

REMERCIEMENTS

Avant de commencer cette mémoire, je tiens à remercier et exprimer toute ma reconnaissance à mes encadrants de thèse, Messieurs les professeurs : Driss Amegouz et Said Boutahari, Professeurs à l'Ecole Supérieur de Technologie de Fès (ESTF). Je suis extrêmement reconnaissante pour avoir accepté la direction de cette thèse, et pour m'avoir fait confiance durant ces quatre années.

J'adresse également mes respectueux remerciements à Monsieur Mohamed Ramadany, Professeur à la FST de Fès et Monsieur Maurizio Faccio, Professeur de logistiques et Systèmes industriels à l'Université de Padoue pour leurs engagements scientifiques. Ils m'ont initié à la recherche dans un domaine qui m'a motivé et qui est en plein essor, ils m'ont prodigué des conseils inestimables dans le domaine du génie industriel. Leurs commentaires concernant mon travail m'ont permis à chaque fois de m'orienter dans les bonnes directions tout au long de ma thèse.

Mes remerciements s'adressent ensuite aux membres du jury qui me font l'honneur d'être présent à ma soutenance. Je remercie sincèrement Messieurs les professeurs..... Pour le temps qu'ils m'ont consacré en acceptant d'évaluer mon travail et de me donner des commentaires très constructifs.

Je tiens à remercier infiniment mes parents et ma petite famille pour leurs prières et leur soutien permanent, sans oublier mon mari qui m'a supporté moralement, et qui a pu garantir les conditions de bien être pour la réussite de cette thèse.

RESUME

Au cours de ces dernières années, un nombre croissant de périphériques "SMART" intégrés et interconnectés, envahissent nos environnements. Ces réseaux de capteurs intelligents présentent de nombreux avantages, notamment la flexibilité, le faible coût, la facilité de déploiement, etc. Ceci permet leurs utilisations dans divers scénarios, notamment la ville intelligente, la domotique, le contrôle industriel, les réseaux d'énergie, etc.

L'intégration de cette technologie dans le cas d'une application de télésurveillance associant des solutions informatiques à une maintenance conditionnelle n'a pas encore été envisagée. Par conséquent, le réseau de capteurs sans fil (RCSF) peut anticiper les problèmes de sûreté de fonctionnement, les défaillances de la maintenance, ainsi il peut jouer un rôle essentiel dans le cadre de l'industrie 4.0. Cela a conduit à une expansion rapide dans les usines intelligentes et les systèmes de production intelligents. En effet, l'application proposée permettra aux entreprises industrielles de mettre en œuvre une maintenance conditionnelle pour la collecte des données, la surveillance de l'état de santé des équipements industriels et le suivi en temps réel des équipements afin d'assurer une meilleure maintenance.

Dans ce contexte, notre travail de thèse envisage de définir les états des lieux, d'exploiter ces évolutions technologiques afin d'analyser les différents apports et solutions basées sur les RCSF. Nous allons aussi proposer l'architecture du système et l'organisation matérielle, expliquer le choix des capteurs; ainsi qu'identifier des configurations de capteurs et des topologies de réseau; également le choix de la plate-forme la plus appropriée basée sur la consommation d'énergie de manière comparative à l'aide du logiciel Contiki pour prouver la validité de notre système proposé. Bien que la technique développée dans ce travail soit adaptée à cette application, elle pourrait également être utilisée dans d'autres applications traitant de la maintenance conditionnelle. Suite à cette proposition d'intégration de réseaux de capteurs intelligents pour la télésurveillance des équipements afin de mettre en œuvre une politique de maintenance conditionnelle. Nous développons une étude basée sur la simulation afin d'étudier l'impact d'intégration des réseaux de capteur intelligent sur les coûts et la fiabilité de maintenance.

Mots clés: Réseau de capteurs sans fil (RCSF), Maintenance conditionnelle, Système de télésurveillance, Consommation énergétique, Simulation, Système d'exploitation Contiki, Simulateur Cooja, Optimisation des coûts, Prise de décision.

ABSTRACT

In recent years, an increasing number of integrated and interconnected "SMART" devices are invading our environments. These smart sensor networks offer many benefits, including flexibility, low cost, ease of deployment, and more. This allows their use in various scenarios, including smart city, building automation, industrial control, energy networks, etc.

The integration of this technology in the case of remote maintenance applications combining IT solutions with conditional maintenance has not yet been considered. As a result, the wireless sensor network (RCSF) can anticipate issues of dependability, maintenance failure and play a key role in Industry 4.0. This has led to a rapid expansion in smart factories and intelligent production systems. Indeed, the proposed application will allow industrial companies to implement conditional maintenance to follow the state of health of industrial equipment, collecting data and real-time monitoring for better maintenance.

In this context, first we will explore the state of art, to exploit these technological evolutions in order to analyze the different contributions and solutions based on the WSN (Wireless Sensor Network). We will also propose the architecture of the system and the material organization, explains the choice of the sensors; as well as the identification of sensor configurations and network topologies; also the choice of the most appropriate platform based on energy consumption in a comparative way using Contiki software to prove the validity of our proposed system. Although the technique developed in this application, it could be also used for other applications dealing with condition maintenance. Following this proposal to integrate smart sensor networks for remote monitoring of equipment in order to implement a condition based maintenance policy. We are developing a simulation to study the integration impact of smart sensor networks on maintenance costs and reliability.

Keywords: Wireless Sensor Network (RCSF), Conditional Maintenance, Remote Monitoring System, Energy Consumption, Simulation, Contiki Operating System, Cooja Simulator, Cost optimization, Decision making.

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	2
ABSTRACT	3
I. INTRODUCTION GENERALE	12
II. PROBLEMATIQUE ET ORGANISATION DE LA THESE	13
CHAPITRE I: LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE ET LES RESEAUX DE CAPTEURS INTELLIGENTS SANS FILS : ETAT D'ART.	16
1 Introduction	17
2 Maintenance	17
2.1 Management de la maintenance	17
2.2 Aperçu sur l'évolution des stratégies de maintenance.....	18
2.2.1 Maintenance conditionnelle	20
2.2.2 La maintenance prévisionnelle.....	21
2.2.3 Télémaintenance	21
2.2.4 L'E-maintenance:.....	22
2.2.5 Maintenance 4.0.....	23
3 Nouvelles technologies intègrent la maintenance dans l'Industrie 4.0	24
4 Généralités sur la technologie des réseaux de capteurs sans fil Erreur ! Signet non défini.	
4.1 Définition d'un capteur intelligent	28
4.2 Réseaux de capteurs intelligents.....	29
4.3 Etude comparative entre capteurs classiques et capteurs intelligents.....	30
4.3.1 Les fonctions d'un capteur classique	30
4.3.2 Les fonctions d'un capteur intelligent.....	31
4.3.3 Différence fonctionnelle entre capteur classique et capteur intelligent	32
4.3.4 Avantages des réseaux de capteurs intelligents par rapport aux capteurs classiques	33
5 Etat d'art sur l'utilisation des réseaux de capteurs sans fils et les plateformes de la télésurveillance	34
5.1 Les domaines d'utilisation des réseaux de capteurs sans fils	34
5.2 Les nouvelles technologies de l'information et la maintenance industrielle.....	36
5.3 Les applications des réseaux des capteurs intelligents en maintenance industrielle.	37

6	Les plateformes et les standards supports à la maintenance conditionnelle et les systèmes de télésurveillance.....	39
6.1	La gestion de la maintenance conditionnelle: Principales références	39
6.2	Les plateformes support de la maintenance conditionnelle et les systèmes de la télésurveillance	40
6.2.1	MIMOSA	40
6.2.2	OSA-CBM	41
7	Conclusion	42
 CHAPITRE II:DEMARCHE D'INTEGRATION DE RESEAU DE CAPTEURS INTELLIGENTS DANS UN SYSTEME DE LA TELESURVEILLANCE POUR LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE		
1	Introduction.....	44
2	Conception d'une plateforme de télésurveillance pour la maintenance conditionnelle en utilisant les RCSF	44
2.1	Les objectifs de la plateforme.....	44
2.2	Approche unifiée de la maintenance conditionnelle.....	45
2.3	Les fonctions de la plateforme de télésurveillance.....	47
2.3.1	Collecte des données et surveillance des équipements	47
2.3.2	Maintenance conditionnelle et diagnostic des équipements	48
2.3.3	Accès à distance	48
2.4	Nouvelle gestion du service maintenance	50
3	Modèles graphiques de fonctionnement de la plateforme d'intégration.....	51
3.1	La modélisation sous UML (Unified Modeling Language)	51
4	Les phases conceptuelles de conception de la plateforme : aspect organisationnel et technique	52
4.1	Procédure organisationnelle d'implémentation de la maintenance conditionnelle à l'aide des RCSF	53
4.1.1	Choix des systèmes de production	53
4.1.2	Choix des paramètres significatifs du système	54
4.1.3	Choix des techniques de mesure	55
5	Exigence technique de conception d'une application de réseau de capteurs intelligents pour la maintenance conditionnelle	55
6	Étapes techniques structurées de collecte et d'analyse de données à l'aide de RCSF pour une application de la maintenance conditionnelle	57

6.1	Typologie des capteurs à installer:	58
6.2	Topologie des capteurs:	58
6.3	Positionnement des capteurs.....	59
6.4	Choix des protocoles de communication.....	60
6.5	Systèmes d'exploitation pour capteurs	61
6.5.1	TinyOS	62
6.5.2	TOSSIM.....	62
6.5.3	CASTALIA.....	62
6.5.4	COOJA.....	62
7	Conclusion	64
CHAPITRE III: SIMULATION D'UN RESEAUX DE CAPTEURS INTELLIGENTS POUR LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE : ETUDE DE CAS DANS UNE CENTRAL THERMIQUE..... 65		
1	Introduction.....	66
2	Contexte du travail	66
2.1	Motivation et choix du secteur du travail	66
2.2	Etude de cas du projet d'implémentation des réseaux de capteurs intelligents pour la maintenance conditionnelle	67
3	Implémentation des réseaux de capteurs intelligents pour la télésurveillance d'une turbine	71
3.1	Design du système.....	71
3.2	L'architecture proposée	72
3.3	Topologie des capteurs choisis.....	73
3.4	Choix des protocoles des communications proposées.....	74
3.5	Plateforme d'évaluation de la simulation.....	75
3.6	Système d'exploitation Contiki.....	76
3.6.1	Simulateur de réseau Cooja.....	76
3.6.2	Configuration expérimentale et choix des plateformes et protocoles de communication.....	77
4	Test de la simulation	79
4.1	Efficacité Energétique	81
4.2	cycle de service.....	83
4.3	Résultats de la simulation.....	84

5	Conclusion	89
CHAPITRE IV: IMPACT DU COUT DES RESEAUX DE CAPTEUR INTELLIGENT SUR LE CHOIX DE LA POLITIQUE DE MAINTENANCE CONDITIONNELLE 90		
1	Introduction.....	91
2	Description du modèle et hypothèse	94
2.1	Formulation du modèle de maintenance.....	94
2.1.1	Le coût de la maintenance corrective:.....	94
2.1.2	Coût de la maintenance conditionnelle	95
3	Modélisation de la fiabilité basée sur les prévisions	96
3.1	Modélisation de la fiabilité	96
4	Formulation et optimisation du modèle de maintenance	97
4.1	Hypothèses	99
4.2	Cadre quantitatif pour choisir la politique de maintenance.....	99
4.3	Analyse financière	102
5	Exemple numérique	102
6	Conclusion	107
Conclusions et perspectives		108
Bibliographies.....		112
Annexes		121
Liste des travaux scientifiques réalisés.....		131

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Volets de développement de la maintenance conditionnelle	14
Figure 2: Evolution des stratégies de la maintenance au cours du temps	19
Figure 3: Les étapes du programme de la maintenance conditionnelle (Jardine et al. 2006)	20
Figure 4: Architecture de télémaintenance (Rasovska et al. 2007)	22
Figure 5: Architecture du concept d'e-maintenance	23
Figure 6: Processus de la maintenance intelligente 4.0	24
Figure 7: Représentation d'un capteur intelligent	28
Figure 8: architecture d'un nœud sans fil pour la surveillance et le contrôle de processus	29
Figure 9: Réseaux de capteurs intelligents (Béjaïa & Rosa 2016.)	30
Figure 10: les fonctions d'un capteur classique	31
Figure 11: Diagramme FAST d'un réseau de capteurs intelligents pour la télésurveillance.	32
Figure 12: Les actions menées dans un capteur intelligent	33
Figure 13: Architecture industrielle de RCSF (Gope et al. 2019)	37
Figure 14: L'architecture OSA-CBM (Lebold, Reichard, Byington, et al. 2002)	41
Figure 15: Diagramme des buts	45
Figure 16: Approche unifiée de la maintenance conditionnelle	47
Figure 17: Vue d'ensemble des fonctions de la plate-forme commune	49
Figure 18: Gestion des tâches de la maintenance dans le cadre de notre plateforme	50
Figure 19: Structure de base de la solution CBM présentée dans un diagramme UML ..	52
Figure 20: BPMN diagramme du processus d'identification des équipements à surveiller	53
Figure 21: BPMN diagramme du processus Collecte et communication des données	58
Figure 22: Topologie des capteurs	59
Figure 23: Turbo-alternateur choisi pour l'étude de cas, 75 MW	68
Figure 25: Mesure de position de vibration	69
Figure 24: Palier de butée	69
Figure 26: Palier de butée	70
Figure 27: Composition du système	72

Figure 28: Conception de l'architecture proposée	73
Figure 29: Interface Contiki	77
Figure 30: Logarithme de simulation de la maintenance conditionnelle au niveau des capteurs	80
Figure 31: Logigramme du choix de la plateforme de simulation	81
Figure 32: Evolution de la Consommation d'énergie	83
Figure 33: Duty cycle	84
Figure 34: visualisation des capteurs sur Cooja	85
Figure 35: Communication entre les nœuds sur le simulateur Cooja	86
Figure 36: messages envoyés par les capteurs (valeurs normales, valeurs alarmées et valeurs d'arrêt)	88
Figure 37: Cadre du modèle décisionnel proposé	101
Figure 38: Variation de la fiabilité en fonction du temps	103
Figure 39: Effet de la fiabilité sur le coût de la maintenance prédictive	104
Figure 40: coût unitaire attendu en fonction de la fiabilité et du coût des capteurs	104
Figure 41: Cost comparisons B=2,3	106
Figure 42: Technologies utilisées dans l'industrie 4.0	111
Figure 43: Exemple général d'une classe	123
Figure 44: Exemple d'héritage	123
Figure 45: Exemple d'une association	124
Figure 46: Exemple d'une agrégation	125
Figure 47: Exemple d'une composition	125
Figure 48: Extrait du code de fonctionnement des capteurs	127
Figure 49: Extrait du programme de la communication entre les nœuds et le nœud central	128
Figure 50: Extrait du programme de l'estimation énergétique	130

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: maintenance management (García & García 2018)	18
Tableau 2:Capacités des technologies de l'Industrie 4.0 (García & García 2019)	27
Tableau 3: Technologies radio à courte portée et cartographie des applications dans le réseau WSN industriel.	61
Tableau 4: Comparaison de simulateur (Jevtić et al. 2009)	63
Tableau 5: Les caractéristiques et la configuration utilisée dans la simulation	75
Tableau 6: Une fonctionnalité de configuration utilisée dans la simulation	78
Tableau 7: état d'art sur les coûts de la maintenance	93
Tableau 8:résultats de simulation du coût unitaire prévu de la maintenance conditionnelle.....	104
Tableau 9:Résultats de la simulation de l'impact des temps d'arrêt sur le coût unitaire prévu	105

LISTE DES ABREVIATIONS

A

AFNOR : *Association Française de*

B

BPMN : *Business Process Model and Notation*

C

CBM : *Condition Based Maintenance*

CMMS : *Computerized Maintenance Management System*

CPU : *Central processing unit*

CPS: *Cyber physical system*

E

EAI : *Enterprise Application Integration*

F

FAST : *Functional Analysis System Technic*

G

GMAO : *gestion de maintenance assistée par ordinateur*

I

IMS : *Intelligent Maintenance System*

IoT : *Internet of Thing*

L

LoWPAN : *Low power Wireless Personal Area Networks*

LPM : *Low Powered Mode*

LTE : *Long Term Evolution,*

M

MIMOSA : *Machinery Information Management Open Systems Alliance*

MTTF : *Mean Time To Failure*

MTTR *Mean Time To Repair*

O

OS : *Open Source*

OSA-CBM : *Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance*

R

RCM : *Reliability Centred Maintenance*

RCSF : *réseaux de capteurs sans fil*

RFID : *Radio-frequency identification*

U

UML : *Unified Modeling Language*

W

WSN : *Wireless Sensor Network*

INTRODUCTION GENERALE

I. LE CONTEXTE GENERAL DE LA THESE

Le développement des nouveaux secteurs industriels au Maroc, en redéployant les efforts pour la mise en place des industries d'automobile, de l'électronique et de l'aéronautique et leurs sous-traitant permettent à notre pays de trouver sa place dans le nouvel ordre industriel mondial. Dans ce cadre, d'une thématique extrêmement importante et très récente, nos études ont tendance de plus en plus forte à adopter des nouvelles technologies comme celle de l'implémentation des réseaux des capteurs intelligents. Parmi ces avantages, demeure le développement d'une méthode de pronostic, le contrôle des équipements à distance qui facilitera le suivi de leurs états de fonctionnement. Ainsi que, l'optimisation des coûts de la maintenance, surtout dans un contexte délocalisé pour les entreprises qui disposent de plusieurs sites de production distribués géographiquement et possèdent des équipements complexes qui nécessitent des interventions de maintenance de différents niveaux.

Ce travail permettra aussi d'avoir des points de repères et de consolider le savoir-faire pour les industriels et les prestataires de service maintenance en matière de mise en œuvre d'un système de télésurveillance à base de capteurs intelligents. D'autre part, ce travail engendre un apport capital pour les entreprises marocaines, dans la mesure où il permettra de faciliter la migration vers une maintenance conditionnelle intelligente, et par conséquent ces technologie vont accompagner les entreprises à mieux prendre le virage de la transition numérique et faire face aux changements induits par ces nouveaux environnements technologiques connectés, créative et optimisés ce qui facilite directement la migration vers l'ère de l'industrie 4.0.(Industrie & Française 2012) (Ravnå et al. 2016).

C'est dans cette perspective que nous situons notre travail de recherche de cette thèse. Nous visons à inscrire nos contributions dans le domaine de la télésurveillance industrielle, en effectuant d'une part l'état des lieux de l'émergence des réseaux de capteurs intelligents ainsi que le positionnement de la fonction maintenance dans le tissu de l'industrie 4.0. Afin de concevoir une plateforme de maintenance à distance avec une politique de travail adaptée à cette plateforme, le but étant de répondre à notre problématique imposée par la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle en utilisant ces nouvelles technologies de l'information et de communication. Entre autre, l'utilisation de la nouvelle technologie des réseaux de

capteurs sans fil (RCSF) pour la télésurveillance d'un système de production est rarement couverte dans la littérature. Pour ceci, notre travail consiste à mettre en œuvre une démarche de la télésurveillance qui permet la résolution d'un problème d'optimisation de la maintenance conditionnelle. Cette dernière tient en compte des nouvelles technologies des RCSF qui permettent de dépasser les limites de la télésurveillance avec les capteurs classiques, et sera une piste intéressante pour l'appliquer aux systèmes de production.

Dans un cadre d'optimisation des coûts de la maintenance, nous développons une étude économique afin de comparer l'impact économique de deux stratégies de maintenance, la stratégie de maintenance en cas de défaillance traditionnelle et la stratégie de maintenance conditionnelle en utilisant des informations de capteur de réseau intelligent. La simulation développée dans ce travail permet de faire une comparaison lorsque le coût de remplacement d'un composant avant sa défaillance à l'aide de capteurs intelligents est inférieur au coût de remplacement du composant après sa défaillance, pour conclure, s'il est judicieux d'investir dans cette technologie pour maintenir le composant préventivement. En outre, avec cette approche proposée, le décideur pourrait être en mesure de justifier dans un cadre économique approprié le coût optimal, sur la base d'une comparaison en intégrant les deux paramètres justificatifs à savoir: le coût de panne et le coût des capteurs. Les entreprises peuvent utiliser cette méthode pour prendre une décision lorsqu'elles envisagent de mettre en place une surveillance à distance. Pour illustrer l'utilisation et les avantages de cette comparaison, un exemple numérique est étudié.

II. PROBLEMATIQUE ET ORGANISATION DE LA THESE

L'objectif de notre recherche consiste à intégrer les nouvelles technologies de réseaux de capteurs intelligents dans le processus de maintenance industriel. En particulier, la maintenance conditionnelle. Ce qui nous a mené à creuser dans cette recherche, est trouver des systèmes de télésurveillance efficaces et peu coûteux basés sur des capteurs intelligents pour la maintenance conditionnelle des équipements industrielles. Cette concrétisation permet à l'industrie de vérifier la viabilité de toutes les applications RCSF avant de les utiliser dans ses environnements; ce qui aide à réduire les coûts d'exploitation et améliore le suivi en temps réel de la maintenance conditionnelle. À cet égard, Cette détection en temps réel permet une réactivité dans la prise des décisions et la prévention contre les risques et les défaillances.

Cette thèse est organisée de manière à fournir des cadres et des directives pour soutenir le développement et la mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle. La figure 1 indique les zones principales d'intérêt de cette recherche. Au début de la prise de décision concernant la

mise en œuvre, l'entreprise doit décider si la maintenance conditionnelle est adaptée à sa situation en fonction de facteurs techniques, organisationnels et économiques. Ces volets peuvent contribuer à la gestion globale de la maintenance et peuvent donc améliorer la compétitivité des entreprises vis-à-vis de leurs systèmes de production.

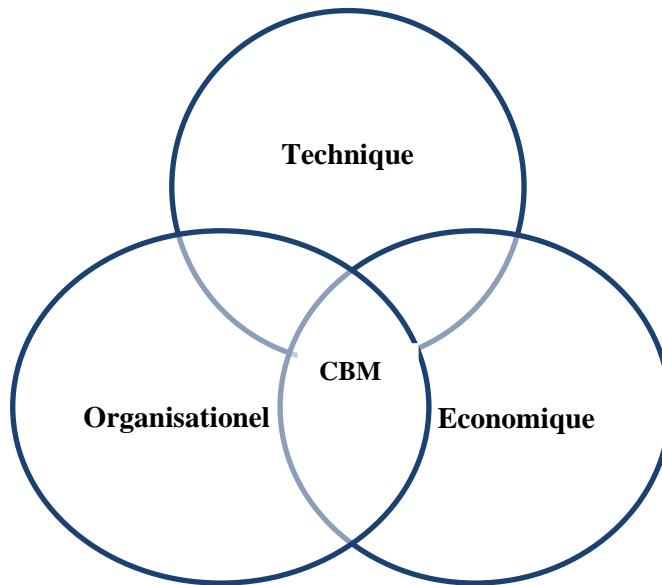


Figure 1: Volets de développement de la maintenance conditionnelle

Le premier chapitre de notre manuscrit présente un aperçu sur l'évolution des stratégies de la maintenance ainsi que la technologie, et les applications des réseaux de capteurs; Nous montrerons l'architecture physique des capteurs ainsi que les différents systèmes utilisés dans les capteurs et les réseaux de capteurs. Ensuite nous présentons les différentes applications des réseaux de capteurs et nous détaillerons les applications dans le domaine de la maintenance industrielle, enfin nous exposerons quelques projets et architecture déjà réalisés pour la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle. Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter une plateforme de la télésurveillance ainsi qu'une démarche générique sur les différentes étapes nécessaire pour l'implémentation d'un système de télésurveillance à l'aide des RCSF.

Dans le troisième chapitre, nous allons mettre en œuvre notre système de la télésurveillance à l'aide des RCSF, en tenant en compte les contraintes de la conception du réseau de capteurs. Aussi nous allons faire le point sur les choix technologiques possibles ainsi que la plate-forme de test et l'implémentation expérimentale pour évaluer la fiabilité de notre conception.

Dans le cadre d'une étude économique, le quatrième chapitre présente une simulation qui permet de connaître l'impact d'intégration des réseaux de capteur intelligent sur les coûts de la maintenance. Les méthodes sont basées sur le coût par unité de temps pour montrer comment les différents paramètres ont un impact sur le coût de la maintenance. Nous allons procéder à une étude comparative pour distinguer l'impact économique des deux politiques de maintenance à savoir : la politique traditionnelle et la politique conditionnelle. Enfin, nous présentons une conclusion, discussion et propositions des travaux futurs.

**CHAPITRE I: LA MAINTENANCE
CONDITIONNELLE ET LES RESEAUX DE
CAPTEURS INTELLIGENTS SANS FILS : ETAT
D'ART.**

1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux concepts clés utilisés dans notre sujet de thèse, à savoir la maintenance conditionnelle et les nouvelles technologies de Réseaux de Capteurs Sans Fils (RCSF), ainsi que leurs synthèses bibliographiques. En premier lieu nous allons présenter un aperçu sur les différentes stratégies de la maintenance en mettant l'accent sur la maintenance conditionnelle et les nouvelles politiques de maintenance qui intègrent les technologies de l'information et de la télécommunication. Dans un second temps, nous présentons les technologies des réseaux de capteurs intelligents, en commençant par la définition de ces technologies, ainsi qu'une analyse fonctionnelle comparative entre les technologies filaires et sans fil. Ensuite, nous présentons l'état d'art relatif aux domaines d'utilisation des réseaux de capteurs intelligents et leur intégration dans la maintenance industrielle. Enfin nous exposerons quelques normes, projets et architecture déjà réalisés pour la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle.

2 MAINTENANCE

2.1 Management de la maintenance

Avec les processus de production hautement intégrés et les calendriers serrés utilisés dans la production aujourd'hui, il est essentiel que l'équipement soit fiable, efficace et maintenu à sa capacité maximale. La norme européenne EN 13306 (British Standards Institution 2010) a défini la maintenance comme combinaison de toutes les actions techniques, administratives et de gestion au cours du cycle de vie d'un article. Ces actions sont destinées à conserver ou à restaurer cet article dans un état dans lequel il peut remplir une fonction requise.

Le management de la maintenance correspond à toutes les activités de la direction qui déterminent les objectifs, les stratégies et les responsabilités de maintenance et leurs mises en œuvre via des moyens tels que la planification, le contrôle et l'amélioration des activités de maintenance et de l'économie. La fonction maintenance est présentée comme un ensemble d'activités regroupées en trois aspects suivants, ces activités sont présentées dans le tableau 1 (García & García 2018):

- **Les activités relatives à la gestion stratégique** : ce niveau comprend l'élaboration des décisions non programmables telles que les objectifs de l'entreprise ou des services sur le long terme, ainsi que le contrôle de l'ensemble de l'activité

- **Les activités relatives à la gestion tactique :** ce niveau comprend la gestion du processus de maintenance et la gestion des ressources humaines.
- **Les activités relatives à la gestion opérationnelle:** ce niveau correspond à l'exécution des décisions prises.

Gestion opérationnelle et planification des tâches	Gestion tactique et planification des tâches	Gestion stratégique et planification des tâches
<p>-Planification et contrôle des activités de maintenance:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Planification des ordres de maintenance ▪ Préparation des matériels ▪ Contrôle d'exécution des ordres de maintenance ▪ Rétroaction concernant l'état de la machine <p>-Calcul des coûts de la maintenance</p> <p>-Coordination des commandes et des ressources humaines avec différents services.</p> <p>-Mesure et calcul des indicateurs</p> <p>-Coordination des activités de maintenance réalisées par des sociétés externes</p>	<p>-Planification des exigences de maintenance</p> <p>-Planification et répartition des coûts</p> <p>-Planification approximative des ressources de maintenance: personnel, outils, matériaux, pièces de rechange</p> <p>-Planification approximative des ordres de maintenance</p> <p>-Sélection des systèmes informatiques</p> <p>-Création de programmes de maintenance</p> <p>-Sélection des fournisseurs</p> <p>-Observation et évaluation continues des performances internes de la machine, du personnel et des stocks</p> <p>-Gestion des connaissances</p>	<p>-Principes, directives</p> <p>-Création d'un programme d'investissement</p> <p>-Planification de la stratégie de maintenance (corrective, préventive, etc.)</p> <p>-Système cible (disponibilité, coût)</p> <p>-Définition des ressources de maintenance: budget, personnel, planification des équipes</p> <p>-Définition des activités de maintenance</p> <p>-Prise de décision (faire ou acheter)</p> <p>-Observation et évaluation continues de l'environnement de production</p>

Tableau 1: maintenance management (García & García 2018)

2.2 Aperçu sur l'évolution des stratégies de maintenance

La maintenance industrielle a longtemps joué le rôle curatif (maintenance non planifiée) qui n'a lieu qu'en cas de panne, son unique objectif était de réduire la durée d'immobilisation

des machines et des installations industrielles (Sheu & Krajewski 1994) (Fang & Zhaodong 2015). Une technique de maintenance ultérieure est la maintenance préventive basée sur le temps (Technology 2010) (Tseng 1996) également appelée maintenance planifiée, qui définit un échéancier ou une unité d'usage pour effectuer la maintenance préventive quelque soit l'état de santé des actifs physiques. Cependant les systèmes de production sont devenus de plus en plus complexes ainsi un grand niveau de fiabilité est requise. Cela augmente davantage le coût de la maintenance préventive qui est devenue une source de dépenses majeures de nombreuses entreprises industrielles. Par la suite une nouvelle maintenance a été créée grâce à l'évolution des méthodes de diagnostic et du contrôle, ces derniers visent à utiliser des techniques de prévisions de pannes comme l'analyse vibratoire (Tahar BELKHIR Med. et al., 2016), cette maintenance est dite préventive conditionnelle, elle permet de remplacer les pièces juste avant leurs ruptures. Dernièrement la maintenance s'évolue et migre avec l'usage des nouvelles technologies de l'information et de télécommunication vers des nouvelles stratégies comme la télémaintenance, e-maintenance et la maintenance 4.0 qui suit l'évolution de l'industrie 4.0 (Chesworth & Beng 2018) (La figure 1 présente les stratégies de la maintenance et leur évolution au cours des années), les paragraphes suivants décrivent ces stratégies de maintenance.

