



Fès, le 20/01/2016

N° d'ordre : 04/2016

## THESE DE DOCTORAT

Présentée par

**Mr. Morad MAHMOUDI**

Spécialité : Génie Mécanique

Sujet de thèse :

# Contribution à la gestion des coûts de maintenance et à l'élaboration d'un système intégré d'aide à la décision en matière de plans stratégiques de maintenance centrée sur la fiabilité

Thèse présentée et soutenue le Mercredi 20 Janvier 2016 devant un jury composé de :

<i>Pr. Taoufiq ACHIBAT</i>	<i>PES et Vice Doyen</i>	<i>FES, Fès</i>	<i>Président</i>
<i>Pr. A-Moumen DARCHERIF</i>	<i>PES et DG d'ECAM-EPMI</i>	<i>ECAM-EPMI, Graduate School of Engineering - Université Paris-Seine, France</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Pr. Abdelkarim CHOUAF</i>	<i>PES</i>	<i>ENSEM, Casablanca</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Pr. Ahmed EL BIYAALI</i>	<i>PES</i>	<i>FES, Fès</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Pr. Abdelhamid EL AMRI</i>	<i>PES</i>	<i>ENSEM, Casablanca</i>	<i>Examineur</i>
<i>Pr. Ahmed EL KHALFI</i>	<i>PES</i>	<i>FST, Fès</i>	<i>Directeur de thèse</i>
<i>Pr. Abdellah EL BARKANY</i>	<i>PH</i>	<i>FST, Fès</i>	<i>Co-directeur de thèse</i>

Laboratoire d'accueil : Laboratoire Génie Mécanique

Etablissement: Faculté des Sciences et Techniques de Fès



## Résumé de la thèse

Le travail de thèse présenté dans ce mémoire porte sur la problématique de l'optimisation des plans de maintenance associée aux RED-HTA et des coûts OPEX y afférents. Il a été réalisé dans un cadre industriel en réponse aux enjeux stratégiques de la distribution et aux besoins de l'ONEE/BE en matière d'optimisation de la gestion technique et économique des PM des actifs du réseau électrique de distribution. Ainsi dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au développement d'un outil d'aide à la décision flexible, intégré et multicritère qui vise à mettre en évidence les liens importants entre les éléments de planification et l'organisation de la maintenance et les contraintes technico-économiques liées au fonctionnement des réseaux HTA. L'objectif est d'établir ingénieusement des PM appropriés, plus pratique, dynamique et durable permettant d'une part de gérer efficacement les actifs des RED-HTA, dans le souci d'équilibrer entre la sûreté des actifs et les coûts OPEX, et d'autre part d'augmenter leur durée de vie, leur fiabilité et réduire le nombre d'incidents majeurs menant à des coupures généralisées d'électricité. L'outil élaboré permet de suivre et de comparer les performances liées à la SdF et aux coûts OPEX, sur la base des principes de la méthodologie RCM et de la MPC. Cette approche propose une séquence acceptable d'interventions sur le réseau en identifiant les actifs devant faire l'objet de travaux, ainsi que la nature des interventions à effectuer, en tenant compte des contraintes liées à la disponibilité des ressources, aux prescriptions techniques de fonctionnement, et aux paramètres spécifiques des actifs sur un horizon de planification donné. Dans un second temps, nous nous sommes consacré à l'étude de la problématique d'optimisation conjointe de la MPS&MPC planifiée des systèmes électriques série-parallèle multi-actifs en redondance active par l'usage original des méthodes méta-heuristiques notamment, les algorithmes génétiques et mémétiques. Le but étant de minimiser les coûts OPEX tout en assurant les contraintes de fiabilité, de durée de fonctionnement et d'organisation ; le temps optimal associé au coût total minimal par unité de temps est formulé et identifié.

**Mots clés:** Réseau électrique de la distribution, sûreté de fonctionnement, Maintenance préventive, Planification, Aide à la décision, Optimisation, OPEX, Méta-heuristiques, Algorithmes génétiques.

