils de type « Design for X » [18]. Ce concept intègre en première partie des outils de types « Design for assembly », « Design for manufacturing » et « Design for reliability » qui sont appliqués dans le but de reconception d'une entité pour analyser a posteriori la solution proposée. Ces deux types intègrent la fabrication dans le processus de la conception alors que notre étude se focalisera sur l'intégration de la maintenance qui est portée par le « Design for maintainability ».

1) Design For Maintainability

Le « Design for maintainability » est un concept qui vise à assurer au produit dès la phase de conception la capacité d'être maintenu sans difficulté tout au long de son cycle de vie utile avec un coût optimal. La maintenabilité contient plusieurs critères qui sont qualitatifs et quantitatifs, et plusieurs d'entre eux sont à intégrer en phase de conception selon la nature de l'entité.

De ce fait, la norme X60-301 et l'institut de Sûreté de fonctionnement proposent onze critères relatifs aux opérations de maintenance [18] : Accessibilité ; testabilité ; Modularité ; Démontabilité ; Détectabilité ; Visibilité ; manutentionnalité ; nettoyabilité ; réparabilité ; identification et repérage et

interchangeabilité. Nous allons mettre le point sur les critères qui présentent une importance pour notre problématique

2) Processus d'évaluation et de validation du MTTR

Le processus générique d'évaluation et de validation d'une performance comportementale se fait en aval du processus de conception. En effet, au cours de la phase de conception le concepteur conçoit une ou plusieurs solutions qui seront stockées dans une base de données des solutions à évaluer d'un CAO, puis le déclenchement du processus d'évaluation se fait par le concepteur au moment où il fait le choix d'une solution à valider pour tester que la solution envisagée satisfait les exigences prédéfinies.

Ce processus générique peut être appliqué à n'importe quelle performance mesurée par un indicateur quantifiable, ce processus se compose de trois étapes principales : la collecte des données, l'évaluation des solutions et l'analyse des résultats.

Nous allons appliquer ce processus pour l'évaluation de la maintenabilité en conception. Nous avons fait en ce qui précède le choix d'évaluer en conception la moyenne des temps techniques de réparation $MTTR_s$ comme indicateur pour évaluer le niveau de maintenabilité d'une solution conçue par le concepteur pendant la phase de conception. En supposant que la solution à évaluer à une structure série le $MTTR_s$ est calculé comme suit :

$$MTTR_s = \sum_i \lambda_i MTTR_i / \sum_i \lambda_i$$

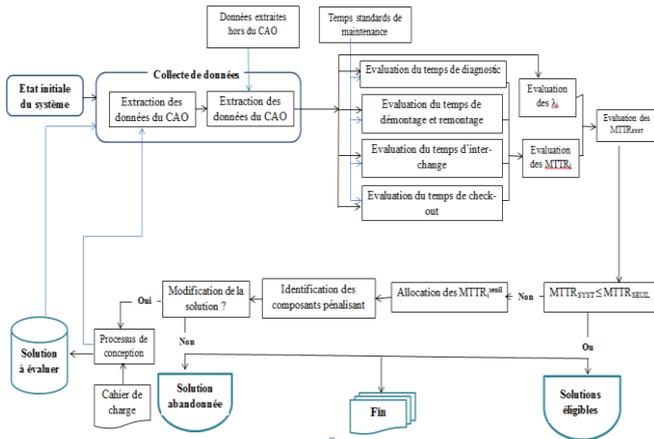
$$MTTR_i = \sum_k t_{ik}$$

Avec :

- $MTTR_s$: la moyenne des temps de réparation de la solution proposée
- $MTTR_i$: la moyenne des temps de réparation d'un composant i
- λ_i : taux de pannes des composants i
- t_{ik} : la durée de l'étape k du processus actif de maintenance corrective du composant i

D'autre part, nous supposons que le cahier de charge définit un seuil $MTTR_s^*$ que le système doit satisfaire. Le processus global d'évaluation sera comme suit :

Fig. 4: Processus d'évaluation et de validation de MTTRs



En somme, le processus générique de validation comporte trois sous-processus : la collecte des données, l'évaluation de l'indicateur et l'analyse des résultats. Une décomposition de chacun des trois sous-processus et la description détaillée de chaque sous-processus jusqu'aux étapes élémentaires est nécessaire. Les données d'entrées, leurs sources d'obtention, les données de sorties et les outils à mettre en œuvre dans chaque étape élémentaire sont indispensables à définir. le processus proposé permet au concepteur de faire une évaluation du MTTR de la solution conçu. Dans la littérature, nous trouvons plusieurs outils indispensables tels que les modèles de calculs les algorithmes. Mais, d'autres sont encore à développer.