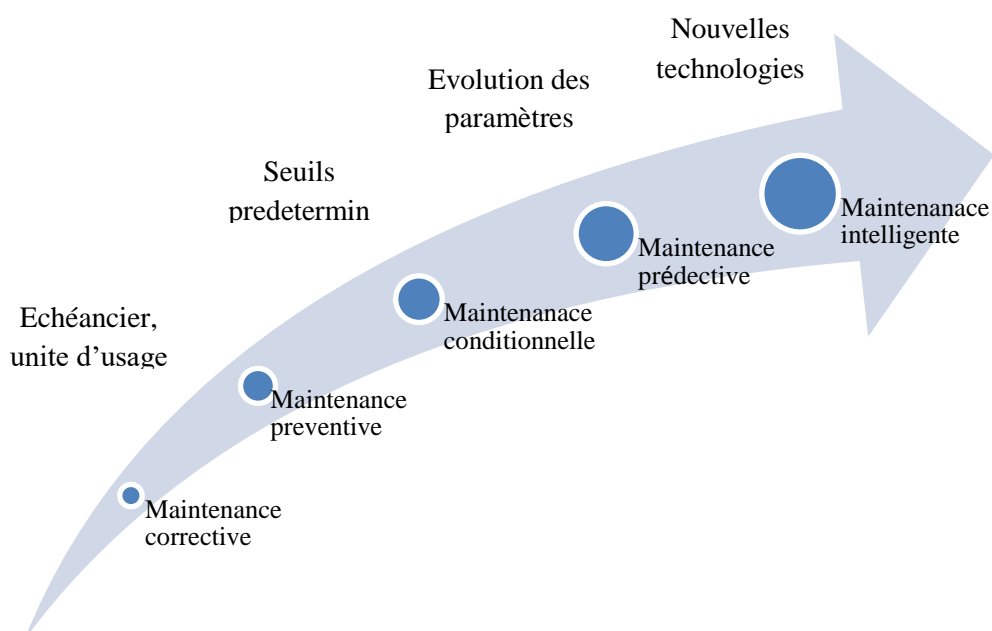


Figure 2:Evolution des stratégies de la maintenance au cours du temps

2.2.1 Maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle ou (CBM) selon la Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001) est une maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. C'est un type de maintenance qui recommande des actions de maintenance basées sur les informations collectées à travers la surveillance de l'état de système de production. Cette politique essaie d'éviter des tâches de maintenance inutiles en prenant en charge des actions seulement lorsqu'il existe des preuves de comportements anormaux d'un actif physique (Albert H.C. Tsang 1995).

La maintenance conditionnelle propose des règles de décision subordonnées aux niveaux d'indicateurs. Ces indicateurs sont mesurés directement sur le système pendant son fonctionnement ou obtenus par traitement de mesures, ces derniers permettent de présenter le niveau de dégradation. Cette stratégie s'appuie donc sur la dégradation du matériel à travers un paramètre de fonctionnement et non sur sa défaillance. Elle permet de déclencher l'opération de maintenance lors du franchissement d'un seuil (Arnaud Martinez. et al., 2014) (Wang 2000) (qui représente le niveau de dégradation maximal tolérable) par un indicateur, c'est à dire lorsque l'état réel du matériel courant l'exige. Toutefois le déclenchement de l'opération de maintenance est subordonné à un événement dont la prédiction permettrait d'appréhender en amont son occurrence. Ce type de maintenance est défini selon trois étapes comme indiquées sur la figure3.



Figure 3: Les étapes du programme de la maintenance conditionnelle (Jardine et al. 2006)

- **Étape d'acquisition des données** : L'acquisition de données est un processus de collecte et de stockage de données utiles à partir d'actifs physiques. Ce processus est une étape essentielle dans la mise en œuvre d'un programme de la maintenance conditionnelle pour le diagnostic et le pronostic des pannes de machines.
- **La phase de traitement des données** : cette étape traite et analyse les données ou les signaux collectés pour les interpréter. Comprend deux catégories principales de techniques de maintenance: le diagnostic et le pronostic (Jardine et al. 2006). Les

diagnostics se concentrent sur la détection, l'isolation et l'identification des erreurs lorsqu'elles se produisent, tandis que les pronostics tentent de prédire les erreurs ou les défaillances avant qu'elles ne se produisent. Le pronostic s'efforce de prévenir les pannes ou les défaillances, ou du moins a préparé les pièces de rechange et les ressources humaines planifiées pour y faire face et évite ainsi des coûts de maintenance non planifiés. Le diagnostic peut aider à améliorer les pronostics en rendant les informations de diagnostic utiles pour la préparation de données d'événements plus précises et partant, pour la création d'un meilleur modèle de surveillance communautaire pour les pronostics.

- **Étape de prise de décision** : Cette étape est recommandée pour le choix des actions de la maintenance efficaces.

2.2.2 La maintenance prévisionnelle

la maintenance prévisionnelle c'est une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien selon la norme NF EN 13306 X 60-319, aussi appelée « maintenance anticipée » (Hashemian 2010), Elle permet d'évaluer l'évolution future des indicateurs considérés comme représentatifs de l'état de santé du matériel et permet de déduire, par le franchissement d'un seuil, la date de la future défaillance ou l'intervalle de temps compris entre l'instant présent et cette date appelé durée de vie résiduelle ou RUL (Remaining Useful Life). Ces évaluations doivent donc prédire les évolutions futures des matériels en considérant l'ensemble des paramètres influents provenant des contextes opérationnel et environnemental futurs ainsi que des actions de maintenance futures.

2.2.3 Télémaintenance

La télémaintenance est une technique d'exécution de la maintenance d'un bien sans l'accès physique du personnel au bien (AFNOR NF-EN 13306. X60-319, 57p). Cette notion, en effet, désigne la maintenance à distance d'un système via un moyen de communication. Elle autorise l'incorporation à distance des activités de maintenance par la mise en place des moyens de télécommunication garantissant la répartition des tâches de maintenance entre des unités fonctionnelles et un centre spécialisé. Son architecture se compose de deux systèmes : L'un des systèmes peut fonctionner comme un système d'acquisition de données ; il représente l'émetteur de données structurées. Le deuxième système est le récepteur, fonctionnant comme un système de traitement de données. Le système émetteur peut envoyer

les données automatiquement ou comme réponse à une requête de la part du système récepteur des données.

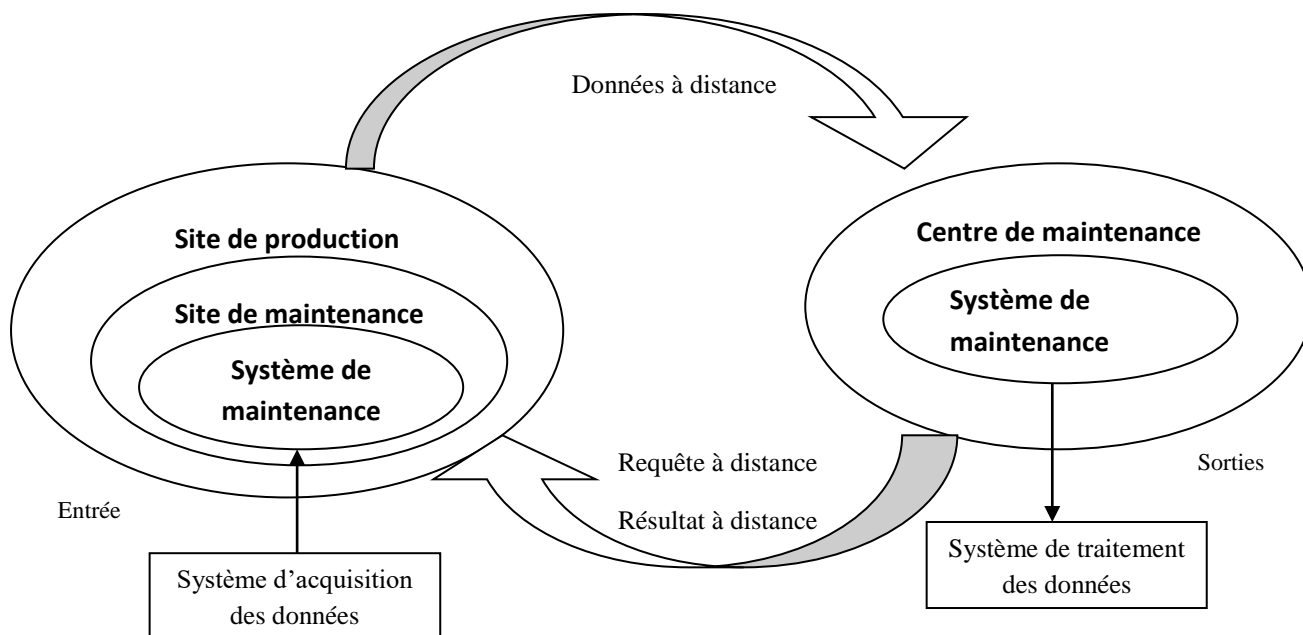


Figure 4: Architecture de télémaintenance (Rasovska et al. 2007)

2.2.4 L'E-maintenance:

La e-Maintenance est une expression qui est composée de deux parties le « e » et maintenance, le « e » est défini comme e-service (service électronique via internet). C'est un concept intégrant le principe de base de télémaintenance (tout ce qui est web services, Wireless, service intelligent...), et qui est liée aux notions de web-services, de coopération et de partage des connaissances (Muller et al. 2008) et via l'interopérabilité qui représente la capacité que possède un produit ou un système à fonctionner avec d'autres produits ou avec des systèmes existants ou futurs sans restriction d'accès ou de mise en œuvre (AFUL, 2017).

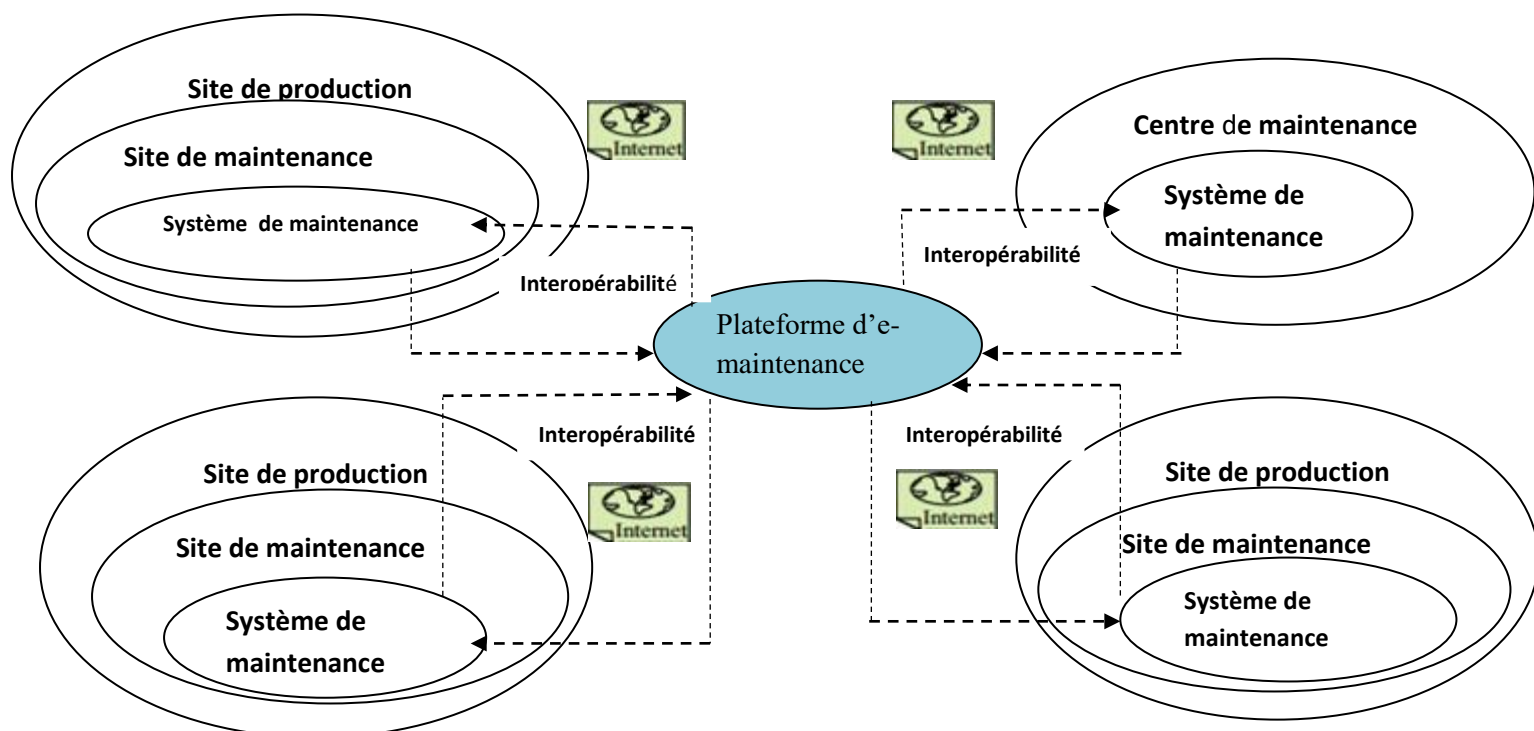


Figure 5: Architecture du concept d'e-maintenance

2.2.5 Maintenance 4.0

Elle permet de connaître en temps réel l'état des équipements en lui fournissant des informations détaillées sur les paramètres pouvant impacter ceux-ci, afin d'anticiper les pannes machines tout en minimisant les coûts des opérations de maintenance grâce à l'intégration de l'Internet des objets (IoT) dans le processus de fabrication. Ces derniers permettent aux objets, tels que, les capteurs intelligents, RFID, actionneurs, téléphones portables, PC... d'être connectés, coopérés et d'interagir avec les composants «intelligents» voisins pour atteindre des objectifs communs. De même l'utilisation des solutions informatiques innovantes (l'intelligence artificielle et l'E-learning...) qui facilitent le traitement des données reçues. Ceci pourra avertir les défaillances imminentes et les anomalies (Yan et al. 2017). Ce type de maintenance est l'un des piliers les plus rentables de l'industrie 4.0 (Cachada et al. 2018) et les usines intelligentes qui commencent à attirer les chercheurs et les pouvoirs publics. La figure 5 décrit les processus de ce type de maintenance.

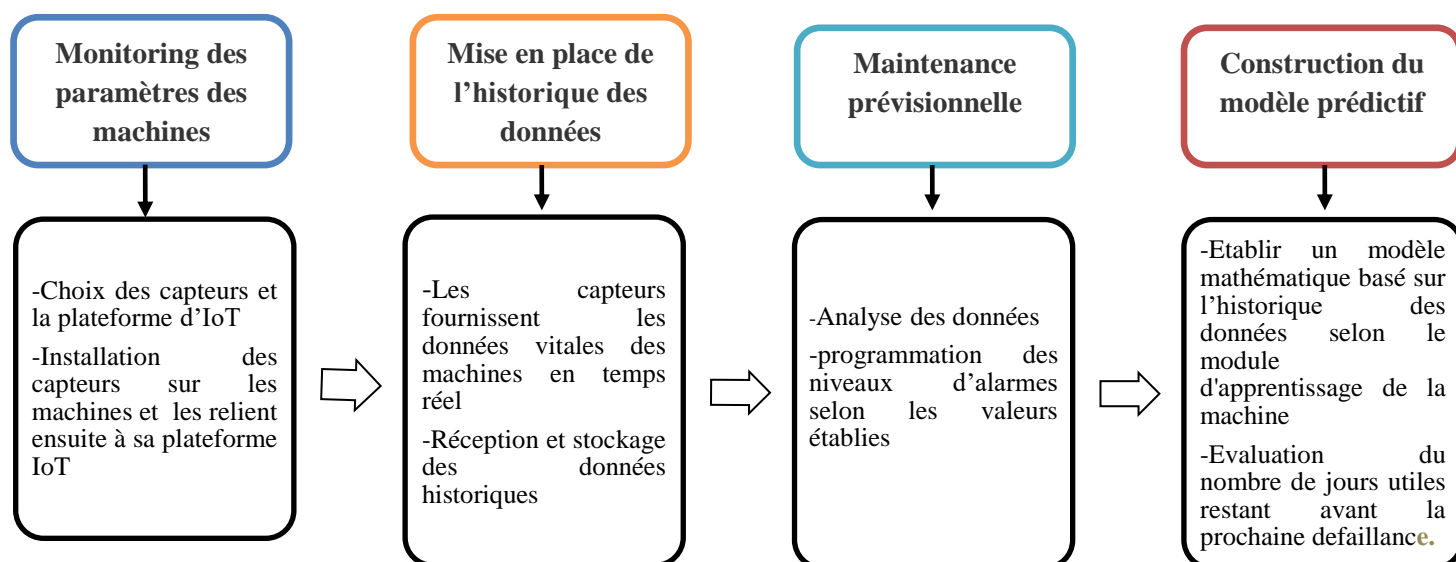


Figure 6: Processus de la maintenance intelligente 4.0

3 NOUVELLES TECHNOLOGIES INTEGRANT LA MAINTENANCE DANS L'INDUSTRIE 4.0

Le but de toutes les industries du monde est le développement d'une nouvelle génération d'usines intelligentes basées sur la numérisation des processus de production. Ces usines de l'ère 4.0 utilisent des technologies numériques et des données en temps réel pour améliorer la prise de décision, l'efficacité et l'agilité de ses processus administratifs et opérationnels, tout en permettant la personnalisation de masse, tant au niveau des produits que des services offerts à ses clients (SÉBASTIEN GAMACHE. et al., 2019.)

Pour une mise en œuvre réussie de la transformation en industrie 4.0, chaque entité adapte son modèle d'affaires et son positionnement stratégique avec ces nouvelles technologies. (Com n.d.) Propose une démarche pour aborder le déploiement de l'Industrie 4.0 :

- **Choisir le positionnement stratégique face aux opportunités de l'Industrie 4.0 :** Déterminer les efforts sur lesquels les entreprises doivent se focaliser pour le développement de ses processus, de ses produits ou de ses services. Est ce qu'ils se distinguent par leur capacité de surveillance, de contrôle, d'optimisation ou d'autonomie ?
- **Choisir les leviers technologiques pour répondre au défi de l'Industrie 4.0 et investir et déployer les solutions technologiques choisies :** les processus de production doivent se baser sur certaines technologies révolutionnaires (Ustundag & Cevikcan 2018) qui permettent l'amélioration quotidienne des processus industriels. Nous allons décrire quelques unes des technologies majeures que l'on trouve au cœur de cette révolution industrielle:

- **IOT :** « L'Internet des Objets est un réseau de réseaux qui permet, via des systèmes d'identification électronique normalisés et unifiés, et des dispositifs mobiles sans fil, d'identifier directement et sans ambiguïté des entités numériques et des objets physiques et ainsi de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter, sans discontinuité entre les mondes physiques et virtuels, les données s'y rattachant. » (Pierre-Jean Benghozi, Sylvain Bureau et Françoise Massit-Folléa (Edition MSH)). Autrement L'Internet des objets est «un réseau mondial d'objets interconnectés adressables de manière unique, basés sur des protocoles de communication standard » (Atzori et al. 2010). Cependant les infrastructures informatiques classiques ne permettent plus de stocker ou traiter ce volume des données de manière efficace. Le Cloud et le Big Data sont des réponses à ces problématiques.
- **Technologies du Cloud :** Le Cloud est composé de nombreuses technologies qui permettent d'exploiter la puissance de calcul et de stockage des serveurs informatiques distants. Ainsi, au lieu d'avoir des infrastructures informatiques en local, le Cloud permet le traitement d'un grand nombre d'informations (grâce à une grande puissance du calcul) et le stockage de grands volumes de données. Cette technologie se marie parfaitement avec les nouveaux besoins de l'industrie 4.0 et permet d'accompagner les évolutions du système d'infonuagique avec des investissements adaptés aux besoins (Liu & Xu 2017).
- **Big data:** "Le Big Data (ou mégadonnées) représente les collections de données caractérisées par un volume, une vitesse et une variété si grands que leurs transformations en valeur utilisable. Elle requiert l'utilisation des technologies et des méthodes analytiques spécifiques." (Liu & Xu 2017). Ce dernier joue un rôle central dans le traitement de l'énorme volume d'information qui constitue aujourd'hui le système d'information d'une industrie.
- **Les systèmes cyber-physiques** (Cyber physical system): sont dits cyber-physiques car ils se caractérisent par la connectivité entre le monde physique et virtuel. Ce sont des mécanismes qui permettent de collecter des données via les systèmes embarqués (capteurs, actionneurs, etc.), et des réseaux de transmission d'information ainsi que des organes de commandes qui vont agir sur la partie physique. (Ervural & Ervural 2018). Les CPS permettent de contrôler les processus en temps réel et prendre des décisions automatisées.
- **Intelligence artificielle:** la capacité d'un logiciel à simuler l'intelligence humaine, notamment via l'apprentissage, la gestion de la mémoire et le raisonnement critique, (Ducrey et Vivier 2017), afin d'exploiter toutes ces données pour en déduire des

tendances et faire des prédictions sur le comportement de la donnée dans le temps. En donnant du sens aux données, l'intelligence artificielle ne sera plus seulement un acteur dans l'analyse mais devient aussi acteur dans la prise de décision automatisée et le pilotage des machines.

- **Technologie de virtualisation:** Selon le HUB Institute (2017), c'est une technique qui permet de visualiser en direct des objets ou environnements physiques de manière améliorée à l'aide d'un support numérique (Lunettes, Tablettes, Smartphone, ...). Le flux vidéo affiché, retranscrit le monde physique agrémenté d'informations supplémentaires. Cette technologie joue un rôle prépondérant dans la maintenance industrielle, elle permet d'informer et former de manière didactique et visuelle les opérateurs au cœur de la production. A chaque déplacement de la tablette tactile, l'opérateur visualise en temps réel la machine qu'il observe et la scène est automatiquement augmentée à l'aide d'informations pertinentes, explicatives et visuelles.
- **Les cobots:** C'est la contraction entre le terme 'collaborative' et 'Robots'. C'est des petits et légers robots travaillant directement avec l'opérateur et le soulageant en réalisant les tâches les plus difficiles et contraignantes pour lui. Cette technologie, qui fait d'ores et déjà fureur au sein de l'usine 4.0, permet à l'opérateur de gagner en productivité et ne présente absolument aucun danger sur le lieu de travail.
- **Capteurs et actionneurs:** technologies de base pour les systèmes embarqués. Les capteurs sont utilisés pour capturer directement des données physiques et des actionneurs pour influencer les processus physiques.
- **Simulation :** C'est l'intégration des différents outils informatiques et l'utilisation de logiciels spécialisés pour modéliser, simuler, tester et optimiser notamment le paramétrage des machines et les flux avant de transposer ces changements dans le monde réel. Ceci permet alors de diminuer les temps de mise en course des machines, les temps de réglage et d'augmenter leurs disponibilités
- **Cybersécurité :** La cybersécurité consiste à ce que les ressources numériques d'une entreprise, qu'elles soient matérielles (ex : puce, calculateur, PC, robot, machine à commande numérique...), logicielles (ex : programmes et données), ou de communication (ex : Wifi, internet) soient préservées de toutes les attaques qui pourraient les détourner de leur fonctionnement (Cti Réseau). La croissance des objets connectés en production, des appareils mobiles et de l'informatique exige qu'une entreprise développe une gestion

de la sécurité informatique pour garantir que les données stockées et qui transitent sur le réseau, ne soient pas impactées par les cyber-attaques.

Le tableau suivant donne un aperçu sur les principales capacités fournies par les technologies supports de l'industrie 4.0 :

Principales capacités des technologies de l'industrie 4.0			
Technologie	Capacité 1	Capacité 2	Capacité 3
Capteurs et actionneurs	Suivi en temps réel	Documentation continue et collecte de données	Disponibilité du système
Technologies mobiles	Traitement et enregistrement de grandes quantités d'informations	Réception de grandes quantités d'informations	Transmission de grandes quantités d'informations
Systèmes cyber physiques	traitement des données en temps réel et retour d'informations	Capacité de calcul	Capacité de prise de décision
Virtualisation technologies (VR & AR)	Re-création en environnement réel des processus virtuels	Combinaison du monde réel actions et éléments numériques	3D Digital twin
Simulation	Aide à la prise de décision	Évaluation et développement de règles de planification autonomes	Modèle numérique Twin
Analyse des données et IA	Grande quantité de données pouvant être analysées en peu de temps	Conservation de la connaissance des données	Capacité d'apprendre des données
Communication et réseautage	Connectivité entre agents	Interaction entre agents	Connectivité et interaction n'importe où à tout moment et n'importe quoi
Cloud	Location et indépendance d'approvisionnement	Accès omniprésent	Entreprise intégrée (environnement et opérations)
La cyber-sécurité	Sécurité de l'exportation des données	Règlements de confidentialité et de protocoles de communication	Niveau d'autorisation personnelle pour le partage d'informations

Tableau 2: Capacités des technologies de l'Industrie 4.0 (García & García 2019)

Notre but est de proposer un service de maintenance qui s'aligne avec l'ère de l'industrie 4.0 via une plate-forme distribuée de télésurveillance. Cette dernière est assurée par l'utilisation des réseaux de capteurs intelligents, des algorithmes permettant l'analyse des données et des opérations liées aux machines, et des logiciels intelligents et connectés. La plate forme permet une surveillance complète des machines de production et des diagnostics anticipés à travers la programmation des alertes et notifications dans des situations anormales. La finalité de cette solution est l'automatisation des actions de maintenance et la possession d'un historique de fonctionnement permettant d'éclaircir une éventuelle prise de décision. Nous allons présenter dans la partie suivante la nouvelle technologie des réseaux de capteurs sans fils.

4 GENERALITES SUR LA TECHNOLOGIE DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL

4.1 Définition d'un capteur intelligent

Les capteurs intelligents "Smart Sensors" (figure7) sont des dispositifs capables de générer des données relatives à leur environnement physique (Beylot et al. n.d.), dans lesquels coexistent les capteurs et les circuits de traitement et de communication. Ces derniers sont des "capteurs d'informations" et non pas simplement des capteurs et des circuits de traitement du signal juxtaposés. De plus, ces capteurs ne sont pas des dispositifs banalisés car chacun de leurs constituants a été conçu dans l'objectif d'une application bien spécifique. Les nœuds de capteurs intelligents sont composés des dispositifs d'alimentation, un processeur, une mémoire, une alimentation, une radio et un actionneur (voir figure 8) (Low et al. 2005).



Figure 7: Représentation d'un capteur intelligent

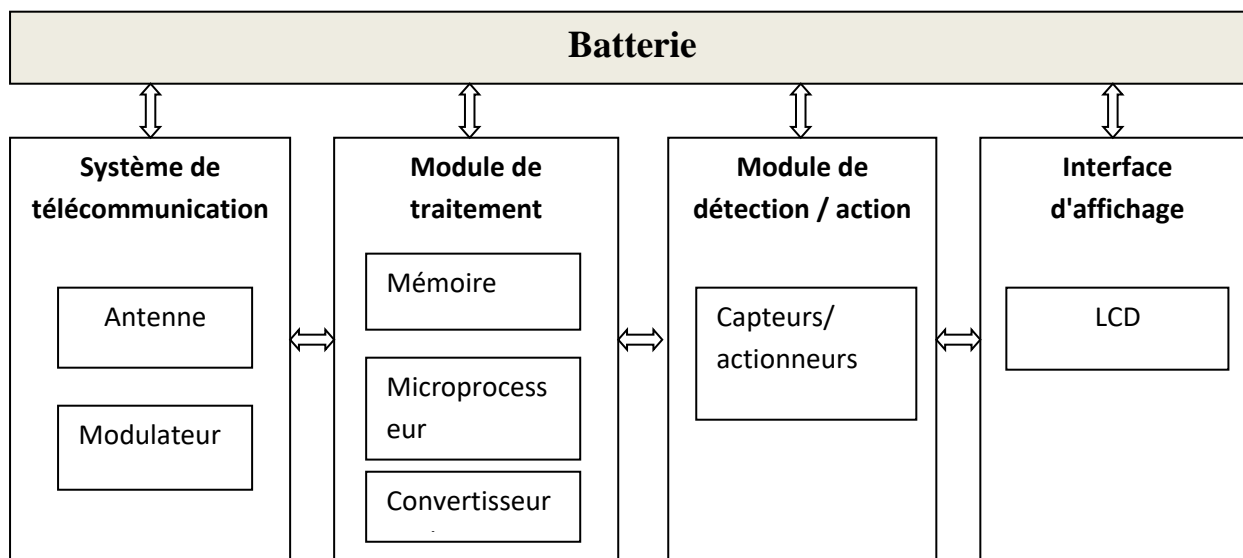


Figure 8: architecture d'un nœud sans fil pour la surveillance et le contrôle de processus

4.2 Réseau de capteurs intelligents

Un réseau de capteurs sans fil (RCSF) ou "Wireless Sensor Network" (WSN), est un type spécial de réseaux ad-hoc avec un grand nombre de nœuds qui sont des micro-capteurs capables de recevoir et de transmettre des données environnementales d'une manière autonome sans intervention humaine (Beylot et al. 2009.). Ces nœuds peuvent avoir des positions fixes ou bien être déployés aléatoirement pour surveiller l'environnement. La communication dans un réseau de capteurs se fait souvent d'une manière multi-saut, ce type de réseau comprend des relais comme dans le cas de réseaux wifi où on utilise des répéteurs pour étendre la portée. L'écoulement des données se termine vers des nœuds spéciaux appelés nœuds-puits ou stations de base « sink ». Ces nœuds-puits sont des bases de contrôle qui possèdent plus de ressources matérielles et permettent de collecter et de stocker les informations issues des capteurs. En d'autres termes, le fonctionnement d'un réseau de capteurs se déroule de la manière suivante : les nœuds sont déployés dans une zone appelée zone d'intérêt pour la surveiller. Lorsqu'un nœud détecte un événement, il le traite localement et l'achemine vers la station de base via une communication multi-saut. Ce processus est illustré dans la figure 7.