## Abstract

The thesis work presented in this dissertation addresses the optimization problematic of the preventive maintenance plans and the OPEX costs associated with MV distribution electrical networks. It was carried out in an industrial framework in response to the strategic challenges of the distribution and the needs of the ONEE/BE for optimization of technical and economic management of the maintenance actions of the electricity distribution networks assets. So initially, our interest was the development of a flexible, integrated, multi-criteria and managerial tool for support decision that aims to highlight the important relationship between several elements of scheduling and organization maintenance and the technical, economical constraints connected to the MV networks operation. The objective is to establish ingeniously appropriate preventive maintenance programs, most practicable, dynamic and viable, which allows on the one hand to effectively manage the MV networks assets, with the concern of balance between the assets dependability and the O&M costs, and secondly to increase their lifetime, their reliability and reduce the occurrence of major and unscheduled breakdowns and incidents. The purpose of the created tool is to rack and compare performance connected to the dependability and OPEX costs, based on the principles of RCM policy and CBM methodology. This approach proposes an acceptable sequence of interventions on the network by identifying assets that must be the object of works, and the nature of the interventions to be made, taking into account the constraints connected to the availability of resources, the technical requirements operation, and to the specific parameters of assets on a given planning horizon. The second part of this work falls within the framework with the joint optimization problem of the TBM&CBM policy of multi-assets series-parallel electrical systems in active redundancy by use of meta-heuristics methods like genetic algorithms and memetic algorithms. The goal is to minimize the total OPEX costs while ensuring the constraints of reliability, operating time and organization, the optimal time associated with the lowest total cost over time is formulated and identified.

**Keywords:** Electrical distribution network, Dependability, Preventive maintenance, Planning, Decision-making, Optimization, OPEX, Meta-heuristics, Genetic Algorithms.

# Table des matières

Remerciements.....	- i -
Table des matières .....	- ii -
Liste des figures .....	- iv -
Liste des tableaux.....	- vi -
Liste des abréviations.....	- vii -
Introduction générale.....	- 1 -
<b>CHAPITRE I. Les réseaux publics d'électrification au Maroc .....</b>	<b>- 5 -</b>
<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>- 5 -</b>
<b>I.2. État des lieux et l'évolution historique du secteur électrique Marocain .....</b>	<b>- 5 -</b>
<b>I.3. Présentation de l'ONEE-BE .....</b>	<b>- 6 -</b>
<b>I.4. Structure et architecture générale des réseaux électriques.....</b>	<b>- 7 -</b>
I.4.1. Introduction.....	- 7 -
I.4.2. La production de l'énergie électrique .....	- 8 -
I.4.3. Le transport de l'énergie électrique.....	- 8 -
I.4.4. La distribution de l'énergie électrique .....	- 8 -
I.4.5. Le système de téléconduite des RED-HTA (Monitoring).....	- 10 -
<b>I.5. Caractéristiques des réseaux de la distribution .....</b>	<b>- 12 -</b>
I.5.1. Les postes sources de transformation HTB/HTA.....	- 12 -
I.5.2. Les lignes HTA .....	- 13 -
I.5.3. Les postes HTA/BT .....	- 14 -
<b>I.6. Vers des réseaux HTA plus intelligents : Smart Grids et la production décentralisée.....</b>	<b>- 14 -</b>
<b>I.7. Les défauts dans les RED-HTA.....</b>	<b>- 15 -</b>
<b>I.8. Protection des RED-HTA .....</b>	<b>- 16 -</b>
<b>I.9. Les facteurs influençant la robustesse et la performance des RED-HTA .....</b>	<b>- 16 -</b>
<b>I.10. Conclusion.....</b>	<b>- 17 -</b>
<b>CHAPITRE II. État de l'art des stratégies optimales de maintenance .....</b>	<b>- 18 -</b>
<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>- 18 -</b>
<b>II.2. Contexte général en maintenance.....</b>	<b>- 20 -</b>
II.2.1. Introduction .....	- 20 -
II.2.2. La maintenance et ses terminologies.....	- 20 -
<b>II.3. Les niveaux de maintenance .....</b>	<b>- 25 -</b>
<b>II.4. Maintenance et performance.....</b>	<b>- 26 -</b>
II.4.1. Politiques de la maintenance .....	- 26 -
II.4.2. Critères d'évaluation des politiques de maintenance .....	- 27 -
II.4.3. Indicateurs de fiabilité dans les réseaux de distribution .....	- 29 -
<b>II.5. Maintenance et sûreté de fonctionnement dans la distribution HTA.....</b>	<b>- 30 -</b>
II.5.1. Définition de la sûreté de fonctionnement .....	- 30 -
II.5.2. Modélisation mathématiques des grandeurs de la SdF .....	- 31 -
<b>II.6. Les différentes stratégies de la maintenance .....</b>	<b>- 35 -</b>
II.6.1. La maintenance préventive .....	- 37 -
II.6.2. La maintenance corrective .....	- 44 -
II.6.3. Effets de la maintenance sur l'actif et sa fiabilité.....	- 45 -
<b>II.7. Orientation des politiques de maintenance .....</b>	<b>- 46 -</b>
<b>II.8. Optimisation de la maintenance .....</b>	<b>- 48 -</b>
<b>II.9. Les coûts de maintenance.....</b>	<b>- 50 -</b>
II.9.1. L'importance des coûts de maintenance.....	- 50 -
II.9.2. La maintenance et le LCC de RED-HTA .....	- 51 -
<b>II.10. Conclusion.....</b>	<b>- 57 -</b>