I. RECOMMANDATION POUR AMELIORER LA MAINTENABILITE

En recensant les écrits traitants l'amélioration de la maintenabilité, nous avons pu dégager des recommandations lors de la conception d'un système comme suit : [19]

- Fabriquer des équipements munis des dispositifs de vérification assurant le suivi du bon fonctionnement des matériels tel les voyants permettant la visualisation des niveaux des huiles
- Le repérage et l'accessibilité des points de mesure
- La qualité de la documentation de maintenance en définissant des manuels exigibles contenant des procédures et méthodes de vérification
- Définir les procédures et l'aptitude au démontage et remontage des équipements et leurs éléments constitutifs avec les moyens de manutention requis
- Définir la nomenclature et la durée de vie de chaque élément du système pour faciliter la maintenance préventif et l'approvisionnement des pièces de rechange

- Définir les contraintes influençant sur la maintenabilité tel que les contraintes environnementales et les contraintes d'exploitation
- Définir les spécifications des composants tout en précisant le type des matériaux, la nature des composants et les liaisons qui relient chaque composant du système
- Définir au préalable les outillages d'intervention
- Définir des méthodes d'évaluation et d'inspection pour chaque élément

IV. CONCLUSION

Les interventions de maintenance sont situées à la croisée de nombreuses voies tant techniques, qu'organisationnelles ou qu'humaines. En conclusion de ce travail, l'intégration de la maintenance dans les projets de conception devient de plus en plus une nécessité pour les fabricants afin d'assurer une exploitation des composants sûre avec des coûts d'indisponibilité et de réparations optimaux. Cette démarche intègre la variabilité industrielle, comme la variabilité individuelle, et cherche à anticiper la dégradation et l'évolution de la défaillance du système dans sa globalité et durant son cycle de vie.

Nous retenons donc qu'agir sur les indicateurs de la maintenabilité en phase de conception est une démarche qui permet d'améliorer les conditions d'exploitation d'un équipement par la facilité et la réduction de la durée de détection de panne et de son entretien avec un coût minimal tout en lui assurant une disponibilité maximale. De plus, la tendance actuelle est de faire plus avec de moins de moyens car les budgets alloués à la maintenance sont en régression en coût d'une année à l'autre, ce qui est contradictoire avec les objectifs de sécurité globale. D'où l'importance du concept étudié d'intégration de ce paramètre en phase de conception.

Nous envisageons comme perspective de ce travail d'effectuer une étude sur la possibilité d'intégrer les autres paramètres de la sûreté de fonctionnement et de les appliquer en conception pour les éoliennes dans le contexte marocain.

Bibliographie

- [1] Dominique SCARVETTI, "formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire", thèse soutenue à l'école nationale supérieure d'art et métier, Bordeaux, 2004
- [2] Kamel M., " SYSTEME INTEGRE DE CONCEPTION DES BOITES DE TRANSMISSION PAR ENGRENAJES" .thèse de doctorat en génie mécanique soutenue à l'INSA lyon, Mai 1995.).

- [3] J.F.debongnie, université de liège faculté des sciences appliquées, conception mécanique, tome1, 2007
- [4] dominique SCARAVETTI, “Formalisation préalable d’un problème de conception, pour l’aide à la décision en conception préliminaire”, thèse soutenue à l’école doctorale de l’ensam bordeaux, ed-432, décembre 2004
- [5] George E.Dieter, “ENGINEERING DESIGN : A Materials and Processing Approach ”, university of maryland, Seconde Edition, 2000
- [6] J.C.Laprie, “ Dependability, Basic concepts and Terminology”, Dependable computing and Fault-Tolerant Systems, VOL.5, 1992
- [7] Alain Villemeur, “Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité, facteurs humains, information”, Eyrolles, 1988
- [8] Yves Mortureux, “ la sûreté de fonctionnement : Méthodes pour maîtriser les risques ”, AG4670, 2001
- [9] AFNOR : NF EN 13306 et NF X 60–500, fiabilité maintenabilité disponibilité, recueil des normes françaises
- [10] Souad Nabdi, Brahim Herrou, “ Analyse de la fiabilité d’un système, application à une éolienne ”, 2ème édition du Congrès international du génie industriel et du management des systèmes, EST de Fès, du 21 au 23 Mai, 2015
- [11] Dominique EVROT, “ Contribution à la vérification d’exigences de sécurité : Application au domaine de la machine industrielle”, Thèse soutenue à l’université Henri Poincaré, Nancy I, 2008
- [12] Robert Valette, Luis Allan Kunzle, “ Réseaux de Pétri pour la détection et le diagnostic ”, Journées Nationales : Sûreté, Surveillance, Supervision, G.R.Automatique, Paris, 17-18 Novembre 1994
- [13] Alain Gabriel Mihalache, “ Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : Application sur systèmes embarqués ”, Thèse de doctorat, soutenue à l’école doctorales d’Anger, France, 2007
- [14] P.E.Labeau, E.Zio, “ Procedures of Monte Carlo transport simulation for applications in system engineering ”, Reliability Engineering and System Safety,77,2002
- [15] Sarhane Khalfaoui, Edwing Guilhem, “Une method pour obtenir des scenarios critiques dans les systèmes mécatroniques”, European conference, 2002
- [16] Monchy, F, “ Maintenance, Méthodes et Organisation ”. Dunod, Paris. 2000
- [17] Jean-Baptiste Menye, “ Validation de la maintenabilité et de la disponibilité en conception d’un système multi-composants ”, thèse soutenue à l’université de Laval, Québec, 2009
- [18] Frédéric Bationo, “ Prise en compte du réseau sociotechnique de maintenance dans la conception d’équipements Cas des petites unités de transformation agroalimentaire des Pays d’Afrique de l’Ouest ”, Thèse soutenue à l’institut national polytechnique de Grenoble, 07 Mars, 2007
- [19] Xavier Zwingmann, “ Modèle d’évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception ”, Thèse soutenue à l’université Louis-Pasteur en collaboration avec l’université de Laval au Québec, France, 2005