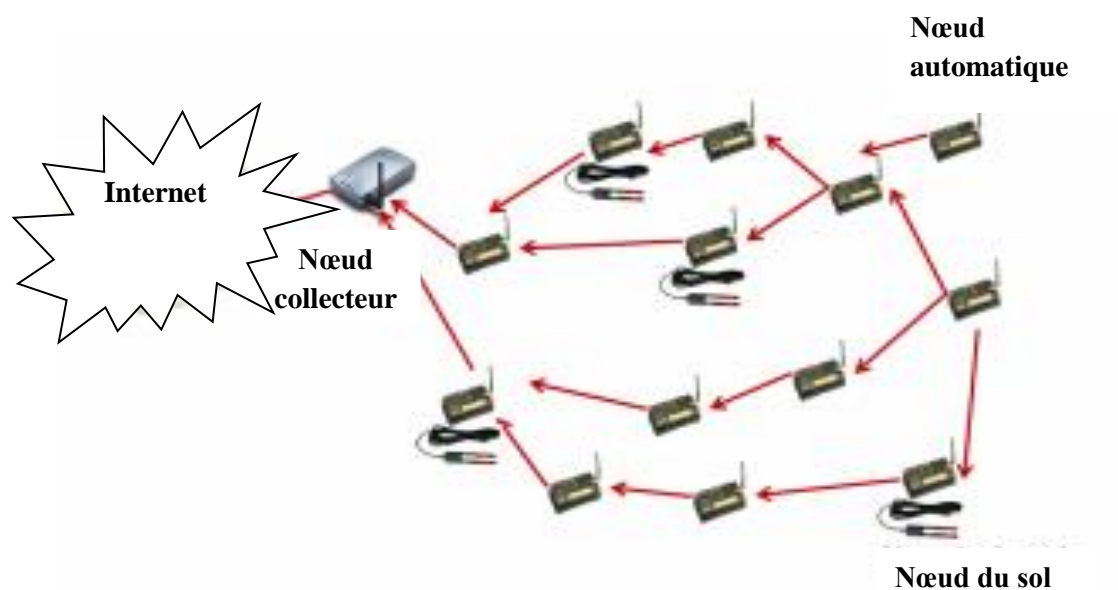


Figure 9: Réseau de capteurs intelligents (Béjaïa & Rosa 2016)

Cette nouvelle technologie des réseaux de capteurs sans fils intègre trois unités principales(Kugler et al. 2013) a savoir :

- Une unité de captage : chargée de capter des grandeurs physiques (chaleur, humidité, vibrations, rayonnement...) et de les transformer en grandeurs numériques.
- Une unité de traitement informatique: Calculer des informations à l'aide de ces valeurs collectées et stocker les données (Henry & Coduys 2004).
- Une unité de transmission sans fil: communiquer à travers un réseau de capteurs.

4.3 Etude comparative entre capteurs classiques et capteurs intelligents

4.3.1 Les fonctions d'un capteur classique

Un capteur classique est un organe de prélèvement d'information qui élabore, à partir d'une grandeur physique à une autre grandeur de nature différente (très souvent électrique) voir figure 10. Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

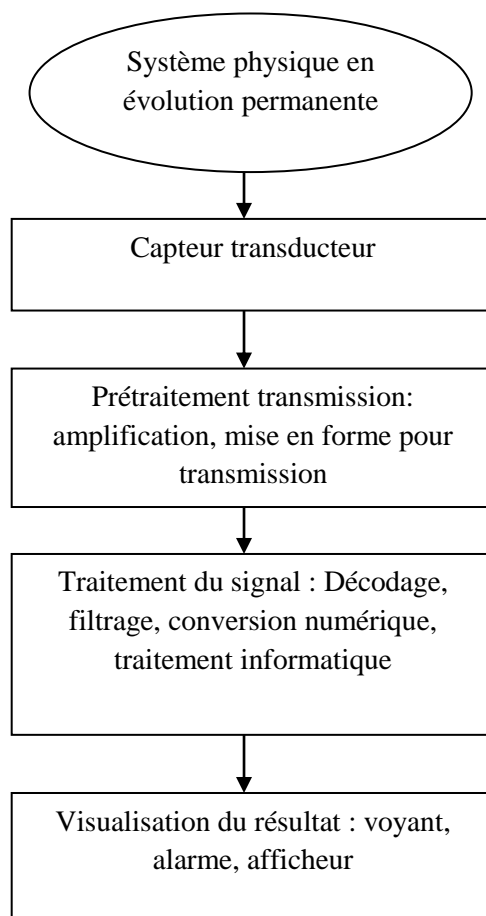


Figure 10: les fonctions d'un capteur classique

4.3.2 Les fonctions d'un capteur intelligent

Dans la production, les nouvelles technologies, et en particulier l'utilisation de la technologie numérique, ont permis d'introduire des fonctionnalités innovantes dans les capteurs intelligents comme l'acquisition des données et leur traitement interne et autonome. Ainsi des fonctionnalités comme la correction des erreurs de mesure, l'auto-ajustage, l'autodiagnostic, la reconfiguration dynamique et la communication en réseaux. Ceci permet d'exécuter des tâches très spécifiques, comme le fait de communiquer rapidement et à distance des informations pertinentes concernant les dégradations détectés, et la prise de décision en temps réel.

Afin de définir toutes les fonctions constructives de notre système de télésurveillance, à partir des fonctions de services que doit remplir le système, nous avons élaboré un diagramme FAST (Functional Analysis System Technic), ce dernier permettra d'éclaircir les choix techniques de notre système de télésurveillance grâce à l'établissement des fonctions

techniques de mesures à l'aide de RCSF, de la maintenance et de la télécommunication (figure11).

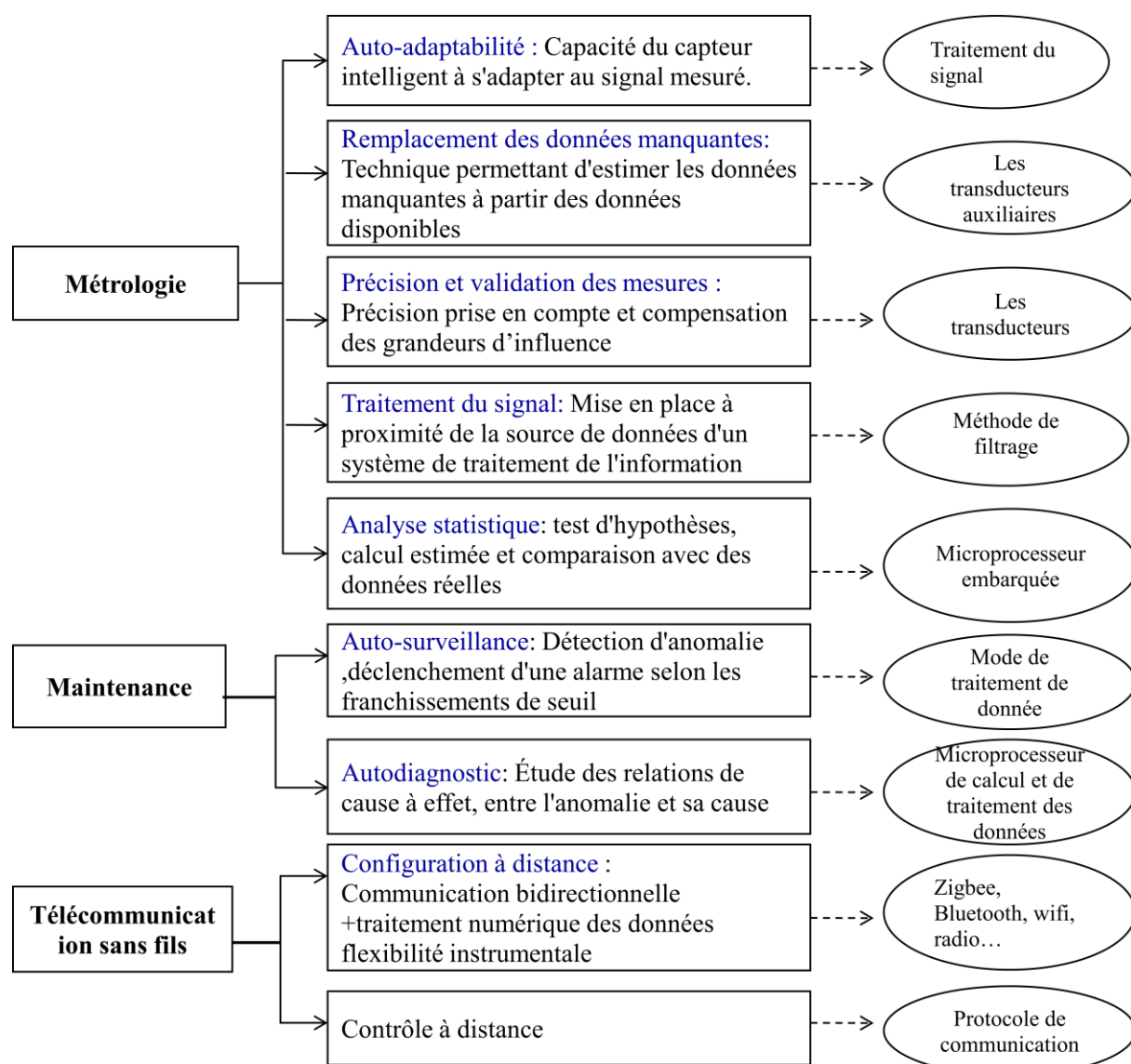


Figure 11: Diagramme FAST d'un réseau de capteurs intelligents pour la télésurveillance.

4.3.3 Différence fonctionnelle entre capteur classique et capteur intelligent

Ce nouveau type de réseaux de capteurs intelligents présente une grande amélioration comparée aux capteurs classiques qui sont généralement déployés suivant deux méthodes :

- Les capteurs sont positionnés loin du phénomène surveillé, dans ce cas des dispositifs utilisant des approches complexes sont nécessaires pour distinguer les données captées du bruit environnemental.

- Plusieurs capteurs sont déployés au tour du champ de surveillance. A ce moment, la position des capteurs et la topologie de leur communication doit être soigneusement conçue au préalable. Ces capteurs transmettent régulièrement les données au nœud central où les traitements sont accomplis et les données sont fusionnées.

De même le capteur intelligent se diffère du capteur classique par deux fonctions, ces dernières sont: le calcul interne des informations des valeurs collectées et stockées à l'aide de l'unité de traitement informatique et la deuxième fonction c'est l'unité de transmission sans fil qui communique à travers un réseau de capteurs. En contrepartie le capteur classique se suffit que des fonctions suivantes: Convertir, enregistrer et afficher les mesures (figure12).

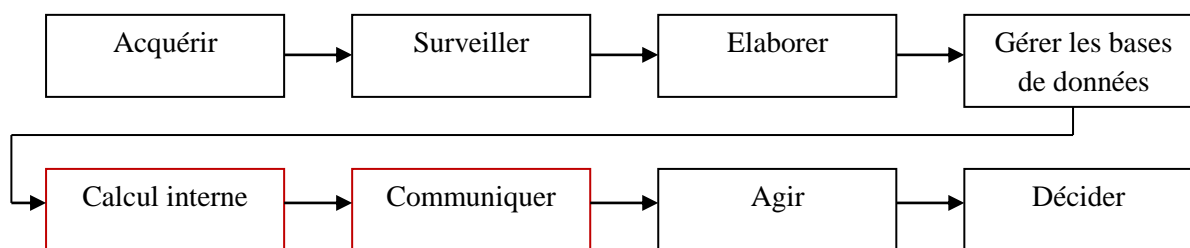


Figure 12: Les actions menées dans un capteur intelligent

4.3.4 Avantages des réseaux de capteurs intelligents par rapport aux capteurs classiques

Les réseaux de capteurs intelligents présentent plusieurs avantages par rapport aux systèmes de surveillance traditionnels câblés (Zhao 2011), on peut citer:

- **Aucune contrainte de câblage**

Les appareils peuvent être utilisés dans des applications inaccessibles physiquement, son adoption réduit considérablement la complexité de la mise en œuvre de dispositifs de surveillance et de contrôle pour les équipements de production. En outre, le système de processus industriel devient hautement évolutif et flexible en raison de son autonomie. De plus, les périphériques nouvellement ajoutés peuvent être installés à n'importe quel emplacement sans passer par des câbles d'alimentation et de communication de données à travers des murs en béton lors de l'extension des travaux d'usine.

De plus, les applications RCSF peuvent non seulement surveiller les équipements industriels en temps réel, mais aussi transmettre les données au personnel de maintenance pour une

analyse à l'exécution. De plus, ces fonctionnalités permettent au personnel de maintenance de prendre des mesures immédiates en cas d'événement improbable de panne de la machine.

- **Maintenance facile**

Après l'installation du dispositif câblé, les ingénieurs de contrôle doivent faire face à divers problèmes d'entretien des câbles, tels que la corrosion, la présence d'eau dans les conduites, l'usure physique causée par les mouvements fréquents d'instrumentation et coupures de courant imprévues... Les périphériques sans fil sont presque sans souci, seul un changement de pile est nécessaire après des années de fonctionnement. En outre, il est également possible de déplacer des périphériques sans fil actuels ou de déployer des périphériques sans fil supplémentaires sur le système de contrôle après son installation avec un minimum de modifications de la configuration existante.

- **Coût réduit**

Le sans fil élimine le câblage, les conduits et les coûts des installations. De plus, pour certaines applications, les nœuds de détection peuvent mettre leur radio en mode éteint lorsque nécessaire, cela permettra d'économiser beaucoup d'énergie par rapport aux appareils câblés, ce qui nécessite une source de courant continue.

- **Meilleure performance**

Les RCSF industriels jouent un rôle potentiel de surperformer le réseau de contrôle de processus de production. Premièrement, sa vitesse de transmission de données est supérieure. Deuxièmement, contrairement aux systèmes de surveillance câblés, où les périphériques partagent un seul bus, plusieurs communications sans fil peuvent agir simultanément s'il n'y a pas d'interférence radio mutuelle. Troisièmement, plus de capteurs / points de données peut être utilisé au même temps pour transmettre les données.

5 ETAT D'ART SUR L'UTILISATION DES RESEAUX DE CAPTEURS SANS FILS ET LES PLATEFORMES DE LA TELESURVEILLANCE

5.1 Les domaines d'utilisation des réseaux de capteurs sans fils

Le nouveau concept de micro-capteurs connectés via un support sans fil promet la réalisation de plusieurs types d'applications. Grâce au faible coût, la flexibilité, la tolérance aux pannes, la haute fidélité de détection, et les caractéristiques de déploiement rapide des réseaux de capteurs. Ces nœuds capteurs peuvent être utilisés pour la surveillance permanente

ou discontinue d'un phénomène, la détection et l'identification d'un évènement, ou la surveillance d'un terrain et le contrôle local d'objets déclencheurs d'évènements (actionneurs). Ces derniers créent de nombreux domaines d'applications nouvelles et intéressantes pour la télésurveillance (Bouabdallah, les reseaux de capteurs.), on trouve notamment les applications militaires de tracking, la domotique, la surveillance médicale ainsi que l'agriculture de précision.

Les réseaux de capteurs ont été capables d'apporter des bénéfices considérables au domaine d'agriculture (BOUZIDI Zeyneb, et al. 2012), intéressés à mettre en place un réseau de capteurs pour l'irrigation intelligente qui a pour but la surveillance de l'environnement pour détection des zones sèches et les irriguer. Ainsi ces capteurs intelligents utilisés pour surveiller la qualité de l'eau potable dans un réseau de distribution en vue de la détection d'intrusion, de pesticides dans l'eau potable, le degré d'érosion du sol, et le niveau de pollution de l'air en temps réel (Francis CAMPAN. et al., 2013). On trouve aussi la conception des systèmes de surveillance de l'environnement de serre basée sur les réseaux de capteurs intelligents (Yun-feng 2015).

Dans le domaine de la télésurveillance médicale à domicile. Les RCSF sont fondamentaux pour l'amélioration de la qualité de soins et de vie des personnes nécessitant des soins ou une attention particulière. (Duchêne et al. 2005) Elle vise à mettre en place dans l'habitat d'une personne un dispositif qui permet de capturer des informations sur son état de santé, afin de rendre possible pour le staff médical un diagnostic, voire une aide au patient à distance. Ainsi on trouve le suivi des activités de vie des personnes âgées fragiles à domicile pour maintenir la sécurité de leur vie (Bossche et al. n.d.).

Le Suivi et la surveillance des médecins et des patients au sein de l'hôpital (Wood et al. 2006). Chaque patient aura des petits nœuds capteurs légers qui lui sont attachés, où chacun de ces nœuds aura sa tâche spécifique, par exemple, l'un des capteurs peut être employé pour détecter les données biométriques. Les médecins aussi, peuvent porter des capteurs permettant à d'autres médecins de les localiser.

Dans le domaine de la sûreté de fonctionnement (Marc NOUVELLON) Présente un dispositif embarqué sur un disjoncteur moyenne tension MT qui permet de surveiller les conditions de son fonctionnement, et propose un schéma d'organisation du transfert et du traitement des données, en utilisant les techniques et technologies de l'intelligence artificielle.

Ceci dit, Les RCSF sont utilisés dans plusieurs domaines et ils ont connu un succès sans cesse, de même ils ont su attirer un nombre croissant d'industriels et ils peuvent s'instaurer comme un acteur incontournable dans les entreprises industrielles pour la télésurveillance des systèmes de production, grâce à leur facilité du déploiement, acquisition de l'information et le coût réduit d'installation ainsi leur réalisme et leur apport concret pour le besoin d'un suivi continu des processus industriels, le paragraphe suivant présente cette intégration en détails.

5.2 Les nouvelles technologies de l'information et la maintenance industrielle

La télésurveillance est également une application importante dans le domaine industriel, elle se définit comme une surveillance à distance via un réseau de télécommunications. Les nœuds de capteurs sans fil recueillent différentes informations auprès des capteurs, puis transmettent les informations recueillies de sécurité ou d'alerte vers le personnel de gestion des applications sans fil. En plus les capteurs sans fil permettent désormais d'accéder à des sites auparavant inaccessibles, des machines en rotation, des zones dangereuses ou restreintes et des actifs mobiles (Baxter & Services 2008). C'est pourquoi de plus en plus des industriels ont récemment commencé à investir dans les applications basées sur le réseau de capteurs sans fil dans leurs machines de production pour une meilleure surveillance et une meilleure collecte des données à tout moment, en tout lieu, et en temps réel.

Comme montre la figure 13, les systèmes de surveillance pour la maintenance en temps réel sont équipés avec des réseaux de capteurs sans fil qui sont incorporés de technologies de télécommunication comme Zigbee / Bluetooth... dans le système d'automatisation. Ces capteurs permettent de collecter et de contrôler les données de capteurs en temps réel depuis l'usine et les enregistrer périodiquement ou en continue puis les transférer aux services Internet via des applications WEB ainsi que de lier ces données au logiciel de gestion de l'entreprise. Les alertes d'alarmes envoient des notifications par SMS ou par courrier électronique aux équipes de la maintenance pour la prise de décision adéquate.

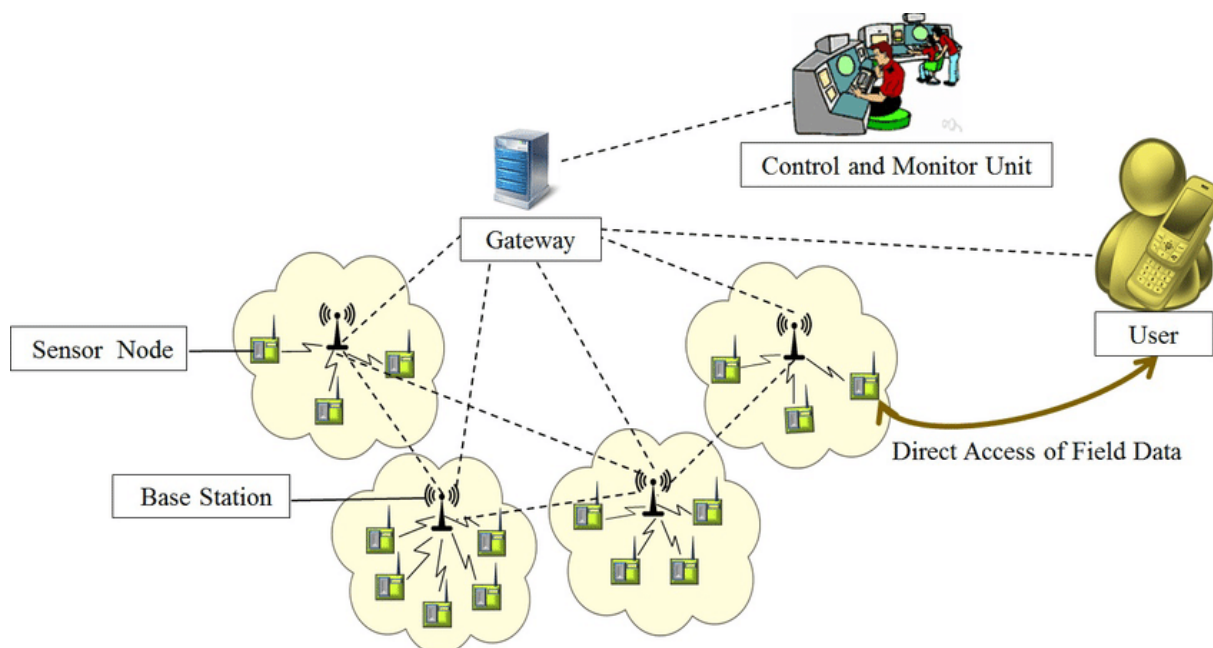


Figure 13: Architecture industrielle de RCSF (Gope et al. 2019)

5.3 Les applications des réseaux des capteurs intelligents en maintenance industrielle

En cette ère de numérisation, le besoin d'observer, d'analyser et de contrôler des grandeurs physiques sur des systèmes industriels est essentiel pour la fonction maintenance (Baxter & Services 2008). Cette nouvelle manière d'envisager la métrologie, en détectant un phénomène à différents points disséminés sur un système ou un site industriel, fait émerger de nouvelles problématiques technologiques, par exemple sur l'autonomie énergétique des capteurs, et de nouveaux types d'applications nous permettant de mieux connaître notre système, et d'anticiper les problèmes de sûreté de fonctionnement. Les avantages présentés de cette nouvelle technologie permettent de tirer profit à des besoins prioritaires du service maintenance qui sont: Un besoin de disponibilité maximale des équipements de production et une minimisation de leurs coûts. Ces deux exigences présentent un défi majeur pour les responsables maintenance qui cherchent toujours à réaliser un compromis entre le niveau de fiabilité des équipements de production et les coûts de maintenance. D'où le choix d'une politique adaptée qui anticipe les défaillances de fonctionnement grâce à la surveillance de l'état des équipements, la collecte et la mise à disposition en temps réel d'un ensemble de paramètres pertinents. Ceci permettent une disponibilité maximales des équipements de production et facilitent la prise de décision pour l'équipe de la maintenance n'importe quand et n'importe où (HASEGAWA Fumio, 2011).

A l'inverse, l'approche classique de surveillance consiste à acquérir des données. Plus tard, les données sont enregistrées sur un concentrateur central pour les analyser. Cela est inapproprié pour la surveillance à l'exécution ou la prise de décision critique en temps réel. En particulier, ces données historiques ne peuvent pas être très utiles pour déterminer la "santé" de l'équipement. Dans la littérature, de nombreux articles passent en revue (Shin & Jun 2015) et traitent la problématique de la maintenance conditionnelle. La référence (Prajapati et al. 2012) décrit comment la maintenance conditionnelle peut être utilisée pour optimiser les stratégies de maintenance et augmenter la faisabilité, la référence (Bousdekis et al. 2015) développe une structure de maintenance conditionnelle pour la prise de décision proactive.

Récemment l'un des centres de recherche les plus actifs en maintenance est la maintenance intelligente (IMS) (Lee 2000). Ce dernier permet l'analyse de données multi variées provenant de diverses sources et fournit aux utilisateurs des informations sur la santé des produits, des machines et des systèmes. L'IMS a développé le Watchdog Agent TM (IMS n.d.) (Djurdjanovic et al. 2003) pour mettre en œuvre une maintenance conditionnelle intelligente. Ce système collecte les données des capteurs surveillant les processus critiques et les compare aux signatures de capteur connues pour détecter la dégradation du processus.

Certains travaux soulignent le lien entre l'e-maintenance et la maintenance conditionnelle, comme une preuve du fait que des solutions informatiques avancées sont adoptées dans les processus de surveillance des équipements (Guillén et al. 2016) (Han & Yang 2006). (López-Campos et al. 2013) proposant une plate-forme d'intégration e-maintenance combinant les fonctionnalités des Systèmes informatisés de gestion de la maintenance (CMMS), la maintenance basée sur la fiabilité (RCM) et la maintenance conditionnelle (CBM). Ce concept de E-Maintenance a conduit plusieurs projets et plateformes de surveillance dans le monde entier (Dong et al. 2017) (Levrat et al. 2008).

En ce qui concerne l'intégration des RCSF et la maintenance conditionnelle, on trouve des travaux qui ont données un aperçu de l'état technique des réseaux de capteurs pour des applications industrielles en temps réel, ainsi une attention particulière a été portée à la description des méthodes et des instruments de mesure de la performance dans ce type d'architectures (V.C. Gungor & Hancke 2009). De même sur le processus de production afin de prévenir ou de détecter les problèmes de santé et de sécurité et d'améliorer la production (Akhondi et al. 2010). En outre, l'architecture axée sur la qualité de service (QoS) et la qualité de données (QoD) basée sur les fonctionnalités de l'industrie 4.0 a également été discuté en

détail par (Flammini et al. 2009) (Li et al. 2017). D'autres travaux traitent quelques tendances d'utilisations des réseaux de capteurs sans fil et les problèmes à résoudre pour une mise en œuvre réussie (Ota & Wright 2006), de même que les avantages présentés lors de l'adoption de la technologie RCSF pour la surveillance industrielle et les facteurs difficiles influant sur la conception et l'acceptation de cette technologie (Zhao 2011). De plus, cette technologie connaît un essor dans l'industrie ferroviaire (Hodge et al. 2015) pour l'analyse des systèmes, des structures, des véhicules et des machines.

A l'égard des applications des RCSF dans le cadre d'une application de télésurveillance de la maintenance conditionnelle, elle n'est pas considérée suffisamment dans la littérature pour être largement mise en œuvre dans l'industrie. Jusqu'à présent, les contributions dans la littérature de la maintenance conditionnelle ne se sont concentrées que sur des modèles et algorithmes structurants: (Garcia et al. 2006) modélise des processus industriels dynamiques non linéaires avec les réseaux de neurones artificiels afin de surveiller l'état de santé d'une boîte à vitesses d'éoliennes dans le cadre d'une application intelligente (Intelligent System for Predictive Maintenance). Cependant, l'adoption appropriée des applications de réseaux de capteurs pour les paramètres industriels nécessite une expérience approfondie, sans discuter des techniques et méthodes spécifiques nécessaires pour atteindre les objectifs envisagés de télésurveillance des équipements de production. Il est nécessaire d'abord de comprendre comment appliquer facilement les techniques et méthodes de surveillance communautaire, en contrôlant leurs implications de manière durable et efficace. De plus, des simulations basées sur des expériences de ces capteurs avant le déploiement, aident à déterminer leur performance et faisabilité en différents termes. A cette fin, nous proposons l'intégration de ces nouvelles technologies pour établir un lien entre la maintenance conditionnelle et les technologies de l'information, pour suivre les pannes en temps réel ou plus généralement, tous les phénomènes non désirés par les systèmes de production qui pourraient être anticipés.

6 LES PLATEFORMES ET LES STANDARDS SUPPORTS A LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE ET LES SYSTEMES DE TELESURVEILLANCE

6.1 La gestion de la maintenance conditionnelle: Principales références

Afin de rester compétitives, les entreprises marocaines, doivent respecter les standards en termes d'usage de réseaux de capteurs intelligents et d'optimisation de la maintenance. Ces standards doivent respecter impérativement l'essence de ceux adoptés par les entreprises de l'union européenne, partenaire principale économique du Maroc. Ceci permettra de rompre

avec les pratiques archaïques en matière de gestion industrielle, et de réduire la fosse numérique entre les deux rives de la méditerranée.

Il existe des références dans la littérature qui tentent en quelque sorte de se rapprocher du problème de gestion de la maintenance conditionnelle, On trouve par exemple la norme (ISO 17359: 2011) (ISO 17359: 2002) celle-ci établit des lignes directrices pour les procédures générales à prendre en compte lors de la mise en place d'un programme de surveillance des conditions pour les machines, allant de l'analyse des équipements à la détermination de l'action de maintenance, cependant cette norme fonctionne avec la vue traditionnelle des applications industrielles de la maintenance conditionnelle. Nous citons également la norme (ISO 13374-1: 2003), il s'agit d'une norme qui permet la gestion technique et technologique et appui à la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle en relation avec les besoins matériels et logiciels (ISO 13374, 2012.).