CHAPITRE III. Audit de la fonction maintenance au sein du SEX Oujda.....	- 58 -
<b>III.1. Performance de la fonction de maintenance</b> .....	- 58 -
<b>III.2. Les indicateurs individuels de PFM</b> .....	- 58 -
<b>III.3. Approche d'audit de la qualité de maintenance</b> .....	- 59 -
<b>III.4. Contexte de l'audit au sein d'un SEX</b> .....	- 60 -
III.4.1. Le contexte .....	- 60 -
III.4.2. Contraintes de maintenance .....	- 61 -
III.4.3. Périmètre de l'étude .....	- 61 -
<b>III.5. Diagnostic du système de maintenance existant</b> .....	- 64 -
III.5.1. Questionnaire.....	- 64 -
III.5.2. Collecte d'information.....	- 64 -
III.5.3. Résultats.....	- 65 -
III.5.4. Recommandations .....	- 69 -
<b>III.6. Conclusion</b> .....	- 72 -
CHAPITRE IV. Nouvelle méthode d'optimisation des plans de maintenance des RED-HTA..	- 73 -
<b>IV.1. Introduction</b> .....	- 73 -
<b>IV.2. La motivation pour développer une nouvelle approche</b> .....	- 74 -
IV.2.1. Contexte .....	- 74 -
IV.2.2. Les finalités et les objectifs.....	- 75 -
<b>IV.3. Planification et hiérarchisation des travaux de la maintenance des RED-HTA</b> .....	- 75 -
IV.3.1. Planification par la gestion des actifs .....	- 75 -
IV.3.2. L'ordonnancement des tâches de maintenance .....	- 79 -
IV.3.3. Priorisation des travaux de la maintenance.....	- 79 -
<b>IV.4. Présentation de la nouvelle approche : les étapes du processus développé</b> .....	- 80 -
<b>IV.5. Études de cas</b> .....	- 86 -
IV.5.1. Premier cas d'application : PMPA des L-HTA.....	- 86 -
IV.5.2. Deuxième cas d'application : PMPA optimisé des PDP HTA/BT .....	- 98 -
IV.5.3. Troisième cas d'application : PMPA optimisé des PS HTB/HTA .....	- 103 -
<b>IV.6. Conclusion</b> .....	- 118 -
CHAPITRE V. Optimisation des coûts de maintenance d'un système électrique HTA.....	- 119 -
<b>V.1. Introduction</b> .....	- 119 -
<b>V.2. Les disjoncteurs HTB et HTA dans le système électrique</b> .....	- 121 -
V.2.1. Définition .....	- 121 -
V.2.2. Principe de fonctionnement.....	- 121 -
V.2.3. Plan de Protection .....	- 122 -
<b>V.3. Technique d'optimisation de fiabilité et la planification de MPSP&amp;MPC par les AG</b> .....	- 123 -
V.3.1. Introduction aux problèmes d'optimisation.....	- 123 -
V.3.2. Concepts de base et terminologie concernant l'optimisation .....	- 123 -
V.3.3. Algorithmes génétiques et optimisation de la fiabilité.....	- 124 -
<b>V.4. Modélisation du problème</b> .....	- 129 -
V.4.1. Description du problème.....	- 129 -
V.4.2. Objectifs de l'étude .....	- 132 -
<b>V.5. Formulation du modèle d'optimisation de l'OPEX &amp; Périodicité de la MPSP&amp;MPC</b> .....	- 133 -
V.5.1. Description générale du modèle adopté pour l'optimisation du coût OPEX .....	- 133 -
V.5.2. Formulation mathématique du modèle d'optimisation .....	- 137 -
<b>V.6. Technique d'optimisation du coût OPEX</b> .....	- 141 -
<b>V.7. Détermination d'un plan de MPSP/MPC acceptable et optimal</b> .....	- 141 -
<b>V.8. Résultats et interprétation des résultats obtenus</b> .....	- 145 -
V.8.1. En utilisant l'AG.....	- 145 -
V.8.2. En utilisant l'hybridation entre l'AG et la recherche locale .....	- 148 -
V.8.3. Comparaisons des résultats.....	- 150 -
<b>V.9. Conclusion</b> .....	- 153 -
Conclusion générale et perspectives .....	- 154 -
Bibliographie.....	- 157 -
Annexes .....	- 165 -