6.2 Les plateformes support de la maintenance conditionnelle et les systèmes de la télésurveillance

Certaines normes ont été élaborées afin d'être utilisées comme guide de conception concernant les informations techniques de la maintenance. Ces modèles jouent un rôle important dans le développement de la surveillance communautaire, notamment en ce qui concerne l'intégration entre les systèmes de la maintenance conditionnelle et d'autres systèmes. Dans la technologie des systèmes de maintenance conditionnelle, on va présenter les deux grandes organisations standard les plus utilisées à savoir: MIMOSA (Alliance de systèmes ouverts pour la gestion de l'information des machines) et OSA-CBM (Architecture de système ouvert pour la maintenance conditionnelle). Ces plates-formes constituent en fait, le fruit d'une collaboration entre le secteur industriel et universitaire. Elles peuvent être classées comme des plates-formes propriétaires, développées dans le cadre de projets de la recherche scientifique.

6.2.1 MIMOSA

MIMOSA «Machinery Information Management Open Systems Alliance» C'est un système d'information intégral de développement, dédié au management de la maintenance industrielle qui a été inventé par les Etats Unis dans les années 90. Ce projet a été réalisé suivant une approche fondée sur les environnements intégrés d'entreprise (*EAI* : Enterprise Application Integration) afin de mettre en place un réseau de coopération en maintenance des équipements militaires (Manufacturing 2006).

6.2.2 OSA-CBM

Avec la volonté de standardiser une architecture « type » en maintenance conditionnelle, un regroupement de scientifiques et d'industriels américains ont proposé le cadre OSA-CBM (Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance) (Michael Thurston. et al., 2001). La spécification OSA-CBM est une architecture standard permettant de déplacer des informations dans un système de maintenance en fonction des données mesurées. OSA-CBM simplifie ce processus en spécifiant une architecture et un cadre standard pour la mise en œuvre de systèmes de maintenance basés sur les conditions (Alexander et al. 2005) (Choudhary et al. 2018) (Sreenuch et al. 2013). Il décrit les six blocs fonctionnels des systèmes CBM (figure 14), ainsi que les interfaces entre ces blocs. La norme permet d'intégrer de nombreux composants et facilite le processus en spécifiant les entrées et les sorties entre les composants. En bref, il décrit un système de diffusion d'informations normalisé pour la surveillance basée sur les conditions.

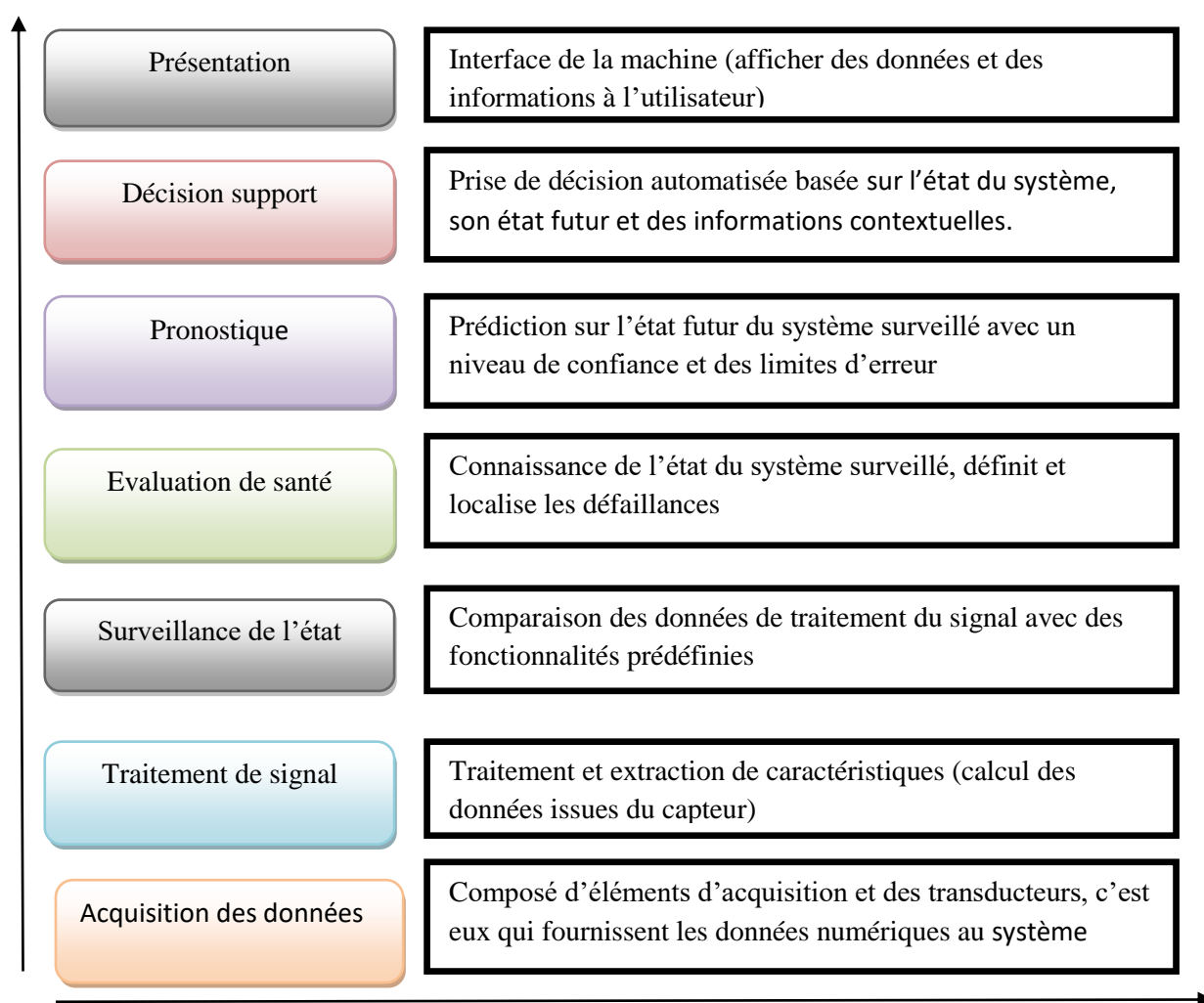


Figure 14: L'architecture OSA-CBM (Lebold, Reichard, Byington, et al. 2002)

Elle est structurée en sept couches voir figure14. Les trois premières couches permettent d'acquérir les mesures et de les mettre en forme afin de former les données d'entrée. La couche du processus « Health assessment » ou évaluation de santé permet d'agrèger les données reçues précédemment, afin d'évaluer le niveau de dégradation physique des composants de la machine, ce qui définit l'étape du diagnostic. Le pronostic permet de définir l'état futur du système en considérant la connaissance précédente et l'environnement futur du système (solicitations, conditions environnementales) et alimente un processus d'aide à la décision. La dernière couche réalise les fonctions d'interfaces homme-machine (Lebold, Reichard, Hejda, et al. 2002).

7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la problématique générale de notre domaine de travail, qui concerne l'utilisation des réseaux de capteurs intelligents et leur exploitation dans la stratégie de la maintenance conditionnelle. Nous avons défini les réseaux de capteurs sans fil ainsi que ses caractéristiques, ses fonctionnalités et son architecture. Par la suite, nous avons présenté une étude bibliographique sur les différents domaines d'application des RCSF en mettant l'accent sur leur utilisation dans le domaine industriel, leur intégration dans la surveillance des équipements de production et leurs impacts sur l'amélioration de la performance industrielle. Enfin nous avons présenté les différents travaux et standards liés à la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle, de même que des plateformes de la télésurveillance comme OSA-CBM et MIMOSA, qui ont été développées et utilisées ces derniers temps et dédiées au management de la maintenance industrielle fondue sur les systèmes d'information intégrée.

Dans le second chapitre, nous allons proposer un scénario de travail pour une situation de la télésurveillance, sur lequel nous allons définir les différentes dimensions techniques et organisationnelle, afin d'introduire une démarche générique qui intègrent les réseaux de capteurs intelligent au sein de la politique de la maintenance conditionnelle.

**CHAPITRE II:DEMARCHE D'INTEGRATION DE
RESEAU DE CAPTEURS INTELLIGENTS DANS UN
SYSTEME DE LA TELESURVEILLANCE POUR LA
MAINTENANCE CONDITIONNELLE.**

1 INTRODUCTION

Les nouveaux paradigmes de maintenance, tels que la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle, nécessitent beaucoup plus d'informations que les anciennes approches. L'information doit être facilement disponible pour effectuer ces nouveaux processus de maintenance fiable. Pour faciliter la circulation des informations, les systèmes informatiques doivent être connectés. Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu une plateforme fonctionnelle de la télésurveillance liée à la maintenance conditionnelle. En second lieu nous allons modéliser le fonctionnement de notre plateforme d'intégration à l'aide de l'outil de modélisation UML. Enfin nous allons présenter une démarche générique d'implémentation de la maintenance conditionnelle des équipements de production à l'aide des réseaux de capteurs intelligents.

2 CONCEPTION D'UNE PLATEFORME DE TELESURVEILLANCE POUR LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE EN UTILISANT LES RCSF

2.1 Les objectifs de la plateforme

Les programmes de surveillance communautaire peuvent être extrêmement complexes à gérer, car ils gèrent des informations volumineuses, qui évoluent dans le temps et qui entretiennent des relations complexes. Le responsable de la maintenance doit faire face à toute cette complexité de manière ordonnée avant de mettre en œuvre une solution de la maintenance conditionnelle (Semma et al. 2015). D'autant plus ce type de maintenance à la particularité d'être facile à suivre mais plus complexe à mettre en place parce qu'il demande d'implanter des appareils et des moyennes de nouvelle technologie pour la surveillance des équipements de production qui ne sont pas trop utilisé auparavant (Rastegari 2018). Pour cela, la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle au niveau d'un équipement de production nécessite en première étape de réaliser un cahier des charge qui prend en compte les conditions suivantes:

- L'équipement présente une dégradation progressive et détectable et non pour les systèmes non réparables qui ont une durée de vie connue,
- Définition des paramètres dégradables de mesure,
- Fixation des paramètres de franchissement du seuil, la limite fixée correspond bien à un seuil significatif pour la perte ou la dégradation de la fonction de l'équipement (ou sa dangerosité),
- L'appareillage qui permet cette mesure est fiable et les résultats peuvent être interprétés par un personnel qualifié.

L'idée centrale de ce travail est donc de faciliter la caractérisation et traitement de tous les points clés des solutions de la maintenance conditionnelle. En réponse à la complexité de son application et à ses défis à l'aide des réseaux de capteurs intelligents, la figure 15 décrits ci-dessous dans le présent manuscrit, les objectifs particuliers de ce cadre qui sont:

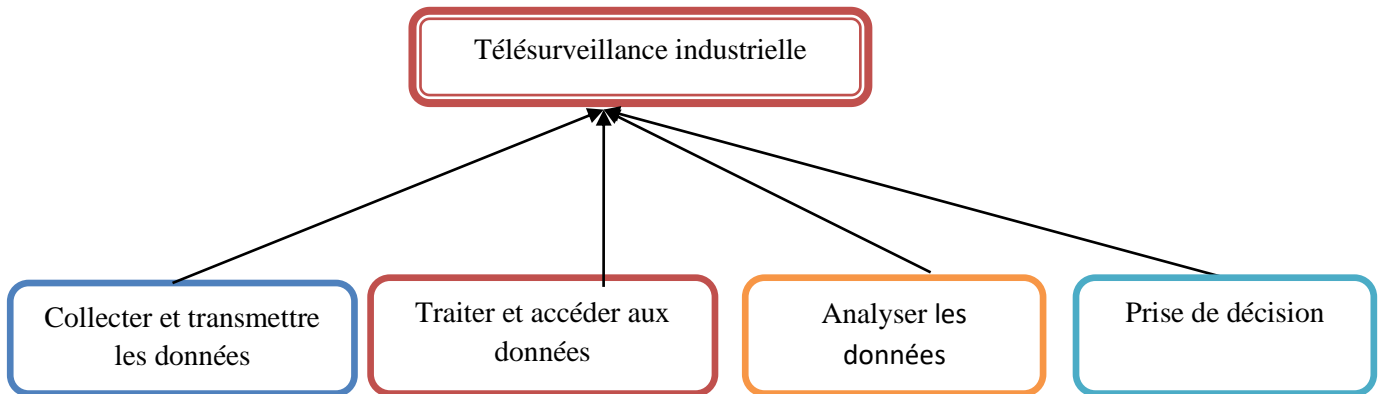


Figure 15: Diagramme des buts

2.2 Approche unifiée de la maintenance conditionnelle

L'approche unifiée proposée pour notre plateforme combine et étend les méthodes de la maintenance conditionnelle existantes (Bousdekis et al. 2015) (Tuomi 2010). Elle vise à encadrer et à conceptualiser la maintenance conditionnelle intelligente. L'unification peut être réalisée en réunissant approches, outils et services dont chacun met en œuvre une phase différente qui constitue les niveaux de gestion afin de soutenir efficacement différentes entreprises. Nous portons un intérêt particulier à l'architecture OSA/CBM qui permettra les points suivants :

- L'utilisateur peut choisir les outils et les algorithmes applicables à son application
- Ces modules sont flexibles et configurables
- Elle est simplifiée selon le besoin de chaque étude de cas permettant d'extraire une version simplifiée.

L'approche unifiée globale pour la maintenance conditionnelle intelligente est présentée graphiquement sur la figure 16. Chaque niveau conceptuel doit intégrer les méthodes et les algorithmes nécessaires pour le mettre en œuvre. Le fonctionnement de chaque niveau conceptuel est expliqué ci-dessous:

- **Traitement des données:** il consiste en acquisition des données à travers ces actions « Collecter, Stocker et Archiver» et Traitement des données à travers ces actions « Analyser, Calculer, Classifier ». Cette étape est effectuée de manière modulaire en utilisant les nouvelles technologies émergentes. Ces dernières se connectent et acquièrent les données à partir des sources de données hétérogènes et les intègrent pour un traitement ultérieur.
- **Diagnostic:** il comprend deux étapes «Détection de l'état» qui inclut des méthodes basées sur des modèles en temps réel, sur les connaissances ou sur les données intégrées dans un logiciel approprié. Et «Évaluation de la santé» qui permet le traitement continu pour reconnaître la présence d'un état inhabituel par rapport à un modèle de comportement «normal».
- **Prise de décision en matière de maintenance:** Elle comprend des algorithmes pour la prise de décision automatiquement ou pour fournir des recommandations à l'avance, sur la base des informations traitées en temps réel et des connaissances d'experts en matière de maintenance.

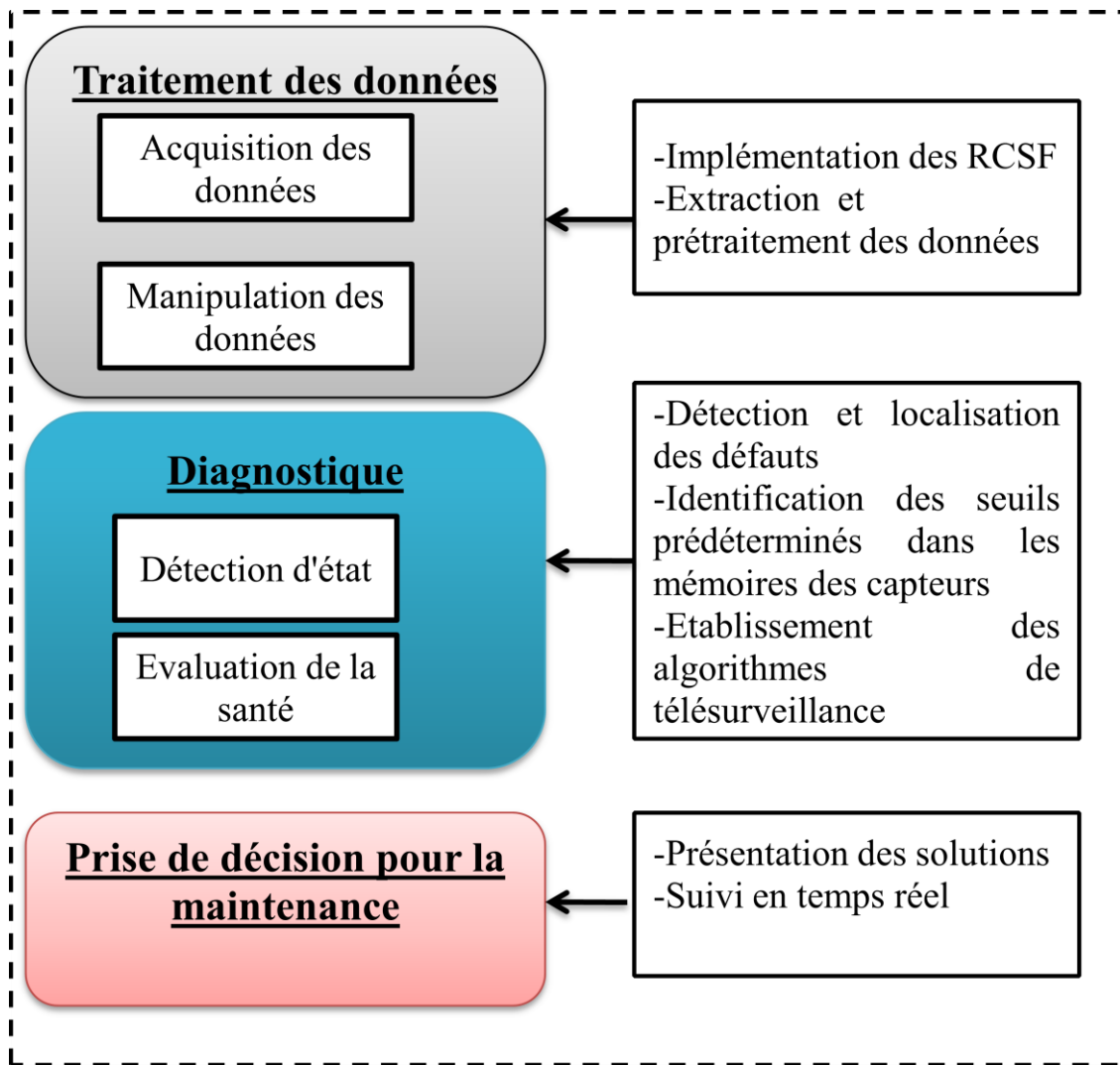


Figure 16: Approche unifiée de la maintenance conditionnelle

2.3 Les fonctions de la plateforme de télésurveillance

Les fonctions de notre application que nous allons développer par la suite, comprend les fonctions suivantes: la collecte des données et surveillance des équipements, la maintenance conditionnelle et le diagnostic et l'accès à distance. Ces fonctions sont illustrées sur la figure 17 et expliquées ci-dessous.

2.3.1 Collecte des données et surveillance des équipements

L'unité de collecte de données des capteurs, qui est installée sur l'équipement, collecte les données mesurées nécessaires, ces dernières sont transmises les données périodiquement ou en continue via les protocoles de communication choisis au serveur les données. Cela permet à l'équipe de la maintenance d'acquérir les données et suivre l'état de santé de l'équipement en temps réel à tout moment et n'importe où.

2.3.2 Maintenance conditionnelle et diagnostic des équipements

Les utilisateurs peuvent analyser l'état des équipements plus en détail. D'abord cette plateforme permet à l'équipe de la maintenance de visualiser les graphes de tendance des données d'exploitation collectées sur l'état de santé de l'équipement.

2.3.3 Accès à distance

Les utilisateurs peuvent accéder à distance à toutes les données qui concernent l'équipement et vérifier son état. Les données s'affichent et seront envoyées pour tous les services et les contrôleurs locaux concernés. De ce fait, cette technique assure un entretien rapide et précis de l'équipement.

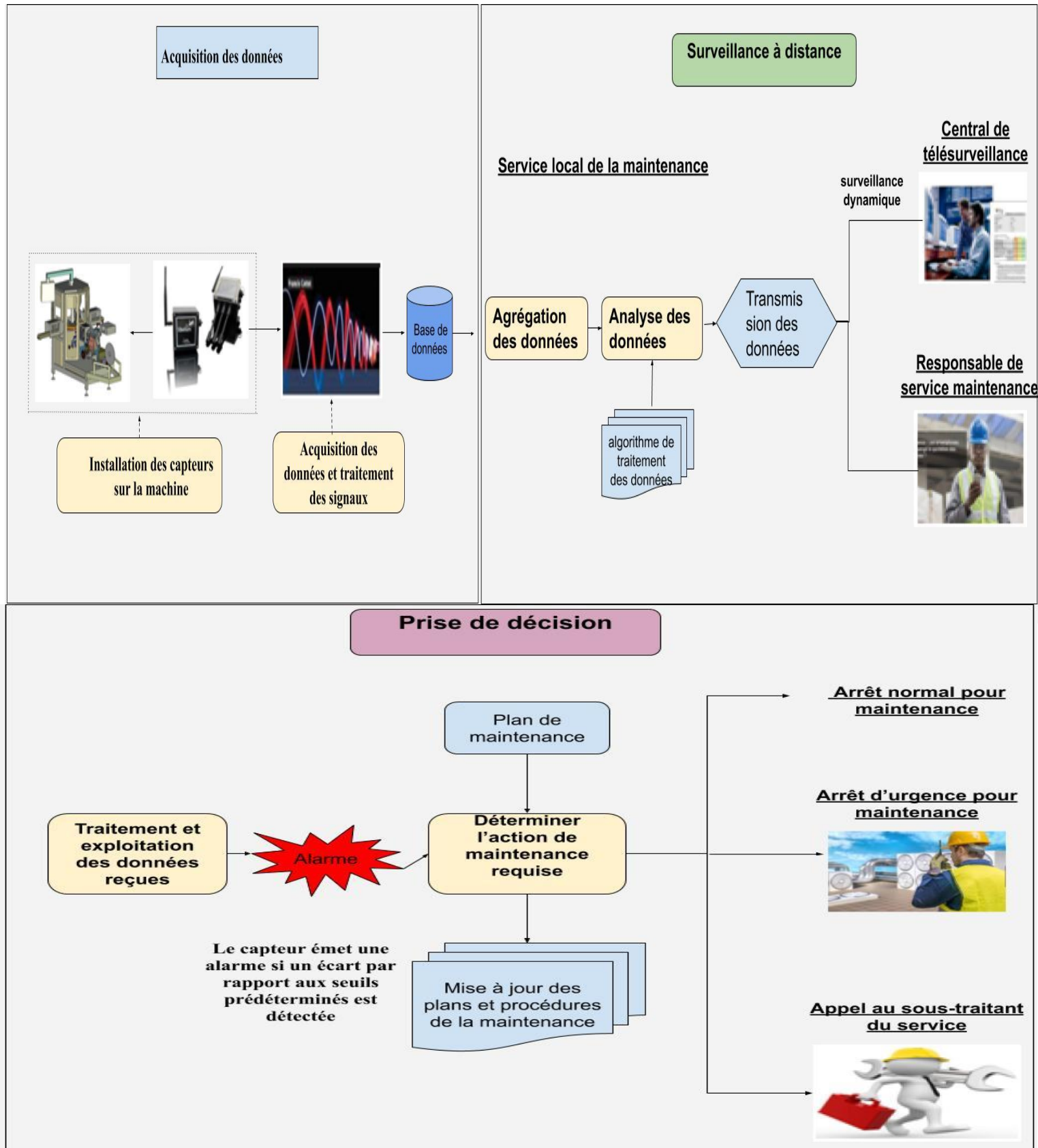


Figure 17: Vue d'ensemble des fonctions de la plate-forme commune

2.4 Nouvelle gestion du service maintenance

Les utilisateurs peuvent également centraliser et gérer les services en enregistrant les informations relatives à la maintenance. Elle permet aussi la gestion performante de Parc machine et aussi un suivi robuste de savoir et de savoir faire lié à la gestion des compétences des agents de maintenance (figure 18). De même si une anomalie survient dans un équipement, cette méthode peut avertir les personnes concernées de la survenue d'une telle anomalie via une alarme soit sur leurs courriers électroniques ou sur des autres applications comme whatsapp, web... Ceci va leur permettre de réagir rapidement au problème en connaissant l'état de l'équipement. D'autre part lorsque l'entreprise fait appel à des ressources externes par le biais de sous-traitant cette technique facilite la tâche au service prestataire de faire un suivi continu et en temps réel.

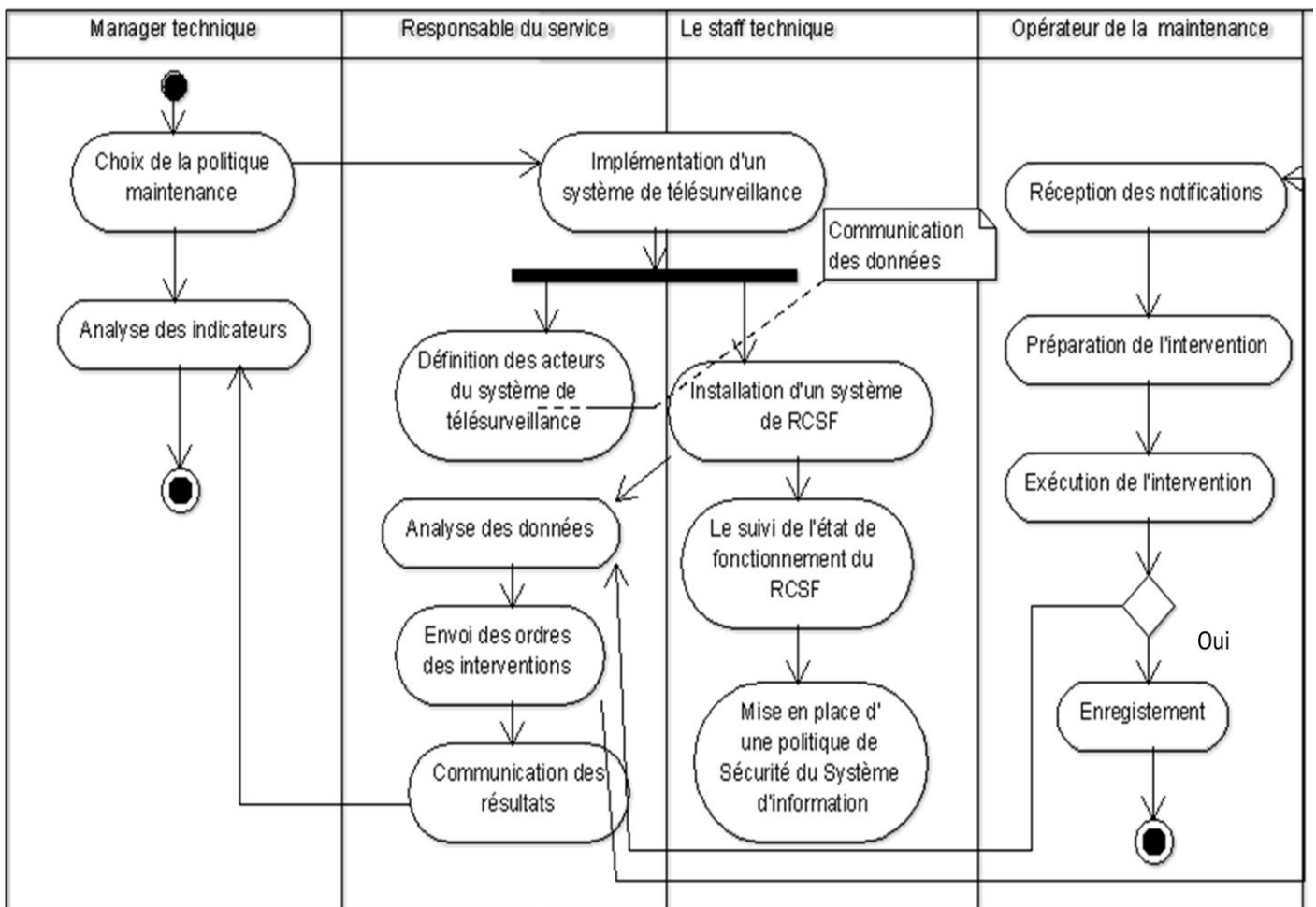


Figure 18: Gestion des tâches de la maintenance dans le cadre de notre plateforme

3 MODELES GRAPHIQUES DE FONCTIONNEMENT DE LA PLATEFORME D'INTEGRATION

3.1 La modélisation sous UML (Unified Modeling Language)

Afin de concevoir les différents onglets de notre plateforme de maintenance, nous allons modéliser les différents constituants de la plateforme à l'aide du langage UML (Unified Modeling Language) (figure 19). UML est un langage de modélisation qui permet d'exprimer et d'élaborer des modèles objet, indépendamment de tout langage de programmation. Il a été conçu pour servir de support à une analyse basée sur les concepts objet. Il se définit comme un langage de modélisation graphique et textuelle, destiné à comprendre et à décrire des besoins, à spécifier et documenter des systèmes, à esquisser des architectures logicielles, à concevoir des solutions et à communiquer des points de vue. UML a fait ses preuves dans la modélisation de nombreux systèmes de grande taille et complexes dans la modélisation de plusieurs applications de maintenance (Campos & Márquez 2011) et constitue une ressource de base pour la mise en œuvre ultérieure des modèles conçus en tant que logiciel.

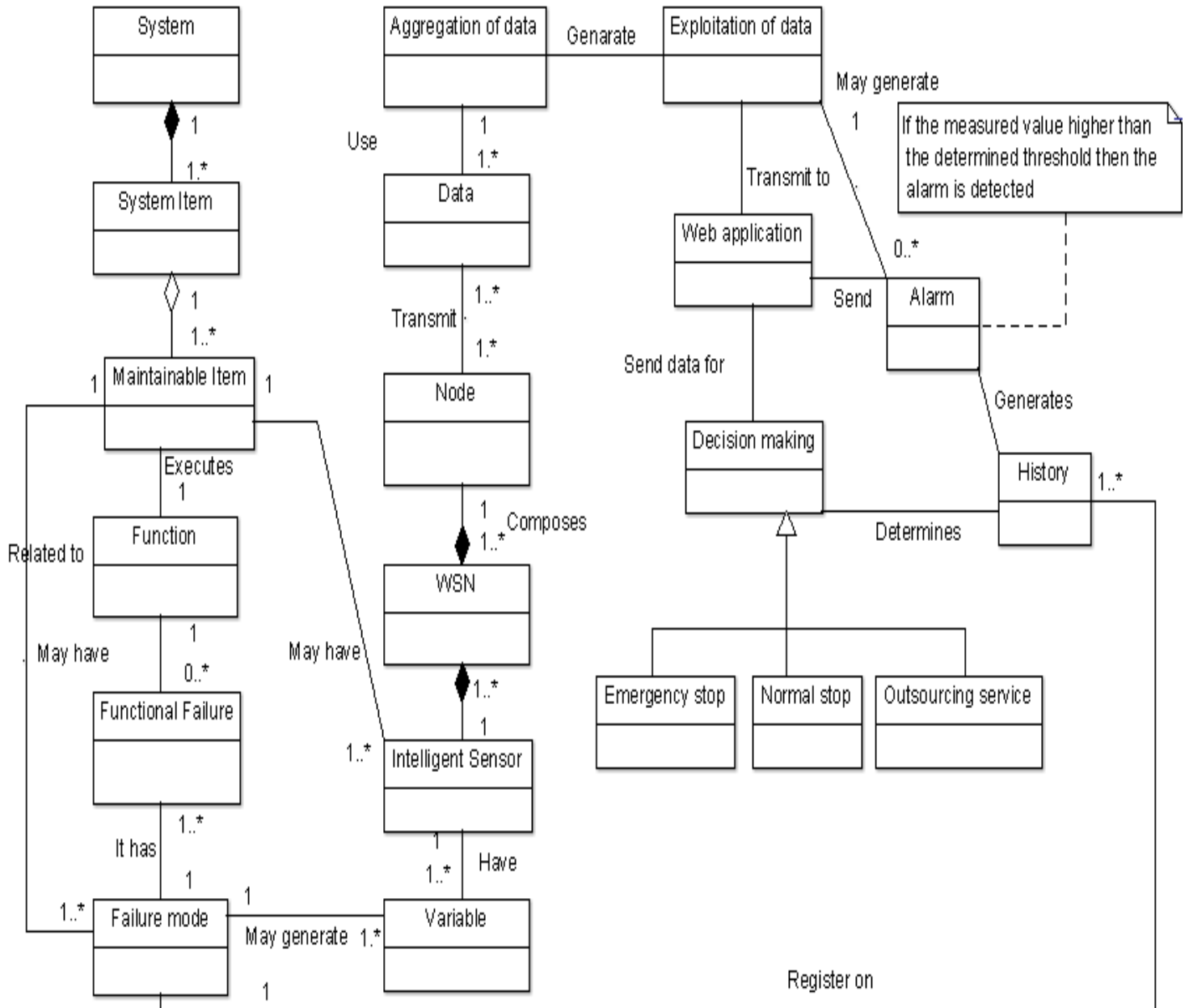


Figure 19:Structure de base de la solution CBM présentée dans un diagramme UML

4 LES PHASES CONCEPTUELLES DE CONCEPTION DE LA PLATEFORME : ASPECT ORGANISATIONNEL ET TECHNIQUE

Le responsable de la maintenance doit faire face à toute cette complexité de manière ordonnée avant de mettre en œuvre cette implémentation, surtout que la mise en œuvre effective de ces nouveaux programmes de la maintenance conditionnelle est encore largement insuffisante, principalement en raison de la complexité de ces solutions et de leur cycle de vie. A cette fin, nous allons essayer de développer une approche structurée dans un objectif principal de fournir une approche globale sur les étapes d'implémentation de la maintenance

conditionnelle pour l'intégration des réseaux de capteurs intelligents dans le cas d'applications de la télésurveillance dans la maintenance conditionnelle, afin de permettre une gestion efficace de la surveillance des équipements de production. Les paragraphes suivants présentent les différentes étapes organisationnelles et techniques pour l'implémentation d'une telle technologie.

4.1 Procédure organisationnelle d'implémentation de la maintenance conditionnelle à l'aide des RCSF

Les procédures organisationnelles d'implémentation de notre plateforme de télésurveillance sont développées dans le présent document à l'aide de la norme BPMN (Business Process Model and Notation). BPMN est une norme graphique associée orientée vers la modélisation de processus métiers. La figure 20 présente les différentes étapes nécessaires pour cette mise en œuvre.

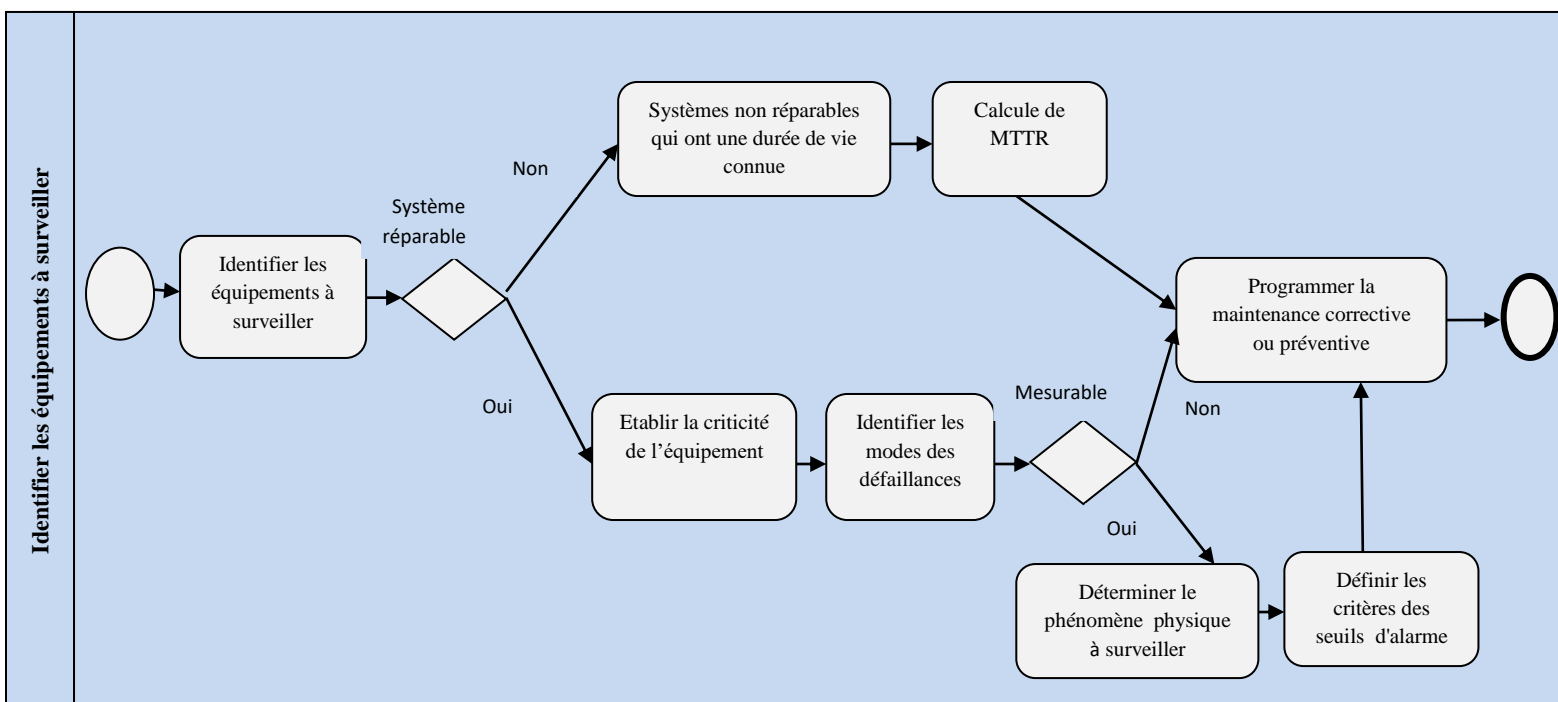


Figure 20: BPMN diagramme du processus d'identification des équipements à surveiller

4.1.1 Choix des systèmes de production

Pour des raisons économiques, on ne peut pas installer un système de télésurveillance, en premier lieu, pour toutes les machines de production. De ce fait on doit choisir d'abord les équipements qui présentent une dégradation progressive et détectable, de même il faut identifier les équipements critiques à l'aide des méthodes de classification comme Pareto ou

des méthodes multicritères de prise de décision. On trouve des travaux (Khanlari et al. 2008) qui utilise la logique floue pour choisir les équipements prioritaires qui bénéficient des tâches de la maintenance préventive. D'autre (Ait-kadi 2002) classe les équipements par ordre de priorité à l'aide d'une approche multicritères. Parmi les critères de choix des machines critiques qui bénéficient d'intégration d'un système de télésurveillance, on peut citer: l'âge du matériel, redondance du matériel, la complexité du matériel, les coûts du matériel et les conditions de travail.

4.1.2 Choix des paramètres significatifs du système

Les performances du système de télésurveillance dépendront de la pertinence des paramètres calculés. Les problèmes induits par cette orientation se posent alors en ces termes: Quels sont les paramètres significatifs qui devraient bénéficier en priorité d'une action de la télésurveillance?

Cette étape consiste à construire le vecteur forme, qui constitue le vecteur d'entrée représenté par les données fournies par les capteurs installés sur la machine ou à partir des informations collectées (Ondel 2006). Ces mesures ne sont pas toutes aussi informatives, elles peuvent correspondre à du bruit, peuvent être peu significatives, corrélées ou redondantes ou simplement inexploitable. De ce fait, il est donc préférable de disposer de paramètres variant, de manière significative, en fonction des différents modes de fonctionnement du système. Le choix des paramètres pertinents peut réduire le nombre de capteurs, de même le nombre souvent élevé de paramètres peut être aussi pénalisant en termes de temps de calcul et engendre un coût supplémentaire de l'installation. Les paramètres observés doivent permettre de répondre au problème de défaillance de la machine dans l'objectif de détecter toute évolution critique des pannes. La définition de l'ensemble des paramètres dont on souhaite simuler l'évolution doit tenir compte des contraintes suivantes:

- Les paramètres considérés doivent être suffisamment mesurables pour représenter l'état de dégradation de la machine.
- Les valeurs des paramètres doivent pouvoir être obtenues simplement à partir des données enregistrées par un ou plusieurs capteurs installés dans les machines.
- L'ensemble des paramètres disponibles est limité par le choix des capteurs, facilité d'utilisation et le faible coût.

4.1.3 Choix des techniques de mesure

Les systèmes d'information de maintenance, tels que les systèmes de gestion de maintenance informatisés (GMAO), les systèmes d'entreprise, les systèmes de planification des ressources, etc., ont été développés pour le stockage et la gestion des données. Dans ces systèmes la collecte de données d'événement nécessite généralement une saisie. En revanche avec le développement rapide des technologies informatiques et de communication, les installations et les technologies d'acquisition de données sont devenues plus puissantes, et l'acquisition des données plus réalisable et automatique.

Les données de surveillance des variables physiques sont très polyvalentes. Il peut s'agir de données de vibrations, de données acoustiques, de données d'analyse d'huile, de température, de données relatives à la pression, à l'humidité, aux conditions météorologiques ou environnementales, etc. Divers capteurs, tels que des micro-capteurs, des capteurs à ultrasons, des capteurs d'émission acoustique, des capteurs intelligents etc., ont été conçus pour collecter différents types de données.

5 EXIGENCE TECHNIQUE DE CONCEPTION D'UNE APPLICATION DE RESEAU DE CAPTEURS INTELLIGENTS POUR LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE

Avant de déterminer les différentes étapes nécessaires pour concevoir une architecture efficace pour les réseaux de capteurs intelligents, il est important de comprendre d'abord les exigences pertinentes pour les applications de capteur (Vehbi C. Gungor & Hancke 2009). Nous listons quelques exigences pour l'implémentation de réseaux de capteurs intelligents pour la maintenance conditionnelle et pour d'autres nombreuses applications de ce type.

- **Type d'application:** Les nœuds capteurs peuvent être utilisés pour la surveillance permanente ou discontinue d'un phénomène, la détection et l'identification d'un évènement, ou la surveillance d'un terrain et le contrôle local d'objets déclencheurs d'évènements (actionneurs). Parmi ces types d'application on trouve :
 - **Détection continue:** Les équipements de production critiques doivent être surveillés en permanence pour détecter toute variation ou défaillance, un léger décalage peut nuire à la qualité globale du produit et à la santé des équipements.
 - **Transmission périodique des données:** les capteurs prennent des mesures dans des intervalles de temps réguliers, et ils envoient les données au nœud central d'une manière périodique.
 - **Application événementielle:** Dans ce cas, l'envoi de données vers le puits est déclenché lorsqu'un évènement particulier est détecté. Les évènements peuvent

être causées par le dépassement d'un seuil dans les mesures collectées par le capteur.

- **Partage de données avec d'autres services concernés:** Avec un ensemble des nœuds qui mesurent la dégradation des équipements. les données sont transmises d'une manière périodique ou en continue. Ceci permet de faciliter le partage avec les parties intéressées.
- **Adressage d'urgence et d'alarmes:** Il peut y avoir des situations imprévues soit un mauvais fonctionnement ou variations au-delà des limites de tolérance prescrites. Un mécanisme est donc nécessaire pour définir des bandes de tolérance pour chaque module de détection. Quand les mesures à un nœud particulier dépassent la tolérance, le nœud doit envoyer une alarme relative de l'urgence.
- **Adaptabilité:** Les systèmes de la maintenance conditionnelle sont des systèmes d'apprentissage adaptatifs, caractérisés par leur comportement évolutif au fil du temps. Ils devraient être capables de s'adapter à de nouvelles situations et à l'intégration de nouvelles connaissances dans leur propre base de connaissances. Cette adaptabilité inhérente aux systèmes conditionnelle s'exige une caractéristique similaire de l'architecture de RCSF.
- **Configuration du réseau et reconfigurabilité:** Pendant la phase de configuration applications, ou pendant la reconfiguration, le technicien de maintenance peut vouloir modifier la fonctionnalité de réseau. Ceci peut induire des changements dans son fonctionnement. Pour cela il faut prendre en considération quelques changements comme : le nombre de points de données transmis lors de chaque transmission, la séquence dans laquelle les nœuds transmettent, le nombre de canaux transmis depuis chaque nœud, la bande de tolérance pour chaque nœud de capteur, etc.
- **La synchronisation du temps:** c'est un élément critique dans un réseau de capteurs comme n'importe quel système distribué. Puisque le réseau de capteurs doit être sans surveillance pour une longue durée, un tel système temporel doit être aussi fiable que possible avec une certaine tolérance aux erreurs. En effet une mauvaise synchronisation entre les nœuds peut influencer l'exactitude des données collectées, et la consommation excessive d'énergie en traitant ces données (Cam et al. 2008). On peut distinguer trois types de techniques de synchronisation de temps:
 - Serveurs temporels fixes : les nœuds sont liés à des serveurs temporels fixes ayant pour rôle de synchroniser le réseau. Ces serveurs doivent être robustes et très précis
 - Transfert du temps : le temps est transféré saut par saut de la source vers la station de base

- Auto-organisation des serveurs temporels : la synchronisation des temps ne dépend pas des serveurs temporels spécialisés. Les nœuds sont auto-organisés pour déterminer un nœud maître qui joue le rôle du serveur temporel temporairement.
- **Évolutivité:** pendant la durée de fonctionnement, certains nœuds de détection peuvent échouer ou leurs piles peuvent s'épuiser. En outre, un besoin peut survenir pour l'installation de plus de nœuds de détection pour surveiller les processus et les équipements plus étroitement et précisément. Le RCSF devrait être évolutif pour s'adapter à n'importe quel changement.
- **Efficacité énergétique:** Les nœuds de capteurs sont des appareils autonomes qui dérivent généralement leur alimentation à partir d'une batterie montée sur chaque nœud. Il devient nécessaire d'avoir un moyen inhérent d'économie d'énergie dans chaque composant du système du RCSF pour prolonger la durée de vie de chaque nœud du réseau. Toutes les couches de l'architecture sont donc tenues d'avoir une prise de conscience intégrée.

6 ÉTAPES TECHNIQUES STRUCTUREES DE COLLECTE ET D'ANALYSE DE DONNEES A L'AIDE DE RCSF POUR UNE APPLICATION DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE

Dans cette partie, nous décrivons les étapes techniques préalables à suivre pour la collecte et l'analyse des données. En utilisant la technologie de réseau des capteurs intelligents afin de permettre au personnel de maintenance de déployer cette application pour la maintenance conditionnelle dans un environnement industriel (Sammal & Roseline 2013). Pour cela il est crucial de déterminer le bon choix de l'organisation du réseau, le nombre et la typologie des capteurs, la topologie du réseau, et la répartition géographique pour une meilleure performance et un meilleur suivi. Pour ce faire, nous suivons les étapes décrites ci-dessous dans la figure 21:

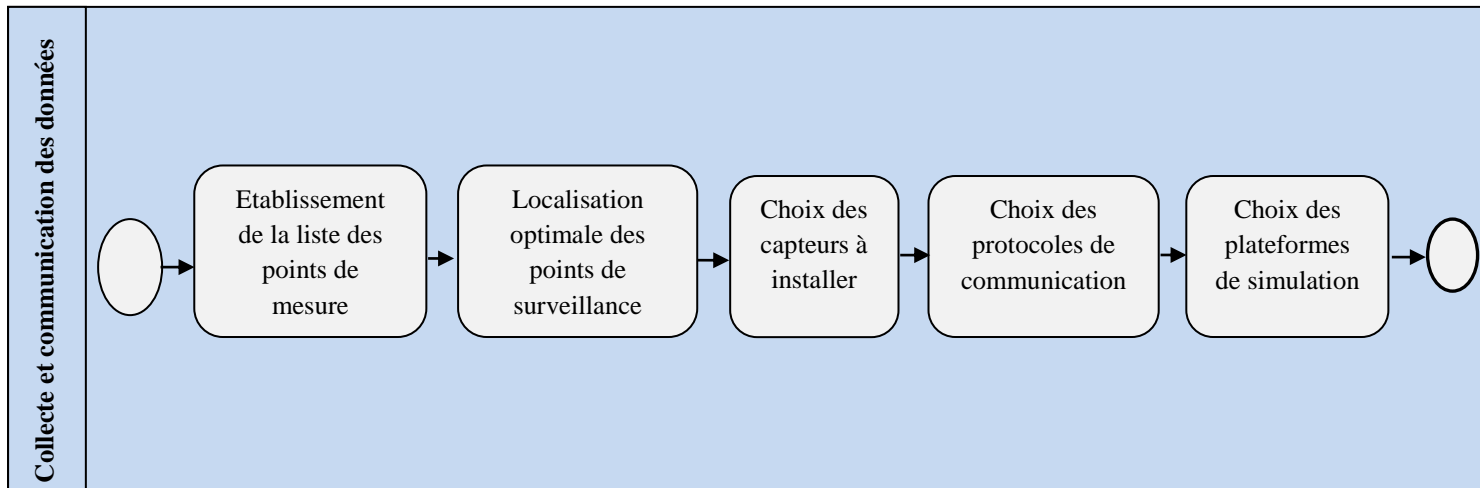


Figure 21: BPMN diagramme du processus Collecte et communication des données

6.1 Typologie des capteurs à installer:

Avant de faire le choix des types de capteurs à installer sur les machines, il faut d'abord identifier les grandeurs physiques et les paramètres significatifs, par la suite identifier les capteurs qui correspondent aux mesures choisies. Tout d'abord nous commençons par le choix du nœud de capteur sans fil qui va mesurer les valeurs physiques et environnementales telles que (température, son, vibration, pression, déplacement) et de la communiquer à un centre de commande via une station de base.

Les fonctionnalités globales de ces nœuds capteurs sont les suivantes:

- Les données détectées sont transmises au nœud central.
- Le nœud central (qui est également un capteur) recevra toutes les données des autres capteurs et les transmettra au gestionnaire de contrôle.
- Le nœud central peut arrêter toute l'opération, en cas d'événement improbable d'une situation d'urgence où le gestionnaire de contrôle ne prend pas la décision, Cette partie de l'automatisation sera également simulée dans notre expérience qu'on va discuter dans le prochain chapitre.

6.2 Topologie des capteurs:

Les architectures de topologie utilisées dans les RCSF incluent les topologies en étoile, en maillage et en grappe, comme le montre la figure 22. Le choix de la topologie dépend de la quantité, la fréquence des données à transmettre, la distance de transmission et de la durée de vie de la batterie (Bahi et al. 2019). Une topologie en étoile est un système à saut unique dans lequel un nœud particulier, appelé coordinateur, gère les communications et tous les nœuds restants qui communiquent avec lui. C'est une sorte de structure maître-esclave où le

coordinateur agit aussi comme un pont vers d'autres réseaux. De plus, la topologie en étoile est une solution économe en énergie qui assure une longue durée de vie du réseau même si un nœud tombe en panne, mais il ne peut gérer qu'un petit nombre de nœuds. Ce n'est pas une limite réelle puisque dans de nombreux cas, les communications entre les coordinateurs utilisent des liens filaires. Les topologies maillées sont des systèmes multi-sauts dans lesquels tous les nœuds sont identiques et communiquent les uns avec les autres, de sorte qu'un coordinateur ou une station de base n'est pas strictement nécessaire. Le système multi-sauts permet une portée beaucoup plus longue qu'une topologie en étoile au prix d'un taux de consommation d'énergie plus élevé et d'une latence plus élevée. En fait, les nœuds ont un cycle de service élevé car ils doivent "collecter" les messages et les changements de réseau et la latence est liée au nombre de "bonds" entre la source et le récepteur. Le but de l'architecture hybride en étoile-maille (aussi connue sous le nom d'arbre de grappe) est de profiter de la faible puissance et de la simplicité de la topologie en étoile, ainsi que de la portée étendue et de la nature auto-cicatrisante d'un maillage. Les nœuds sont organisés en une topologie en étoile autour des routeurs ou des répéteurs, qui, à leur tour, s'organisent eux-mêmes dans un réseau maillé.

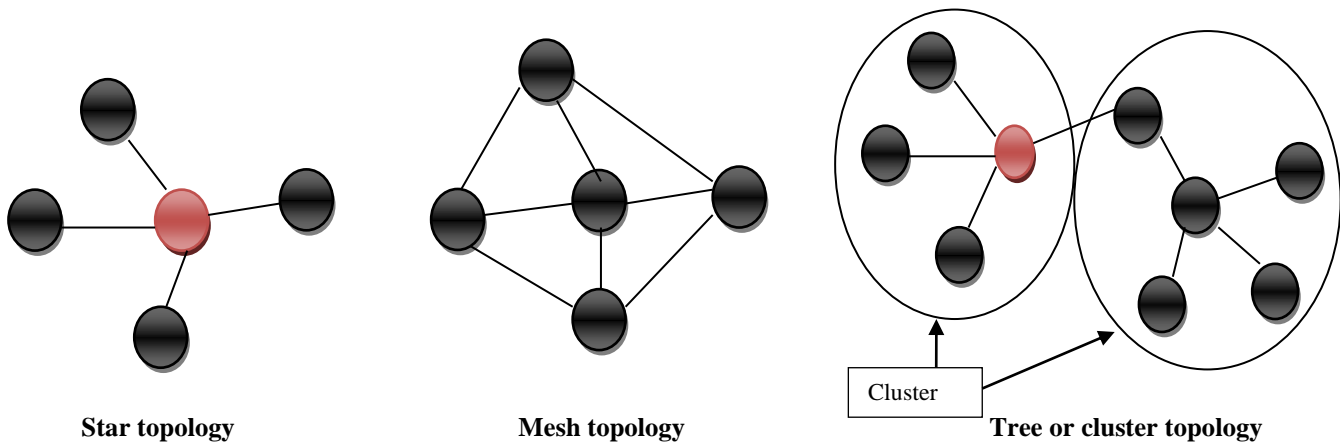


Figure 22: Topologie des capteurs

6.3 Positionnement des capteurs

Les emplacements de mesure doivent être choisis précisément pour donner la meilleure possibilité de détection de défaut et de fournir des données significatives à l'utilisateur. De plus, des informations sur les positions des nœuds peuvent être nécessaires pour les protocoles qui vont être choisis. En effet, certains capteurs donnent des valeurs erronées en raison d'une localisation incorrecte ou de la non-conformité aux instructions du fabricant. A titre indicatif,

la transmission des données peut être modifiée en raison de la présence d'obstacles à proximité du capteur. D'autre part, la présence d'une source de chaleur ou de poussière dans l'air ambiant peut fausser les mesures.

6.4 Choix des protocoles de communication

L'analyse du type de la norme ou de protocole de communication à choisir repose sur une comparaison des principales caractéristiques comme la fréquence de transmission, le débit, les distances parcourues, le type d'architecture du réseau, la consommation d'énergie, les applications ciblées, la complexité, l'utilisation à grande échelle ou non et surtout la possibilité de l'utiliser dans un environnement industriel. La norme définit les fonctions et les protocoles nécessaires pour que les nœuds de capteurs puissent s'interfacer avec divers réseaux. Ces référence décrivent quelques standards (Sarammal & Roseline 2013) (Yick et al. 2008) Certaines de ces normes incluent IEEE802.15.4 (Howitt & Gutierrez 2003), ZigBee (Mihajlov & Bogdanoski 2011), IETF 6LoWPAN (Ha et al. 2010), IEEE 802.15.3, Wibree . Le tableau 3 décrit et compare ces normes plus en détail.

	Explication	Bande radio-typique	intervalle de transmission	débit de données	Applications
RFID	Une technologie radio en développement rapide utilisée pour transférer des données à partir d'une étiquette électronique, qui comprend l'identification, la collecte d'informations. etc	125 KHz 13.56MHz 433MHz 2.4GHz	<10cm <1m 4-20m 60-100m	1-5Kbps 6,62- 26,48Kbps 40-64Kbps 200 - 400Kbps	Logistique, , E-car, IOT
Zigbee (IEEE 802.15.4)	Une pile de protocoles bien définie pour RCSF avec des fonctionnalités d'auto-déploiement, de faible complexité, de faible débit de données et de faible coût..., basée sur les normes IEEE 802.15.4.	780MHz 868mhZ, 915MHz, 2.4 MHz	100-300m	20kbps, 40Kbps, 250Kbps	Énergie intelligente, domotique, bâtiment, automatisation, santé, contrôle à distance, services de vente au détail.

					etc
Bluetooth	La technologie Bluetooth basse consommation est une norme mondiale qui permet aux périphériques avec des piles boutons de se connecter sans fil à des périphériques et services compatibles.	2,4Ghz 5GHz	10-150 m	1Mbps 24Mbps	Accès à distance, sport et fitness. Positionnement intérieur, IOT applications sur smartphone
Wifi	il s'agit probablement de la technologie de réseau local de capteur sans fil la plus largement utilisée, basée sur les normes IEEE 822.11	24GHz 5GHz	150m	54 Mbps	Vidéo, les applications de monitoring, les logements intelligents

Tableau 3: Technologies radio à courte portée et cartographie des applications dans le réseau WSN industriel.

6.5 Systèmes d'exploitation pour capteurs

Les plateformes d'essai de réseaux de capteurs intelligents sont déployées dans un environnement contrôlé, généralement avec accès public. C'est un outil qui permet la simulation des réseaux avant son déploiement réel (Navarro & Mieveville 2012). Il fournit aux chercheurs un moyen pour tester leurs protocoles, les algorithmes, les problèmes de réseau et les applications.

La simulation est l'une des technologies les plus importantes de notre époque. Dans cette section, nous allons citer quelque environnements de simulation les plus pertinents utilisés pour étudier les technologies de réseaux de capteurs intelligents et leurs principales caractéristiques et problèmes d'implémentation (tableau 4). Ces références présentent quelque plateformes (Sarammal & Roseline 2013) (Musznicki & Zwierzykowski 2014) (Jevtić et al. 2009) dédiées à la simulation des RCS. Comme exemple d'OS pour les réseaux de capteurs on peut citer ces derniers les plus utilisées.

6.5.1 TinyOS

TinyOS est un système d'exploitation open source conçu pour les capteurs sans fils et développé par l'Université de Berkeley. Il est basé sur une architecture à base de modules : pilotes pour les capteurs, les protocoles réseau et les services distribués. Les composants sont programmés en NesC, un langage de programmation dérivé du langage C adapté aux faibles ressources physiques des capteurs. Un certain nombre de plateformes sont directement programmables comme par exemple les Tmote ou les MicaZ (ces deux modèles sont compatibles avec ZigBee).

6.5.2 TOSSIM

TOSSIM est un simulateur d'événements discrets pour les réseaux de capteurs sans fil. Il est spécialement conçu pour les applications TinyOS à exécuter sur MICA Motes. Cela fonctionne en remplaçant les composants avec implémentations de simulation. TOSSIM peut remplacer une communication au niveau paquet composant pour la simulation au niveau du paquet, ou remplacer un composant de puce radio de bas niveau pour une simulation précise de l'exécution du code.

6.5.3 CASTALIA

Castalia est un simulateur de l'application pour réseau de capteurs sans fil basé sur OMNeT ++. Il peut être utilisé pour évaluer différentes caractéristiques de plate-forme pour des applications spécifiques, car il est hautement paramétrique et peut simuler un large éventail de plates-formes. À Castalia, les nœuds de capteurs sont mis en œuvre sous forme de modules composés de sous-modules représentant, par exemple, des couches de pile de réseau, une application et un capteur. Ces modules nodaux sont connectés au canal sans fil et aux modules de traitement (Musznicki & Zwierzykowski 2014).

6.5.4 COOJA

C'est un simulateur inclus dans le système d'exploitation Contiki, et principalement développé pour les réseaux sans fil composés de capteurs utilisant ce système. Le simulateur opère sur trois niveaux d'abstraction, le niveau réseaux, le niveau système d'exploitation ainsi que le niveau code machine. Les nœuds simulés peuvent être de différents types, incluant les capteurs qui n'utilisent pas Contiki. La seule limitation de COOJA est que chaque nœud est simulé seulement à l'un des niveaux.

Simulator	ns-2	Castalia (based on OMNeT++)	TOSSIM	COOJA/MSP Sim	
Level of details	generic	generic	code level	all levels	
Timing	discrete event	discrete event	discrete event	discrete event	
Software License	GNU GPL	Academic Public License	BSD	BSD	
Popularity	780000	11900	9810	3010	
Simulator platform	FreeBSD, Linux, SunOS, Solaris, Windows (Cygwin)	Linux, Unix, Windows (Cygwin)	Linux, Windows (Cygwin)	Linux	
WSN platforms	n/a	n/a	MicaZ	Tmote Sky,ESB/2	
GUI support	monitoring of simulation flow	monitoring of simulation flow, C++ development, topology definition, result analysis and visualization	none	yes	
Available models and protocols	Wireless channel	free space, two-ray ground reflection, shadowing	lognormal shadowing, experimentally measured path loss map, packet reception rates map, temporal variation, unit disk	lognormal shadowing	multi-path ray-tracing with support for attenuating obstacles, unit disk
	PHY	Lucent WaveLan DSSS	CC1100, CC2420	CC2420	no data
	MAC	802.11 (several implementations), preamble based TDMA (still at preliminary stage)	TMAC, SMAC, Tunable MAC (can approximate BMAC, LPL, etc)	standard TinyOS 2.0 CC2420 stack	X-MAC, LPP, NULLMAC
	network	DSDV, DSR, TORA, AODV	Simple Tree, Multi-path Rings	no data	no data
	transport	UDP, TCP	none	no data	no data
	sensing	random process with Mannasim add-on	generic moving time-varying physical process	no data	no data
Energy consumption model	yes	yes	with PowerTOSSIM z add-on	yes	

Tableau 4: Comparaison des simulateurs (Jevtić et al. 2009)

7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons modélisé notre plateforme de télésurveillance à l'aide du programme de modélisation UML .Ensuite, nous avons mis le point sur les différentes étapes nécessaires qui constituent notre démarche. Cette démarche générique, a pour objectif principal l'intégration des réseaux de capteurs intelligents au niveau de la politique de la maintenance conditionnelle en tenant compte de tous les aspects organisationnelle et technique relatifs à la mise en œuvre d'un tel système. Afin d'éclaircir notre démarche de télésurveillance, une dernière étape s'impose : il s'agit de décrire et définir chaque étape permettant de mesurer et d'évaluer les performances d'un système de télésurveillance à base de capteurs intelligents. La finalité de cette démarche proposée, est de guider les industriels grâce à cette démarche, pour réussir un projet qui couple la maintenance conditionnelle et les RCSF afin de mettre en œuvre un système de télésurveillance dans l'entreprise industrielle.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter à l'aide d'une étude de cas industriel notre contribution en matière de conception globale d'un système de télésurveillance à base de capteurs intelligents. Cette conception passe par la mise en place de notre démarche via une simulation de notre matériel, plateformes et protocoles choisis. Ceci dans le but d'aider et faciliter la tâche pour le secteur industrie de migrer vers une maintenance moderne qui suit l'ère actuelle de l'industrie 4.0.

**CHAPITRE III: SIMULATION D'UN RESEAUX DE
CAPTEURS INTELLIGENTS POUR LA
MAINTENANACE CONDITIONNELLE : ETUDE DE
CAS DANS UNE CENTRALE THERMIQUE.**

1 INTRODUCTION

Les capteurs présentent de nombreux avantages, notamment la flexibilité, le faible coût, la facilité de déploiement et l'acquisition de données continue et en temps réel, la décentralisation des données; etc. Par conséquent, RCSF peut jouer un rôle essentiel dans le cadre de l'industrie 4.0. Cela a conduit à une expansion rapide dans les usines et les systèmes de productions intelligentes. Afin de permettre aux industrielles et aux professionnelles de maintenance d'anticiper, les défaillances dans le cadre d'une approche proactive, et de prendre une décision au niveau des actions à entreprendre et de n'intervenir que lorsque le suivi de certains paramètres transmis par les capteurs, l'exige.

En effet, l'application proposée permettra aux usines industrielles de mettre en œuvre une maintenance conditionnelle moderne, tout en respectant les différentes étapes présentées dans le chapitre précédent. Ce chapitre présente en premier lieu l'architecture du système, l'organisation du matériel, et explique le choix des capteurs; ainsi que l'identification des configurations de capteurs et des topologies de réseau; également le choix de la plate-forme la plus appropriée. Par la suite nous allons proposer une approche basée sur la simulation qui aide l'industrie à vérifier la fiabilité de toute application de réseau de capteurs sans fil avant de l'utiliser dans un environnement industriel; Ceci dans l'objet de réduire les coûts d'exploitation et d'améliorer la surveillance en temps réel de la maintenance conditionnelle (CBM).

2 CONTEXTE DU TRAVAIL

2.1 Motivation et choix du secteur du travail

Les entreprises utilisent souvent des techniques manuelles pour mesurer et entretenir les équipements. Dans certains cas, les employés doivent connecter physiquement et fréquemment leurs outils de diagnostic aux équipements pour extraire les données de capteurs particuliers, puis les télécharger sur un PC. D'autre part, ils utilisent des techniques de surveillance à l'aide des capteurs filaires : ces techniques présentent des limitations. Par exemple, les déplacements fréquents du staff de la maintenance à la salle de surveillance, représente un temps énorme de gaspillage. Ces méthodes, qui demandent beaucoup de travail, augmentent non seulement le coût de la maintenance, mais rendent également le système sujet aux erreurs humaines.

L'objectif de notre travail est de prendre en considération la dynamique d'évolution du

système de production et de son environnement, afin d'accompagner les entreprises industrielles dans cette ère des données numériques et l'ère de l'industrie 4.0 : une industrie connectée, créative et optimisée. D'une part ce travail permettra aussi d'avoir des points de repères et de consolider le savoir-faire pour les industriels et les prestataires de service en matière de mise en œuvre d'un système de télésurveillance à base de capteurs intelligents. D'autre part ce travail engendre un apport capital pour les entreprises marocaines, dans la mesure où il permettra de respecter les standards en termes d'usage de réseaux de capteurs intelligents et d'optimisation de la maintenance. En prenant en compte l'essence des autres applications adoptées dans d'autre domaine. Ceci permettra de rompre avec les pratiques archaïques en matière de gestion industrielle vers une gestion intelligente, et de réduire la fosse numérique avec les autres industries du monde.

Pour répondre à cette vocation, une nouvelle architecture d'application est conçue pour des réseaux de capteurs sans fil distribués en temps réel en continu. Nous développons un système de télésurveillance à l'aide des réseaux de capteurs sans fil pour la maintenance conditionnelle des machines. Nous développons une plate-forme matérielle, une architecture réseau et un protocole de communication à accès moyens. Nous mettons en place un réseau de capteurs pour faciliter la surveillance en temps réel et le traitement complet des données pour la surveillance de l'une des machines les plus critiques dans une centrale thermique au Maroc. L'intégration sera mise sur une turbine, est présentée à titre d'étude de cas. Le but de la mise en œuvre consiste à démontrer la faisabilité de la conception et aussi découvrir les propriétés de l'utilisation des technologies sélectionnées.

2.2 Etude de cas du projet d'implémentation des réseaux de capteurs intelligents pour la maintenance conditionnelle

La turbine, illustrée (figure 22) a été sélectionnée pour une étude de cas. C'est un dispositif rotatif destiné à l'utilisation de l'énergie cinétique d'un fluide liquide tel que l'eau ou du gaz (vapeur, air, gaz de combustion), pour faire tourner un arbre supportant les aubes de la turbine. La turbine est équipée de 19 roues simples et une double, le flux de vapeur à l'admission est de 286T/ h, son débit de vapeur d'échappement est de 192 T / h et la vitesse de rotation est de 3000 tours / min. En raison du fonctionnement continu dans un environnement à haute pression, la turbine subite fréquemment deux modes de défaillances mécaniques critiques: la vibration des paliers de butée (illustrés sur la figure 23) et la température élevée du palier de butée métallique. Nous prenons ce problème comme notre motivation pour

développer notre approche, surtout que ces défauts sont les plus fréquents dans les machines industrielles. Ils provoquent des temps d'arrêt imprévus sur les équipements de production essentiels, car le changement de la vibration d'une machine est souvent la première manifestation physique d'une anomalie.



Figure 23: Turbo-alternateur choisi pour l'étude de cas, 75 MW

Comme nous avons cité ci-dessus, pour prendre une bonne mesure, il est nécessaire de bien choisir l'emplacement et la direction. En pratique, trois modes peuvent être distingués pour mesurer la vibration du palier de butée (figure 24 et 25): la vibration absolue des paliers; la vibration relative et la vibration absolue de l'arbre. Dans notre cas, nous allons choisir la vibration absolue. Cette dernière est mesurée par des capteurs sismiques appelés accéléromètre ou vélocimètre, idéalement placés sur les paliers de la machine. Bien que les vibrations ne soient pas générées par les roulements, ce sont les points de connexion entre le rotor qui génère les vibrations et le reste de la machine.

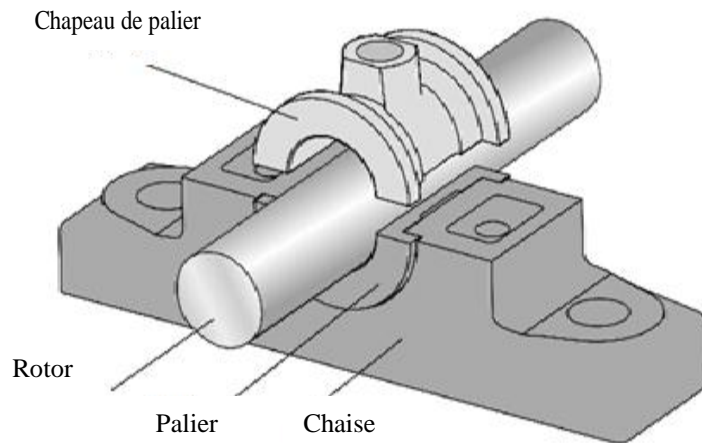


Figure 24: Palier de butée

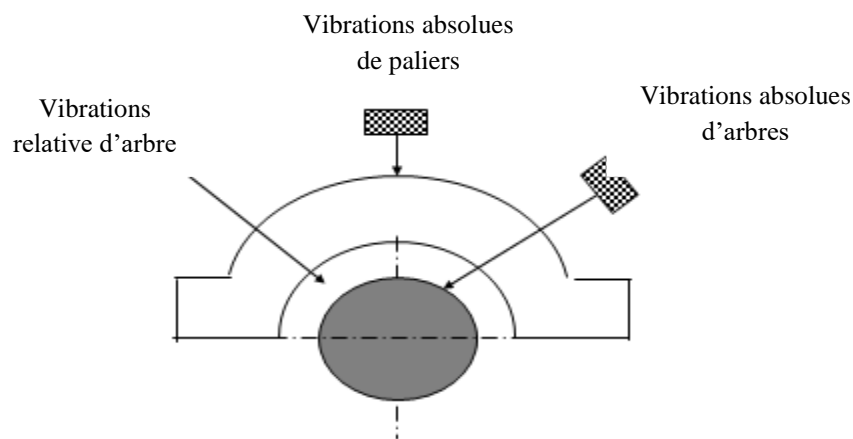


Figure 25: Mesure de position de vibration

Pour la deuxième panne, c'est la variation de la température du palier de butée en métal. Etant donné que le but de la poussée est de fixer la position relative du rotor par rapport au corps de la turbine. Les corps sont construits de telle manière à ce que les poussées axiales sur le rotor, dues à l'écoulement de la vapeur à travers ses corps, s'annulent; les forces sur l'arrêt sont donc faibles. Lorsque des forces anormales sont appliquées à la butée pendant des périodes trop longues, les patins de la butée s'usent et deviennent dangereux via le déclenchement de la turbine figure 26.



Figure 26: Palier de butée

Dans ce travail, nous proposons une surveillance continue en temps réel basée sur des conditions en utilisant des capteurs intelligents. Nous utilisons l'application RCSF afin de surveiller les défaillances de la turbine et de transmettre les données au personnel du service maintenance en temps réel. La principale motivation pour l'utilisation de l'application RCSF est sa flexibilité, sa mise en œuvre facile et économique par rapport aux autres capteurs filaires. En plus l'application RCSF offre une multitude de fonctionnalités personnalisables en fonction des besoins de l'utilisateur final.

En général, la surveillance des équipements industriels n'a pas de support en temps réel. L'approche classique pour la surveillance consiste en l'acquisition de données. Plus tard, les données seront enregistrées dans un processeur central pour les analyser. De ce fait, il est inadapté à la surveillance ou à la prise de décision critique en temps réel. En particulier, ces données historiques ne peuvent pas être très utiles pour déterminer la "santé" de l'équipement et les données ne peuvent pas être partagées avec les fournisseurs qui sont responsables des interventions de maintenance. Cependant, les applications RCSF peuvent non seulement surveiller les équipements industriels en temps réel, mais également transmettre les données au personnel du service maintenance pour les analyser en temps réel grâce à une alarme lors de détection d'une défaillance. De plus, ces caractéristiques permettent au personnel de maintenance de prendre des mesures immédiates en cas de panne improbable de la machine.

Et à part le fait qu'il soit facilement disponible et convivial, le déploiement des capteurs intelligents permet au personnel du service maintenance d'ajouter une couche supplémentaire de sécurité aux machines industrielles. Le nœud central est programmé pour arrêter tout le système en cas d'urgence, comme lors de la réception des valeurs qui dépassent le seuil programmé. Ainsi, il permet d'éviter un problème fatal qui entraînera des temps d'arrêt ou des

dommages au système. Dans d'autres fonctions, les données peuvent être transmises au service de sous-traitance qui est responsable de l'analyse du comportement de la machine et de l'échec en temps réel pour intervenir si nécessaire.

Dans notre architecture de télésurveillance proposée et basée sur l'analyse des défaillances des équipements de production, nous allons présenter la simulation de quatre capteurs: les paramètres de températures et de la vibration pour déterminer les conditions des changements environnementaux et les valeurs mesurées détectant le comportement anormal ou sous-optimal, afin d'éviter que l'équipement ne se détériore davantage

3 IMPLEMENTATION DES RESEAUX DE CAPTEURS INTELLIGENTS POUR LA TELESURVEILLANCE D'UNE TURBINE

3.1 Design du système

Le système est principalement composé d'une station de surveillance de l'état des équipements, d'un centre de surveillance des installations et d'un système de maintenance conditionnelle. La structure de la plateforme est telle que présentée à la figure 27. La station de surveillance communique avec le centre de surveillance de la centrale thermique et le service prestataire du service maintenance via un réseau sans fil. Les résultats d'analyse sont envoyés à la base de données; Des experts et des techniciens donnent une proposition d'évaluation et de maintenance à travers les valeurs de paramètre obtenues et les transmettent au terminal de surveillance sous la forme de relevés via le réseau. Divers responsables ou membres du personnel technique, ainsi que des employés de bureaux distants, peuvent se connecter au centre de maintenance conditionnelle de surveillance à distance via le réseau et vérifier la situation instantanée de tous les équipements, et peuvent consulter l'historique des pannes et fiche de maintenance via son compte et son mot de passe (Ramadany, M. & Amegouz 2017).

Les capteurs sont répartis sur l'équipement et le système de surveillance consiste en une acquisition de données, un terminal de traitement de données et un système de transmission par réseau sans fil. Le système de surveillance est illustré à la figure 27.

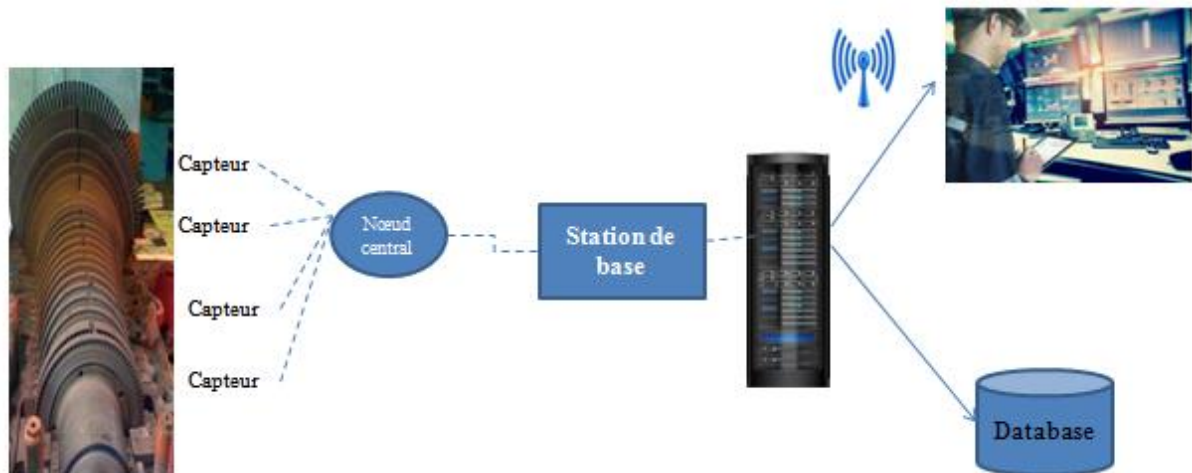


Figure 27: Composition du système

La station de surveillance de la centrale thermique est responsable de l'acquisition des paramètres de fonctionnement de l'équipement et via le centre de contrôle et suivi des équipements, les données sont transmises au terminal de surveillance; Le terminal de surveillance est situé dans le centre de dispatching de la centrale thermique, où les conditions de fonctionnement de l'équipement en temps réel sont affichées, et le paramètre sera transmis au centre de diagnostic de santé à distance. Avant cela, nous devons configurer une ligne de transmission de données sans fil. Les ordinateurs terminaux de surveillance des centrales se connectent par la voie d'accès Internet.

3.2 L'architecture proposée

Dans ce paragraphe, nous décrivons les étapes préalables à suivre pour la collecte et l'analyse des données en utilisant la technologie de réseau des capteurs intelligents afin de permettre au personnel de maintenance de déployer cette application pour la maintenance conditionnelle dans un environnement industriel. Pour cela il est crucial de déterminer le bon choix de l'organisation du réseau, le nombre et la typologie des capteurs, la topologie du réseau, et la répartition géographique pour une meilleure performance et un meilleur suivi. Pour ce faire, nous suivons les étapes décrites dans le chapitre précédent:

Notre architecture proposée de réseau de capteurs sans fil est composée de quatre capteurs et d'un nœud central; les capteurs déployés suivront la structure de la norme IEEE 802.15.4 et utiliseront 6LoWPAN comme protocole de communication avec le nœud central. Cependant, le nœud central transmettra les données via le routeur périphérique. À partir de la base de données centrale, les données peuvent être consultées sur les mobiles / ordinateurs portables

ou d'autres applications d'utilisateur final qui sont exploitées par le gestionnaire de contrôle et le personnel technique utilisant le réseau 4G LTE, la figure 28 montre la conception de l'architecture proposé. Pour notre objectif de simulation, nous avons utilisé deux types de plateformes: les capteurs Sky mote (Moteiv Corporation 2006) et Z1 mote, qui sont l'un des principaux acteurs du système de réseau de capteurs sans fil. Le système de surveillance est continu et capable d'arrêter le fonctionnement dans le cas de la réception d'une valeur alarmante qui dépasse le seuil prédéterminé.

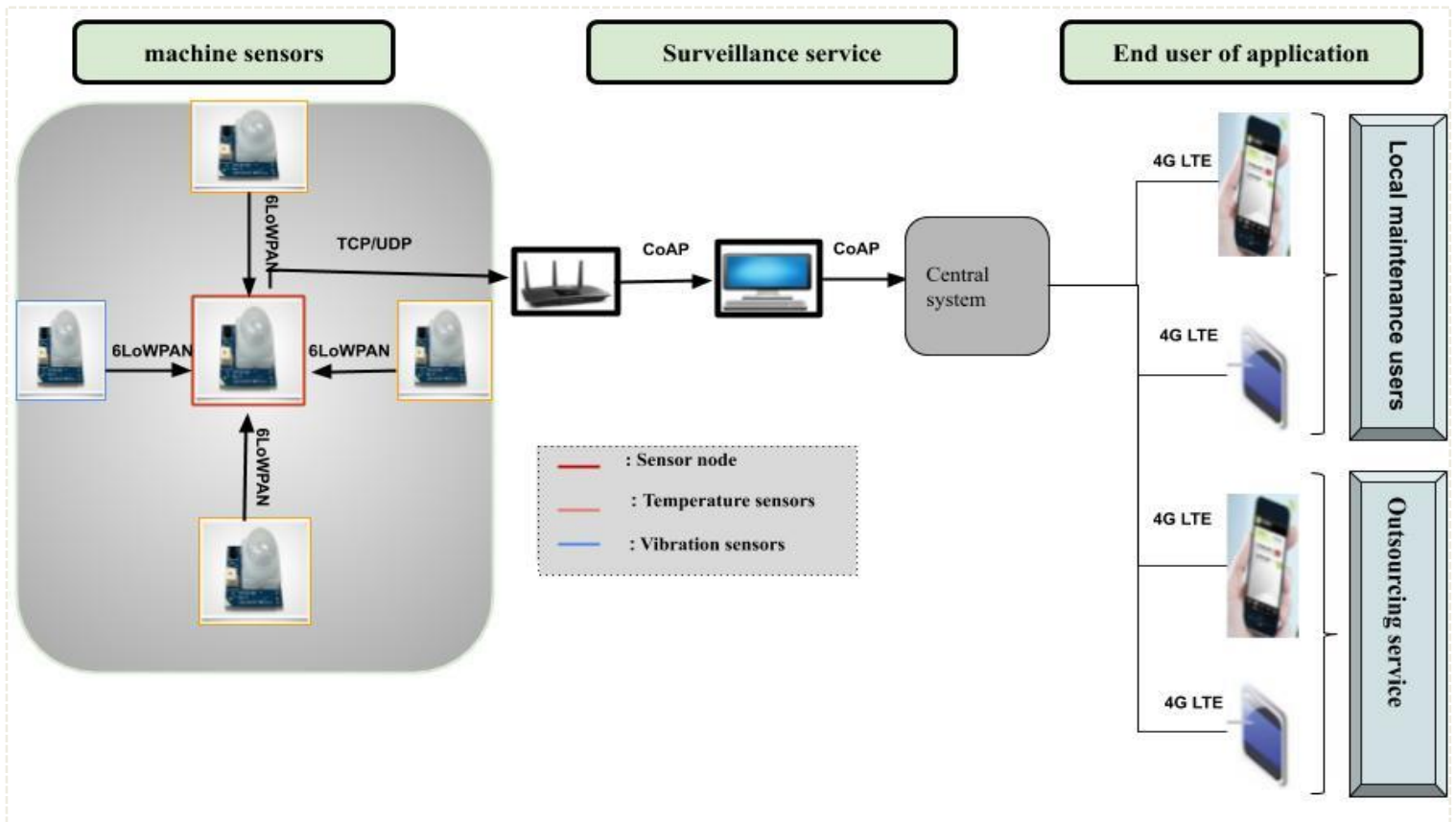


Figure 28: Conception de l'architecture proposée

3.3 Topologie des capteurs choisis

Pour notre objectif de simulation, nous avons considéré cinq capteurs. À partir desquels un nœud agira comme un hub central. La configuration globale du nœud choisis est la topologie "étoile" classique en formant un arbre où le nœud central est racine et les autres nœuds sont la feuille (enfant). Les raisons du choix de la topologie en étoile sont les suivantes:

- Dans un réseau local, la topologie en étoile fournit les communications les plus fiables entre les appareils. Dans notre configuration, nous avons besoin de communication continue et fiable pour un suivi en temps réel.

- Le «hub» central (capteur) transmettra les données de réception de différents nœuds au centre de surveillance.
- Le "hub" central aura la propriété du renseignement. Par exemple, en recevant des messages d'alarme de l'un des nœuds déployés, il peut arrêter le système. Cela implique un autre niveau de mesures de sécurité pour les systèmes importants et coûteux.
- La topologie en étoile est facile à déployer et facile à maintenir. Par exemple, il est facile de remplacer ou d'ajouter des nœuds au réseau sans affecter le réseau entier.
- La facilité de déploiement et de maintenance présentent des avantages pour l'installation de grands systèmes qui en supportent le coût.
- L'approche «centralisée» fournie par la topologie en étoile aide à résoudre les problèmes qui ont un impact direct sur les performances et la surveillance du système.

3.4 Choix des protocoles des communications proposées

Le choix du protocole de communication entre les nœuds est crucial, car il permet une transmission de données fiable et ininterrompue vers le nœud central. Bien que nous ayons de nombreux protocoles de communication disponibles pour les capteurs, nous nous concentrons uniquement sur ZigBee et 6LoWPAN en raison de leur adaptabilité à ce but particulier. En outre, nous gardons le protocole de communication Bluetooth hors de notre portée, en raison de sa nature d'être plus approprié pour les appareils personnalisés. ZigBee a une grande base d'utilisateurs comme Bluetooth. De plus, ZigBee est plus adapté aux systèmes industriels complexes (Kumar & Gupta 2013). Les principaux avantages de l'utilisation de ZigBee qui se traduisent par le fait d'offrir un fonctionnement à faible consommation, une haute sécurité, une robustesse et une évolutivité élevées dans les protocoles M2M, ZigBee PRO et ZigBee Remote Control (RF4CE) sont basés sur le protocole IEEE802.15.4.

D'un autre côté, le protocole IP clé émergé est 6LoWPAN (réseau personnel sans fil IPv6 à faible consommation). 6LoWPAN s'est révélé être un meilleur protocole pour la communication IoT par rapport à d'autres protocoles en raison de son adaptabilité (Magazine et al. 2017). Les avantages se traduisent comme suit :

- 6LoWPAN est un protocole réseau qui définit les mécanismes d'encapsulation et de compression d'en-tête.
- La norme à la liberté de la bande de fréquence et de la couche physique et peut également être utilisée sur plusieurs plates-formes de communication.

- 6LoWPAN fournit un moyen rentable de communiquer entre les appareils / capteurs via un réseau sans fil de faible puissance.

Pour notre objectif de simulation, nous avons utilisé 6LoWPAN en raison de son adoption flexible dans l'IoT industriel. L'interopérabilité est l'une des principales raisons derrière la préférence de 6LoWPAN par rapport à ZigBee. Contrairement à ZigBee, 6LoWPAN offre une interopérabilité avec d'autres périphériques sans fil 802.15.4 ainsi qu'avec des périphériques sur toute autre liaison réseau IP. Cette fonctionnalité permet d'intégrer avec des systèmes déjà existants à faible coût. De plus, le routage IP sur les liaisons 6LoWPAN ne nécessite pas nécessairement d'informations d'entête supplémentaires au niveau de la couche 6LoWPAN. Cela facilite le chargement des paquets et garde plus de place aux données utiles. En outre, la taille de code typique pour une pile complète est de 90 Ko pour ZigBee et de 30 Ko seulement pour 6LoWPAN. Lors de notre simulation nous allons utiliser la configuration des caractéristiques présentée dans le tableau 5.

Configurations	Values
Communication range	55 m
Interference range	60 m
Type of sensor node	skyMote
Number of mobile sensor	4 + one sensor node
Number of linked sensors	4
MAC layer	CSMA+ContikiMAC
Radio interference	CC240 2.4 GHZ IEEE
Number of routers	1

Tableau 5: Les caractéristiques et la configuration utilisée dans la simulation

3.5 Plateforme d'évaluation de la simulation

L'adoption d'applications RCSF dans un environnement industriel nécessite une phase de simulation exhaustive pour garantir le bon fonctionnement de tous les appareils. En effet, pour les grands réseaux, le nombre de capteurs peut atteindre plusieurs milliers et donc un coût

financier relativement important, donc, Il est nécessaire de simuler l'architecture proposée afin de minimiser les erreurs de conception possibles. Dans ce contexte, nous avons mis en place une plateforme expérimentale visant à tester, valider et simuler le fonctionnement de notre application. La fonction principale est de vérifier le comportement des capteurs développés et des protocoles de communication avant même de les déployer en situation réelle. Pour simuler notre réseau de capteurs sans fil, nous utiliserons le simulateur OS Contiki (Jevtić et al. 2009).

3.6 Système d'exploitation Contiki

Contiki est un logiciel open source écrit en langage de programmation C pour les réseaux de capteurs sans fil (A.~Dunkels et al. 2004). Il suit une architecture modulaire. C'est un simulateur de réseau qui permet aux développeurs d'exécuter et de tester leurs applications sur des périphériques matériels entièrement émulés et de tester leur code avant de l'exécuter sur le matériel ciblé réellement. En outre, il prend en charge des modes de faible consommation d'énergie efficaces pour le microcontrôleur pris en charge et fournit différentes routines pour calculer la consommation d'énergie sur une base d'exécution.

3.6.1 Simulateur de réseau Cooja

Cooja est une plate-forme qui peut être utilisée pour émuler des réseaux de capteurs intelligents, communiquant avec des protocoles réalistes. Une caractéristique importante du projet Contiki est le simulateur de Cooja. Il permet de tester les applications de contiki, (Sehgal 2013) explique les étapes pour utiliser Cooja, il a été développé en langage JAVA. Il permet la simulation d'un seul nœud sans fil ou d'un réseau entier sur un périphérique standard sans l'existence physique réelle de ces périphériques. Les fonctionnalités uniques de l'interface graphique permettent aux utilisateurs finaux de simuler leurs scénarios souhaités avec une précision précise. Cooja est utilisé pour la simulation et le test de différente application dans différents domaines tels que la santé (Kugler et al. 2013), l'agriculture (Khelifa et al. 2015) et la gestion des serres (Coimbatore 2014). En outre, dans l'optimisation de la consommation d'énergie (Velinov & Mileva 2016). Dans notre présent travail, nous utiliserons Cooja comme plate-forme de simulation qui nous permettra de tester notre code et nos systèmes avant de l'exécuter sur le matériel réel.

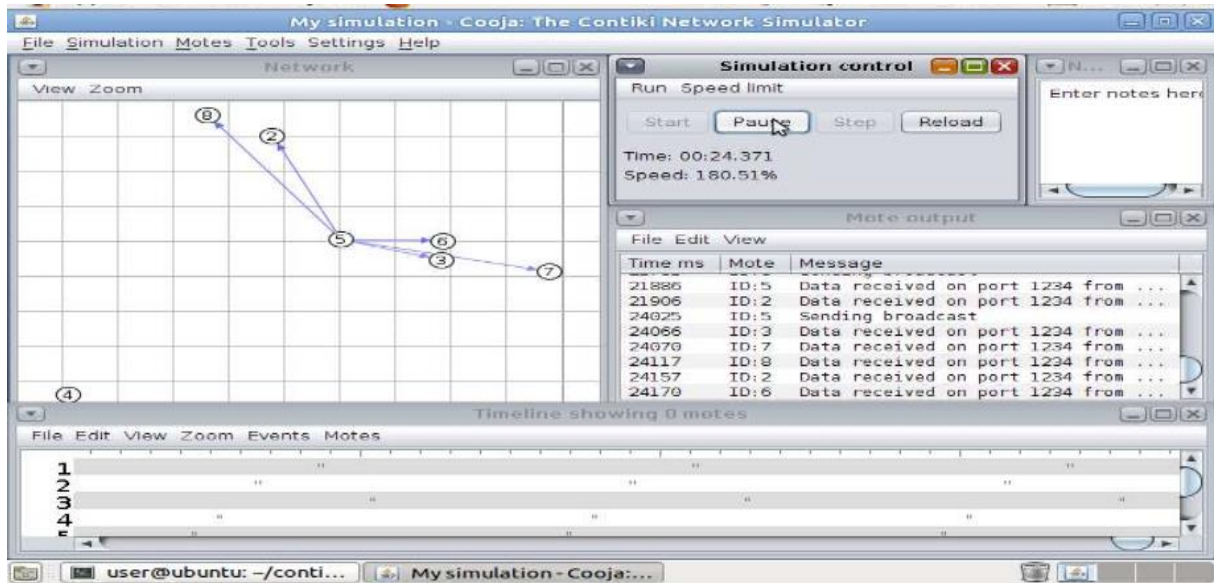


Figure 29: Interface Contiki

3.6.2 Configuration expérimentale et choix des plateformes et protocoles de communication

3.6.2.1 Tmotesky

Tmotesky est équipé d'un MCU 16 bits à 8 ~ kHz, de 10 à Ko Ko de RAM et de 48 à Ko de mémoire non volatile. La communication par diffusion, aux fins du transfert de données vers le nœud central, est réalisée via le protocole de couche MAC IEEE 802.15.4 et à l'aide de 6LoWPAN en tant que couche d'adaptation (à l'aide de modules Contiki). Cette configuration est très populaire dans les paramètres IoT. Le protocole IEEE 802.15.4 fournit un débit de données maximal de 250 Kbps, une couverture maximale de 75 m et une taille de trame de 127Bits. Les simulations sont effectuées avec le simulateur COOJA en utilisant la configuration des fonctionnalités indiquée dans le tableau 6.

Configurations	Valeurs
Gamme de communication	55 m
Gamme d'interférence	60 m
Type de nœud de capteur	skyMote
Nombre de capteurs mobiles	4 + one sensor node
Nombre de capteurs liés	4
MAC layer	CSMA+ContikiMAC
Interférence radio	CC240 2.4 GHZ IEEE
Nombre de routeurs	1

Tableau 6: Une fonctionnalité de configuration utilisée dans la simulation

3.6.2.2 Z1 mote

Comme décrit dans (A.~Dunkels et al. 2004), Z1 est développé en tant que plate-forme de capteurs sans fil à usage général compatible avec les familles Tmote. Typiquement, Z1 surpasse la famille T mote dans différents aspects. Il garantit la robustesse et l'efficacité avec un faible coût énergétique. Le Z1 est équipé d'un microcontrôleur de basse consommation MSP430F2617 de deuxième génération {<https://github.com/Zolertia/Resources/wiki/The-Z1-mote>}. Les caractéristiques de ce mote sont les suivantes:

- 8 Ko de RAM et une mémoire flash de 92 Ko
- Émetteur-récepteur CC2420, conforme à la norme IEEE 802.15.4, fonctionnant à 2,4 GHz avec un débit de données effectif de 250 Kbps
- Robuste et efficace à faible coût énergétique

À l'instar de Tmote Sky, nous utilisons la même configuration expérimentale pour les moteurs Z1 pour effectuer la simulation.

4 TEST DE LA SIMULATION

Tout d'abord, nous simulons notre architecture proposée à l'aide du module Energest. Il s'agit d'une application qui mesure le temps pendant lequel le capteur se trouve dans différents états tels que CPU, LPM, Tx et Rx. Il a été développé pour donner une estimation énergétique dépensée par les capteurs. Dans notre simulation (figure 31), nous allons utiliser les deux plateformes Tmotesky et Z1 mote. Nous utilisons un seul routeur et 5 capteurs parmi lesquels 3 capteurs de température (contrôlent la température en continu et transmettent les données au nœud central), un capteur pour surveiller les vibrations et un nœud capteur en tant que nœud central pour collecter toutes les données reçues des 4 autres nœuds figure 30 présente la simulation de la maintenance au sein des capteurs. La compilation du programme est exécutée avec succès pour les deux plates-formes et les résultats des comparaisons de la consommation d'énergie et du cycle de service seront présentés dans les paragraphes suivants.

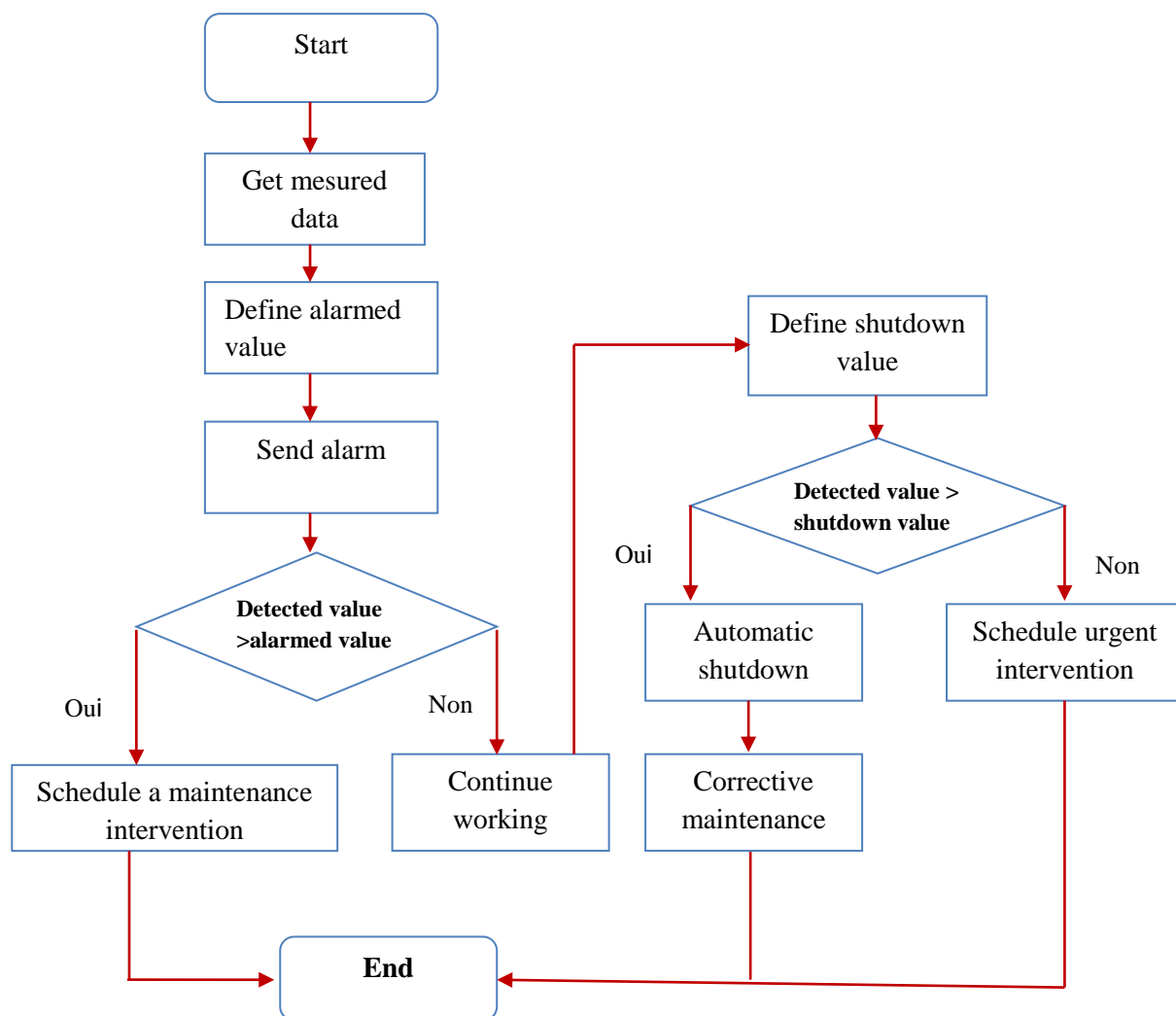


Figure 30: Logarithme de simulation de la maintenance conditionnelle au niveau des capteurs

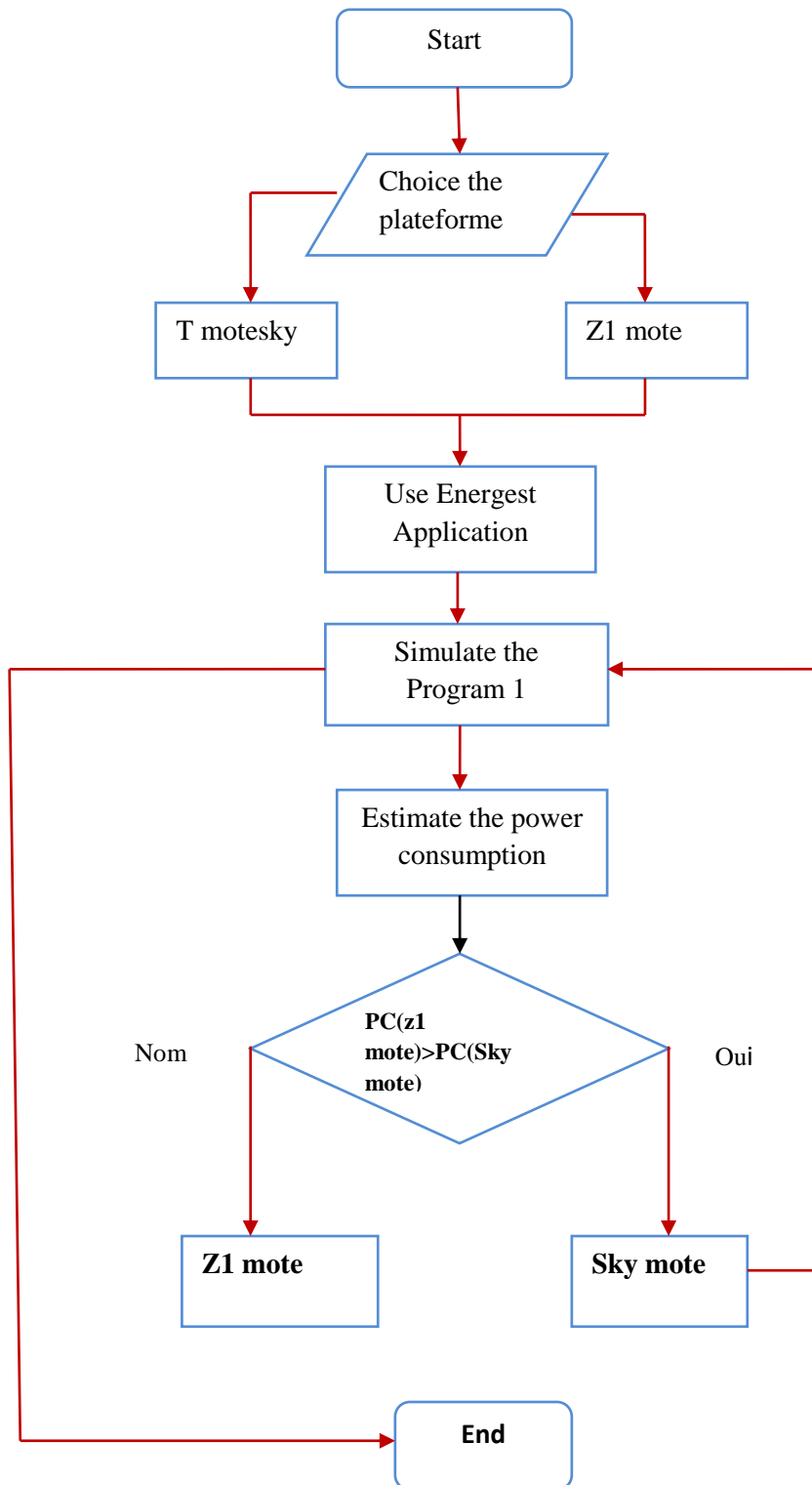


Figure 31: Logigramme du choix de la plateforme de simulation

4.1 Efficacité Energétique

En règle générale, les performances de RCSF montrent une forte dépendance de la capacité de la batterie. En outre, la durée de vie de la batterie dépend de la consommation d'énergie

des utilisateurs pour l'envoi et la réception de messages. La fréquence de ces messages joue un rôle crucial. Ainsi, l'optimisation des scénarios de transmission de messages peut améliorer la durée de vie de la batterie. Pour ces raisons, les approches techniques visant à prolonger la durée de vie des capteurs alimentés par batterie ont fait l'objet de nombreuses publications sur les réseaux de capteurs (Tiwari et al. 2007). Pour nos besoins d'expérimentation, nous avons choisi de reproduire l'émulateur de réseau Cooja en utilisant les moteurs Tmote sky et Z1, ces derniers étant les plates-formes les plus utilisées dans de nombreux travaux de recherches.

Notre objectif principal est de connaître les consommations d'énergie de ces deux types de motes. Le graphique suivant montre (figure 32) les valeurs imprimées dans plusieurs états de Sky mote et Z1 mote. Pour estimer la consommation d'énergie des nœuds et justifier notre choix entre ces deux capteurs, nous allons exécuter la simulation de la conception proposée après avoir calculé la consommation d'énergie à l'aide de la formule suivante (1) (Velinov & Mileva 2016):

$$\text{Power consumption} = \frac{\text{Energestvalue} * \text{Current} * \text{Voltage}}{\text{RTIMER_SECOND} * \text{Runtime}} \quad (\text{mW}) \quad (1)$$

Où Energest est la différence entre le nombre de ticks à deux intervalles de temps (mW). La tension pour Z1 et Sky mote est de 3V. RTIMER_SECOND est égal à 327689 (s). Le temps d'exécution est l'intervalle de temps dans lequel nous effectuons des mesures (10 secondes dans notre exemple).

Le graphique suivant (figure 32) illustre la variation de la consommation d'énergie des deux motes. Nous pouvons en conclure que, lors du transfert des messages, la consommation d'énergie varie normalement dans les plates-formes de remorquage, sa consommation augmente rapidement, comme dans la seconde centaine, la motricité consommant plus d'énergie que les autres points, cela est dû à la quantité de transfert de données à ce moment. De plus, nous pouvons conclure que le Sky mote consomme plus d'énergie que le Z1 mote.

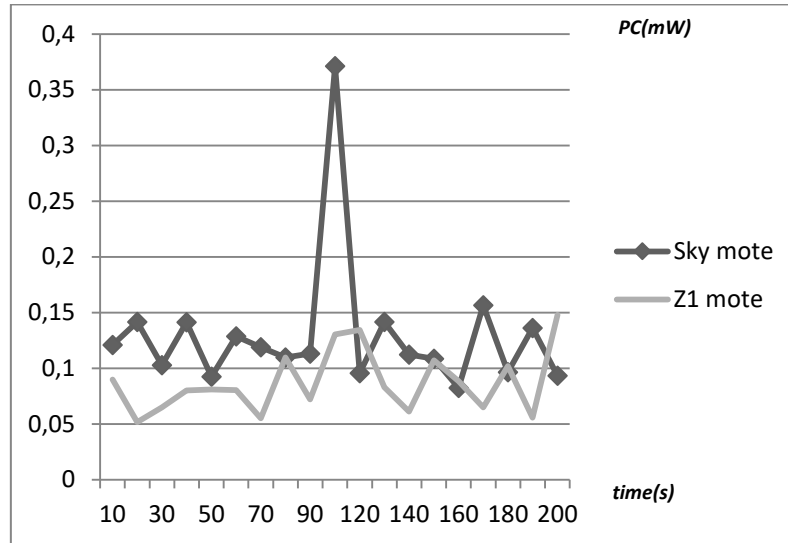


Figure 32: Evolution de la Consommation d'énergie

4.2 Cycle de service

Nous effectuons une série de simulations avec l'outil Powertrace de Contiki, en utilisant à la fois les plateformes Tmotesky et Z1 pour mesurer le cycle de service de la radio qui dépend du niveau de la batterie (Gustavo A. Nu nez Segura,2016.). Le cycle de service est l'unité d'énergie d'un nœud nécessaire pour envoyer et recevoir un message ou un paquet unique. Cette comparaison entre les deux motifs aidera le responsable industriel à choisir les motifs les mieux adaptés au déploiement spécifique à un cas sur des équipements industriels. Pour le calcul, nous avons utilisé la formule suivante (2):

$$\text{Duty cycle} = \frac{\text{Energés_TX} + \text{Energés_RX}}{\text{Energés_CPU} + \text{Energés_LPM}} \quad (2)$$

Avec :

- Le rapport cyclique Energy-Tx décrit l'énergie nécessaire pour transférer le message depuis un nœud spécifique (mW).
- Energés-Rx indique l'énergie nécessaire pour recevoir un message d'un autre nœud (mW).
- Energés-CPU est l'énergie nécessaire pour exécuter toutes les opérations (mW).
- Energés-LPM est le nombre total des ticks dans un état LPM (mode faible consommation) (mW).

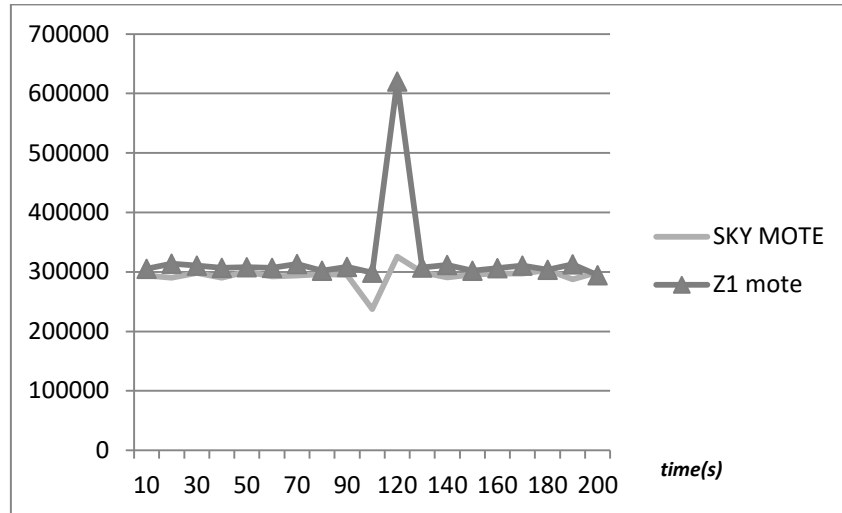


Figure 33: Duty cycle

Sur la base de ces comparaisons, il est clairement visible (figure33) que les moteurs Z1 mote consomment moins d'énergie que Sky mote.

Dans cette application, Skymote consomme plus d'énergie que le mote Z1, mais le rapport cyclique (Duty cycle) du Z1 mote est plus élevé que celui de skymote. Pour cela on va choisir Sky mote qui est le meilleur scénario dans ce cas, car il consomme moins d'énergie pour transmettre et recevoir des messages (rapport cyclique), et c'est ce qui est essentiel pour une télésurveillance continue.

4.3 Résultats de la simulation

Cette section évalue notre application par des simulations. Afin de valider les performances de notre approche, nous avons évalué notre conception sur des réseaux réalistes en utilisant l'environnement Instant Contiki, et en particulier, le simulateur Cooja. Nous avons utilisé Cooja pour étudier la robustesse de notre système dans un scénario où les nœuds capteurs collectent les données en temps réel et les transmettent au nœud central.

Après avoir choisi la plate-forme de simulation basée sur une étude comparative de la consommation d'énergie, nous simulons notre code dans le Skymote. Les résultats de notre simulation sont très prometteurs, les figures suivantes vont montrés les résultats de notre architecture proposée. Dans notre étude de cas, nous utilisons un routeur et 5 capteurs dont 3 capteurs de température (surveiller la température en continu et transmettre les données au nœud central), un capteur pour surveiller la vibration de la machine et un nœud de capteur

central pour collecter toutes les données des quatre autres nœuds. L'architecture globale est représentée dans la figure 34.

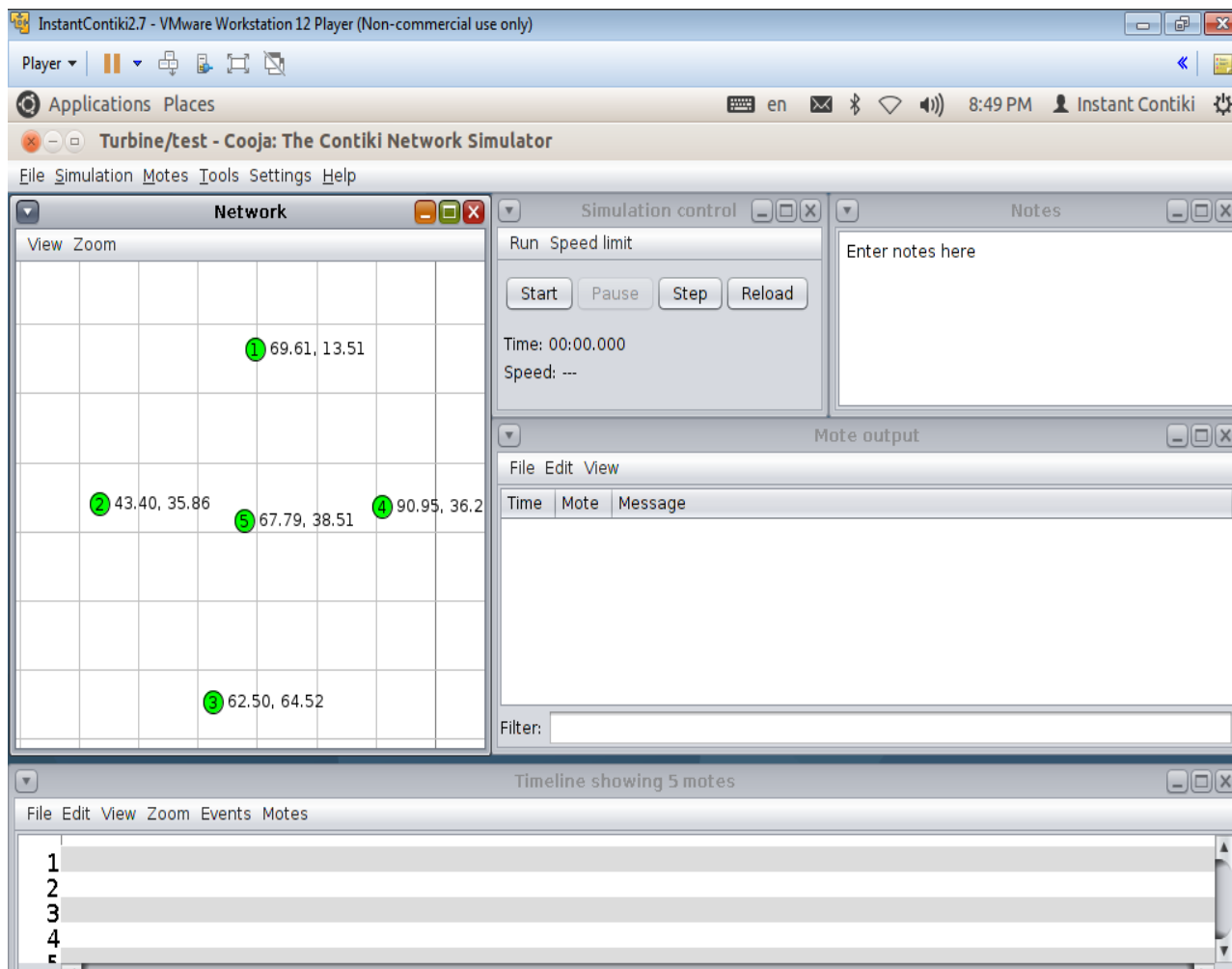


Figure 34: visualisation des capteurs sur Cooja

4.3.1 Communication entre les réseaux des capteurs

La compilation du programme montre que la simulation est exécuté avec succès voir, figure 35. Cette figure montre que l'architecture étoile choisie est programmée avec succès et la communication entre les nœuds est assurée en utilisant le protocole 6lowpan

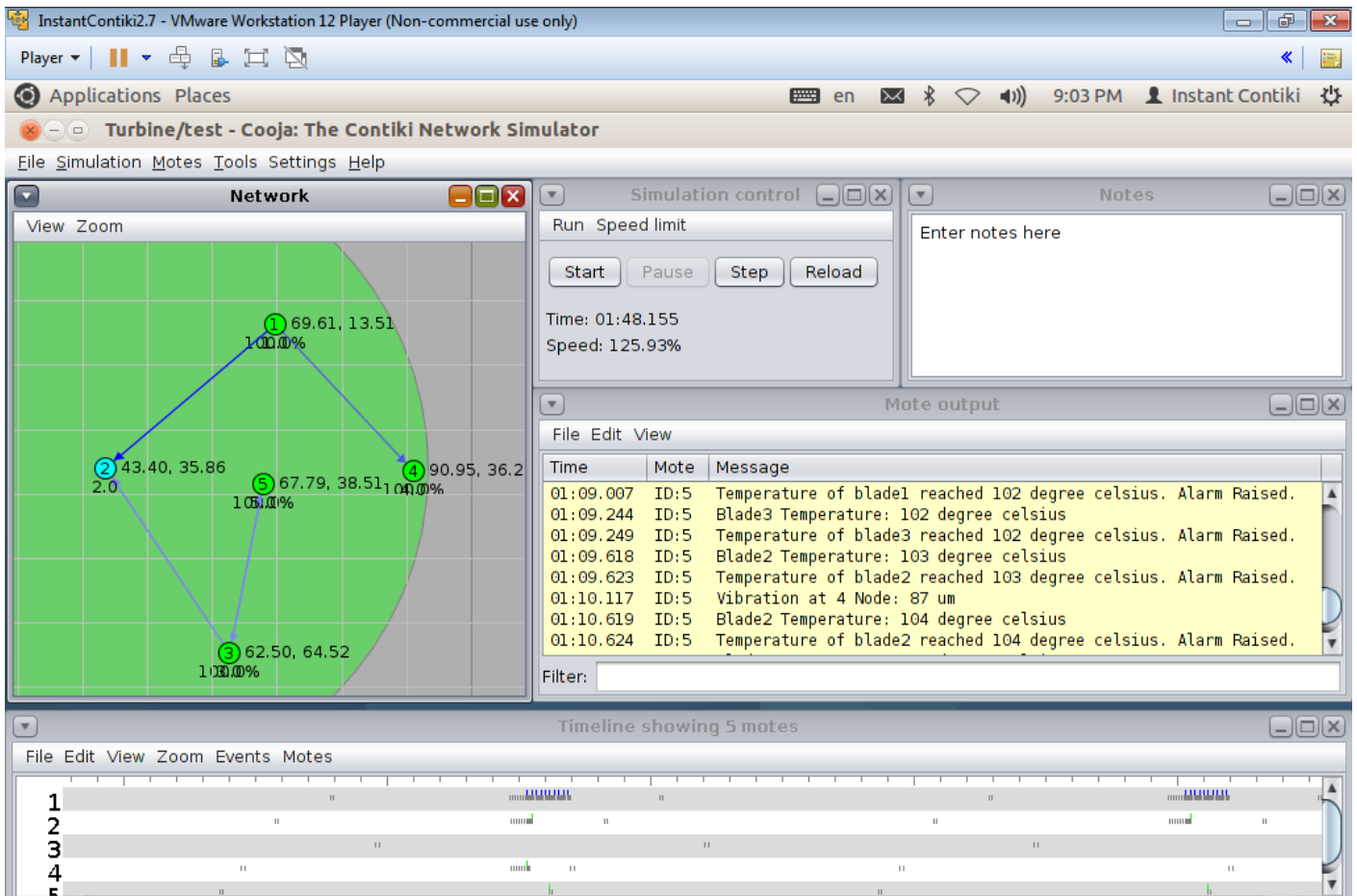


Figure 35: Communication entre les nœuds sur le simulateur Cooja

4.3.2. Transfert des données en temps réel

La figure ci-dessous qui est extraite de la simulation montre les transmissions de données vers le nœud central à partir d'autres nœuds de plus, des points d'alarmes mesurés par les capteurs. Ces données sont envoyées au nœud central. Lorsque la valeur critique de la température qui est de 105 degrés Celsius est atteinte, une alerte est transmise instantanément au centre serveur qui, immédiatement en retour, envoie une notification auprès du staff du service maintenance figure 36. La même chose pour la vibration, la valeur qui aboutit à une alerte est de 10 μm et la valeur d'arrêt est de 20 μm . Les premiers résultats obtenus par simulation à l'aide du simulateur Cooja sont satisfaisants.

Si le responsable du contrôle commet des erreurs ou oublie de prendre des mesures immédiates en cas d'urgence, le nœud central peut prendre les décisions d'urgence et arrêter l'ensemble du système. À travers cette étape, nous pouvons réaliser l'automatisation intelligente de cette application et assurer la sécurité qui peut empêcher les défaillances du système. Cette opération est assurée grâce à la fonction «Abort». Cette commande est la deuxième ligne de mesure de sécurité qui sera assurée automatiquement. Elle permet

d'effectuer l'arrêt de l'exécution du programme de façon brusque lorsqu'une situation anormale est survenue, le nœud capteur envoie un message à la station de base qui peut automatiquement couper le courant. On utilisera donc cette fonction uniquement pour des situations critiques.

The screenshot shows a VMware Workstation 12 Player window titled 'InstantContiki2.7 - VMware Workstation 12 Player (Non-commercial use only)'. Inside, the 'Cooja: The Contiki Network Simulator' application is running. The 'Mote output' window is open, displaying a log of messages from various nodes (ID:1, 2, 3, 4, 5) over time. The messages include initialization steps, MAC addresses, channel checks, and sensor readings (temperature and vibration). Some messages indicate alarm conditions (e.g., 'Alarm Raised') and one indicates a 'Central node Shutting Down'.

Time	Mote	Message
00:00.499	ID:2	Rime started with address 2.0
00:00.507	ID:2	MAC 02:00:00:00:00:00 Contiki-2.6-900-ga6227e1 started. Node id is set to 2.
00:00.517	ID:2	CSMA ContikiMAC, channel check rate 8 Hz, radio channel 65491
00:00.519	ID:2	Starting 'Temperature unicast'
00:00.611	ID:4	Rime started with address 4.0
00:00.619	ID:4	MAC 04:00:00:00:00:00 Contiki-2.6-900-ga6227e1 started. Node id is set to 4.
00:00.629	ID:4	CSMA ContikiMAC, channel check rate 8 Hz, radio channel 65491
00:00.631	ID:4	Starting 'Temperature unicast'
00:00.645	ID:1	Rime started with address 1.0
00:00.653	ID:1	MAC 01:00:00:00:00:00 Contiki-2.6-900-ga6227e1 started. Node id is set to 1.
00:00.663	ID:1	CSMA ContikiMAC, channel check rate 8 Hz, radio channel 65491
00:00.665	ID:1	Starting 'Temperature unicast'
01:09.007	ID:5	Temperature of blade1 reached 102 degree celsius. Alarm Raised.
01:09.244	ID:5	Blade3 Temperature: 102 degree celsius
01:09.249	ID:5	Temperature of blade3 reached 102 degree celsius. Alarm Raised.
01:09.618	ID:5	Blade2 Temperature: 103 degree celsius
01:09.623	ID:5	Temperature of blade2 reached 103 degree celsius. Alarm Raised.
01:10.117	ID:5	Vibration at 4 Node: 87 um
01:10.619	ID:5	Blade2 Temperature: 104 degree celsius
01:10.624	ID:5	Temperature of blade2 reached 104 degree celsius. Alarm Raised.
01:10.743	ID:5	Blade3 Temperature: 103 degree celsius
01:10.748	ID:5	Temperature of blade3 reached 103 degree celsius. Alarm Raised.
01:11.244	ID:5	Blade3 Temperature: 104 degree celsius
01:11.249	ID:5	Temperature of blade3 reached 104 degree celsius. Alarm Raised.
01:11.534	ID:2	183894 2142507 16724 50026 25392 302264 1818 6588
01:11.618	ID:5	Blade1 Temperature: 103 degree celsius
01:11.622	ID:5	Temperature of blade1 reached 103 degree celsius. Alarm Raised.
01:11.627	ID:5	Blade1 Temperature: 104 degree celsius
01:11.631	ID:5	Temperature of blade1 reached 104 degree celsius. Alarm Raised.
01:11.646	ID:4	275006 2051311 37553 80675 38826 288823 5484 11536
01:11.679	ID:1	240243 2086107 34377 76089 29892 297758 2740 8332
01:12.009	ID:5	128397 2197834 0 39591 21038 306591 0 7298
01:12.118	ID:5	Blade2 Temperature: 105 degree celsius
01:12.123	ID:5	Temperature of blade2 reached 105 degree celsius. Alarm Raised.
01:12.128	ID:5	Temperature of blade2 reached 105 degree celsius. Central node Shutting Down.
01:12.198	ID:3	191494 2134920 17911 53039 26212 301444 2725 7295
01:21.534	ID:2	208658 2445404 18134 56063 24760 302897 1410 6037
01:21.646	ID:4	319653 2334309 43796 93891 44643 282998 6243 13216
01:21.679	ID:1	279208 2374788 40159 88341 38961 288681 5782 12252
01:22.009	ID:5	142559 2511308 0 45217 14158 313474 0 5626
01:22.198	ID:3	220692 2433377 20832 61089 29194 298457 2921 8050

Figure 36:messages envoyés par les capteurs (valeurs normales, valeurs alarmées et valeurs d'arrêt)

5 CONCLUSION

Ce travail consolidera le savoir-faire des industriels et des prestataires de services maintenance dans la mise en œuvre d'un système de capteurs intelligents au niveau de la maintenance conditionnelle pour la télésurveillance en temps réel des équipements industriels. La chose qui a été prouvée par cette enquête (Ramadany & Amegouz 2017a), plus de 90% des industriels estiment qu'il existe un réel besoin d'un système de surveillance à distance et que la mise en œuvre de ce dernier a un impact majeur sur le développement durable des entreprises marocaines. Ceci permettra de migrer vers une maintenance intelligente, et par conséquent vers l'ère de l'industrie 4.0.

À l'aide de l'environnement Instant Contiki. Nous avons validé notre application RCSF développée dans une centrale thermique pour la télésurveillance. A cet égard, cette simulation nous a permis d'étudier la robustesse de notre système dans un scénario où les capteurs collectent les données en temps réel et les transmettent au nœud central. Chaque fois que les capteurs détectent les valeurs de seuil ou une anomalie, ils envoient des alarmes aux utilisateurs ou ils arrêtent la machine automatiquement en cas d'urgence, afin d'éviter les problèmes fatals qui entraînerait des temps d'arrêt ou des dommages au système.

**CHAPITRE IV: IMPACT DU COUT DES RESEAUX
DE CAPTEUR INTELLIGENT SUR LE CHOIX DE
LA POLITIQUE DE MAINTENANCE
CONDITIONNELLE**

1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons mettre le point sur l'aspect économique afin d'étudier l'impact des capteurs intelligents sur le coût et la fiabilité de la maintenance conditionnelle. La méthode que nous allons utiliser est basée sur le coût par unité de temps pour montrer comment un ensemble de paramètres ont un impact sur le coût de la maintenance. Nous nous sommes basés sur une simulation pour pouvoir comparer l'impact économique des deux politiques de maintenance à savoir: la maintenance corrective et la maintenance conditionnelle en utilisant les réseaux de capteurs intelligents. En effet, cette dernière permet de comparer le coût de remplacement d'un composant avant, et après, sa défaillance à l'aide des capteurs intelligents. L'objectif est de prendre la décision quant au fait d'investir dans cette technologie pour assurer une maintenance préventive intelligente du composant. En outre, avec cette approche proposée, le décideur pourrait être en mesure de décider dans un cadre économique le choix optimal le plus approprié, en prenant en compte de deux paramètres décisifs qui sont les coûts de défaillance et le coût de réseaux de capteurs intelligents. Cette étude aidera les entreprises à prendre une décision lorsqu'elles envisagent de mettre en place une surveillance à distance. Pour illustrer l'utilisation et les avantages de la politique de maintenance proposée, un exemple numérique est présenté pour illustrer notre modèle.

1.2 Aperçu sur les coûts de la maintenance

Dans la littérature on trouve des chercheurs scientifiques internationaux qui ont étudié de manière approfondie la maintenance conditionnelle, en particulier l'approche d'optimisation de la maintenance conditionnelle basée sur le modèle de risques proportionnels (PHM), pour analyser la fiabilité qui prend en compte les données de surveillance des conditions pour estimer la durée de vie (Zhang et al. 2014) et déterminer la politique de remplacement optimale (Makis et al. 2006) (Lin & Tseng 2005). L'objectif principal de ces études est d'optimiser la fiabilité des équipements et de minimiser le coût total moyen des actions de maintenance sur un horizon temporel (Tian et al. 2012) (Zhou et al. 2007), cependant, il est important de noter que la simulation des coûts de maintenance conditionnelle à l'aide de réseaux de capteurs intelligents n'a pas été envisagée dans le cadre d'une structure de maintenance. En regardant le tableau 3, où une brève revue de la littérature de la dernière décennie sur la simulation du coût de la maintenance est présentée, le manque de contributions pour l'utilisation du réseau de capteurs intelligent est clair, la plupart des auteurs

simulent le coût prévu de la maintenance à l'aide de différents facteurs comme: la détermination du seuil de dégradation du système, la fiabilité, la durée de l'inspection ... (Tableau 5), cependant l'intégration du critère de coût des capteurs notamment le coût des capteurs intelligents est non traité, Par conséquent, l'objectif de cette recherche est de faire une simulation pour étudier l'impact du capteur intelligent sur le coût et la fiabilité de la maintenance conditionnelle. Notre contribution dans ce travail consiste à présenter un modèle quantitatif de coût pour la prise de décision entre deux politiques de la maintenance : la maintenance conditionnelle et la maintenance non programmée traditionnelle. Le coût optimal d'un capteur intelligent est déterminé dans le but de minimiser le coût de maintenance prévu, afin de déterminer la limite de coût des capteurs intelligents qui rendent la maintenance conditionnelle avec les nouvelles technologies plus pratique que la maintenance traditionnelle.

Chapitre 4: Impact du coût des réseaux de capteurs intelligents sur le choix de la politique de maintenance conditionnelle

Auteurs	méthode de recherche	maint policie		Technologie utilisée			Paramètre utilisée pour simulation du cout				Modèle de Dégradation			
		Prédicitive	CBM	MO	SS	INS	Reliability	PM cycle	IP	TSD	Spair parts Sensors Cost	weibull	Gamma	Exponenti al
Antoine Grall, Laurence Dieulle(Grall et al. 2002)	regenerative and semi-regenerative processes	*				*				*	*			*
PJ Vlok, JL Coetzee, D Banjevic(Vlok et al. 2002)	optimisation avec EXAKT		*			*			*				PHM	
Xiaojun Zhou, , Lifeng Xiaie(Zhou et al. 2007)	simulation basée sur l' UEC		*			*		*	*				PHM	
Alaa H. Elwany , Nagi Z. Gebraeel(Elwany & Gebraeel 2008)	Physical condition		*			*			*		*			RLD
Kevin A. Kaiser and Nagi Z. Gebraeel(Kevin A Kaiser & Gebraeel 2009)	simulation model	*				*		*						RLD
Hamid Reza Golmakani, Fahimeh Fattahipour(Golmakani & Fattahipour 2011)	simulation study based on inspection cost		*			*				*			PHM	
Zhigang Tian, Daming Lin, Bairong Wu(Tian et al. 2012)	physical programming		*			*		*					PHM	
Phuc DO VAN, Eric LEVRAT, Alexandre VOISIN (Do Van et al. 2012)	Stochastic Monte Carlo simulation		*	*		*				*	*			RUL
Li Yang, Xiaobing Ma , Yu Zhao(Yang et al. 2017)	single-unit system with: degradation-based and shock-based failure		*			*			*	*		*		

RUL:Remining useful life, **PHM:** Proportional Hazard Model, **RLD:**Residual Life Distribution, **CBM:** Condition Based Maintenance , **MO:** Maintenance Opportunities, **SS:** Simple Sensors, **INS:** Intelligent Network Sensors, **IP:**Inspection Period , **TSD:** threshold for the system degradation.

Tableau 7: état d'art sur les coûts de la maintenance

2 DESCRIPTION DU MODÈLE ET HYPOTHÈSE

2.1 Formulation du modèle de maintenance

Nous introduisons la fonction du coût de maintenance, en utilisant les principaux coûts directs et indirects de maintenance, de sorte que le coût moyen de la maintenance conditionnelle et la maintenance corrective en cas de défaillance se présente comme suit:

- Coût des pièces de rechange,
- Coût des employés,
- Coût de non production lors des interventions de la maintenance corrective,
- Coût de la perte de production,
- Coûts liés aux retards non retenus: pénalité pour retard, perte de clientèle ou dégradation de l'image de marque

2.1.1 Le coût de la maintenance corrective:

Le coût de la maintenance corrective est composé des coûts directs et indirects, il est donc écrit comme suit:

$$C_{Pr} = C_D + C_I \quad (3)$$

C_D : Coût de maintenance direct

C_I : Coût de maintenance indirect

- **Coût de maintenance direct :**

$$C_D = C_{SP+M} + C_L + C_{fc} \quad (4)$$

C_{SP+M} : Coût des pièces de rechange et du matériel,

C_L : Coût de la main d'œuvre, $C_L = \sum_{i=1}^n T_i \times N_i$,

Avec:

T_i : Le taux horaire correspondant aux techniciens exécutant l'action i, l'unité est l'euro,

N_i : Le nombre de techniciens effectuant l'action i,

C_{fc} : Coût des charges fixe

▪ **Coût indirect de la maintenance:**

$$C_I = C_{LP} + C_{\text{late penalty}} \quad (3)$$

C_{LP} : Coût de la non production, il est égal à $C_{LP} = Q \times DT + C_{\text{unutilized labor}}$

Q: Taux horaire exprimé en euros / heure

DT: Temps d'arrêt

$C_{\text{unutilized labor}}$: Coût de la main d'œuvre non utilisée = $DT \times T_j$

T_j : Le taux horaire correspondant à l'opérateur effectuant l'action j

$C_{\text{late penalty}}$: Coût de pénalité

Le coût analytique de la maintenance en cas de défaillance est la somme de ces coûts directs et indirects:

$$C_{cr} = C_D + C_I = C_{SP+M} + C_L + C_{fc} + Q \times DT + C_{\text{late penalty}} + DT \times T_j$$

$$C_{cr} = \underbrace{C_{SP+M} + C_L}_{\text{Coût de remplacement}} + \underbrace{C_{fc} + \alpha_{cr}DT \times (Q + T_j)}_{\text{Coût de défaillance}} + \underbrace{C_{\text{late penalty}}}_{\text{Coût induit}} \quad (5)$$

Le coefficient α_{cr} , dépend du temps de l'intervention, si l'action prend du temps partiellement ou totalement au cours des heures de la production, il peut être compris entre 0 et 1. En fait, en cas d'actions de maintenance planifiées, les pertes de production sont minimisées voir évitées parce que l'opération est effectuée dans une période de non-production.

2.1.2 Coût de la maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle inclut un autre coût, celui des réseaux de capteurs intelligents pour la surveillance des équipements. Par conséquent, le coût moyen de la maintenance conditionnelle est le suivant:

$$C_c = \underbrace{C_{SP+M} + C_L}_{\text{Coût de remplacement}} + \underbrace{C_{fc} + \alpha_{prd}DT \times (Q + T_j)}_{\text{Coût de défaillance}} + \underbrace{C_{\text{Sensor}}}_{\text{K: Coût des capteurs}} \quad (6)$$

Le coefficient α_{prd} dans la maintenance conditionnelle sera égal à 0 car nous supposons que les interventions sont effectuées en dehors de la période d'exploitation, par exemple la nuit ou les jours non travaillés, comme le weekend.

3 MODELISATION DE LA FIABILITE BASEE SUR LES PREVISIONS

L'avancement de la politique de maintenance conditionnelle permet d'obtenir le moment exact de la maintenance en calculant la fiabilité dynamique (Kevin A Kaiser & Gebraeel 2009); ce type de maintenance est effectuée chaque fois que la fiabilité du système atteint un seuil déterminé (Grall et al. 2002). Ce seuil peut être déterminé à partir des données acquises par les capteurs qui peuvent être utilisés pour estimer la répartition des défaillances et la durée de vie résiduelle (Kevin A. Kaiser & Gebraeel 2009). L'objectif est de réduire le coût moyen à long terme par unité de temps (Vlok et al. 2002). (Jardine et al. 1999) décrit une étude de cas dans laquelle le modèle à risques proportionnels de Weibull est utilisé pour déterminer la politique de remplacement optimale d'un élément critique soumis à une surveillance des vibrations, il a utilisé le logiciel EXAKT* qui aide à optimiser le modèle à risques proportionnels de Weibull.

(*): EXAKT est un logiciel d'optimisation de la maintenance en fonction des conditions mis au point par le laboratoire CBM de l'Université de Toronto. Le logiciel utilise des informations historiques basées sur l'âge ainsi que des mesures de surveillance des conditions pour parvenir à une solution optimale aux remplacements de composants (Jardine et al. 1999)(Kevin A. Kaiser & Gebraeel 2009).

3.1 Modélisation de la fiabilité

La fiabilité de la machine consiste à quantifier dans le temps ce qui constitue une variable aléatoire car de nombreux modèles de défaillance ont été proposés pour modéliser les défaillances de dégradation, tels que la loi de l'exponentiel, la loi de poisson, la loi de log-normal et la loi de weibull. La loi de weibull est la plus utilisée en raison de sa flexibilité et de ses résultats, elle est très appropriée pour étudier la durée de vie d'un système avec différentes fonctions comme le taux de défaillance, la densité de probabilité et la fiabilité d'une distribution de Weibull. Ces fonctions sont définies comme suit:

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} * \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right] \quad (7)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right] \quad (8)$$

Où β est le paramètre de forme, θ est le paramètre d'échelle. L'estimation de ces paramètres peut être réalisée à partir des données empiriques acquises ou à partir des données issues des capteurs, en utilisant la distribution de Weibull.

Dans notre cas, les systèmes de capteurs intelligents fonctionnent dans un environnement dynamique. La détérioration est causée par plusieurs facteurs appelés covariables (température, vibration, vitesse de rotation, etc.) qui changent de manière stochastique et impactent sur la durée de vie du composant. Pour ces systèmes, le modèle de risque proportionnel (PHM), spécialement weibull PHM est une bonne approche qui prend en compte à la fois les valeurs d'âge et les conditions d'un ensemble de variables de diagnostic pour estimer la probabilité de défaillance, l'équation 8 décrit la fonction du taux de défaillance.

$$h(t, Z(t)) = \frac{\beta}{\theta} * \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left\{\sum_{i=1}^m \gamma_i z_i(t)\right\} \quad (8)$$

Où $\frac{\beta}{\theta} * \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$ est la fonction de risque de base qui prend en compte l'âge de l'équipement, compte tenu des valeurs des paramètres β et θ . La deuxième partie, $\exp\{\gamma_1 z_1(t) + \gamma_2 z_2(t) + \dots + \gamma_m z_m(t)\}$ prend en compte les covariables qui peuvent être considérées comme des facteurs clés reflétant l'état de santé des équipements. La relation entre la fiabilité et la fonction de risque est présentée dans (Eq. (9)) et $\int_0^T h(t)dt$ est le risque de défaillance cumulative dans le cycle de maintenance

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^T h(t)dt\right] \quad (9)$$

4 FORMULATION ET OPTIMISATION DU MODELE DE MAINTENANCE

La maintenance centrée sur la fiabilité ou Reliability Centered Maintenance est une méthode systématique pour maintenir un équilibre entre maintenance préventive et corrective. Cette méthode permet de choisir les bonnes activités de maintenance préventive pour le bon composant au bon moment afin d'atteindre la solution la plus rentable. Deux types de politique de maintenance sont considérés dans cette comparaison. Le premier est la maintenance conditionnelle à l'aide des réseaux de capteurs intelligents, qui est effectuée chaque fois que la fiabilité du système atteint le seuil R . Le second est la maintenance non planifiée. Une seule stratégie de maintenance peut être mise en œuvre dans un horizon et les deux types de maintenance rendent l'unité telle qu'elle est nouvelle.

L'objectif de ce travail est de détailler la décision économique afin de mettre en œuvre une maintenance conditionnelle à l'aide de capteurs intelligents. Ce travail a été comblé par cette étude qui quantifie les coûts et les effets entre une maintenance corrective et d'une maintenance conditionnelle. En effet, la maintenance corrective peut être très coûteuse en raison des inconvénients suivants : moins d'efficacité, moins de productivité, plus de risques de l'insécurité. Par contre, la maintenance conditionnelle peut être rentable car elle permet d'éviter les défaillances, et maintenir la disponibilité et la sécurité du système. Mais cela n'empêche que cette dernière représente des coûts supplémentaires vu la nécessité d'utilisation des outils de surveillance. La formulation utilisée pour analyser le coût moyen de maintenance conditionnelle par unité de temps est donnée par le coût de remplacement à long terme prévu, basé sur le modèle de Cox (équation (10)); notre modèle ajoute un autre paramètre de décision qui est le coût des réseaux de capteurs K (Eq. (11)). Celui-ci n'était pas considéré dans la littérature auparavant (Zhou et al. 2007)(Tian et al. 2012)(Elwany & Gebraeel 2008)(Khoury et al. 2012).

Le coût unitaire prévu de la maintenance conditionnelle et le cout de la maintenance corrective sont présentés respectivement dans (Eq. (10)) et (Eq. (11)).

$$UEC_c(t_p) = \frac{C_c R(t_p) + C_{cr} [1 - R(t_p)]}{\int_0^{t_p} R(s) ds} \quad (10)$$

$$UEC_c(t_p, K) = \frac{(C_c + K) R(t_p) + C_{cr} [1 - R(t_p)]}{t_p} \quad (11)$$

Avec :

- $R(t_p)$ est le seuil de fiabilité pour la maintenance conditionnelle.
- t_p est le remplacement temporel de la maintenance conditionnelle.
- C_c est le coût moyen de maintenance conditionnelle.
- C_{cr} est le coût moyen de la maintenance corrective.
- K est le coût du capteur.

Le numérateur de cette équation est égal au coût total attendu par cycle et le dénominateur à la longueur de cycle attendue.

$$UEC_{cr}(t, DT) = \frac{C_{cr}(DT)}{MTTF(t)} \quad (12)$$

Avec :

- C_{cr} est le coût moyen de la maintenance corrective.
- MTTF est le délai moyen de défaillance, étant donné que la défaillance est survenue avant l'heure t_p , également appelée délai prévu avant défaillance, ou durée de vie moyenne.

$$MTTF = \int_0^{t_p} tf(t)dt \quad (13)$$

4.1 Hypothèses

Le modèle de stratégie de maintenance conditionnelle est conçu pour estimer le coût total moyen du système sur un horizon temporel donné; nous supposons que les hypothèses suivantes sont satisfaites:

- le système est surveillé en permanence; il est déclenché lorsqu'il atteint le seuil R (système d'alarme)
- Le réseau de capteurs intelligents fonctionne bien, il n'influence pas sur la fiabilité du système
- La fiabilité est une fonction connue et les paramètres de la fonction de risque sont connus
- Les défaillances sont détectées instantanément

4.2 Cadre quantitatif pour choisir la politique de maintenance

La contribution de ce travail consiste à comparer la maintenance conditionnelle basée sur des réseaux de capteurs sans fil innovants et la maintenance corrective qui est considérée comme la politique la plus adoptée (Ramadany & Amegouz 2017b) par de nombreuses entreprises, l'objectif est de déterminer une politique de maintenance qui optimise les performances du système en fonction de certains critères, tels que l'optimisation de la fonction de fiabilité, temps d'arrêt, perte de production, perte de qualité ou réduction des coûts totaux prévus par unité de temps. Ces critères sont définis en fonction de certaines variables, notamment le type de système de production, la politique de production et l'influence de l'équipement. L'application de la maintenance corrective est souvent la meilleure solution lorsque la défaillance survient de manière aléatoire et que le coût de la perte de production jusqu'à ce que le matériel soit rétabli ne dépasse pas le coût de la maintenance conditionnelle. La maintenance conditionnelle est utile lorsque les équipements sont critiques. Ce schéma de

positionnement, figure36, introduit le concept dans un service de maintenance pour déterminer la prévision de la durée de vie et choisir la stratégie de maintenance en prenant en compte le critère du coût.

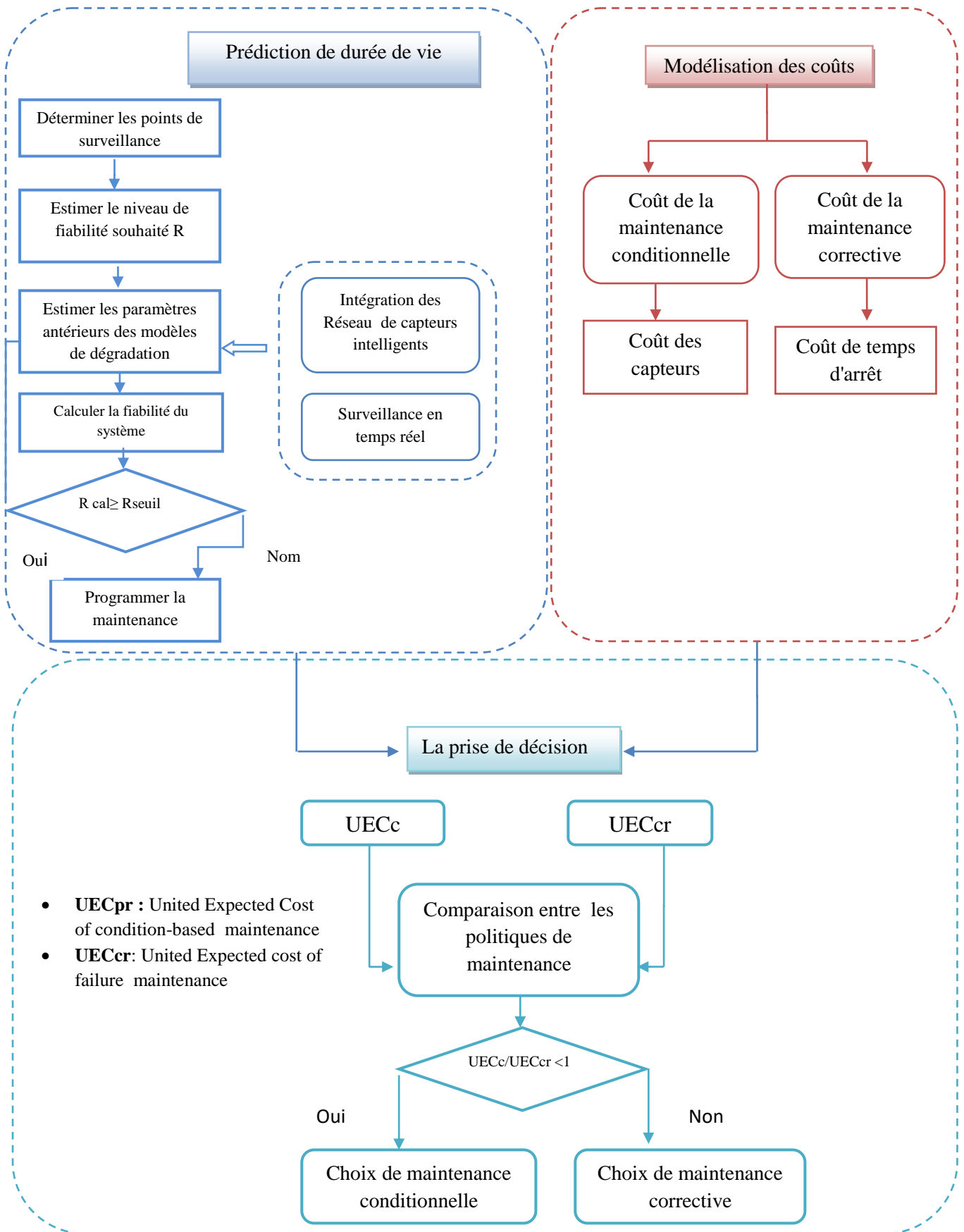


Figure 37: Cadre du modèle décisionnel proposé

4.3 Analyse financière

Afin de choisir le type de maintenance qui sera mis en œuvre en tenant compte de critères économiques, la comparaison du coût moyen par unité de temps est obtenue en calculant le ratio suivant :

$$e = \frac{UEC_c}{UEC_{cr}} \quad (14)$$

- Si $UEC_c / UEC_{cr} = 1$, les deux types de maintenance sont affichés dans une seule mesure.
- Si $UEC_c / UEC_{cr} < 1$, l'application de maintenance conditionnelle est justifiée.
- Si $UEC_c / UEC_{cr} > 1$, l'application de maintenance corrective est justifiée.

5 EXEMPLE NUMÉRIQUE

La décision optimisée est traitée par simulation numérique, en considérant un cycle de détérioration individuel dans lequel son comportement de dégradation est décrit par un processus de Weibull avec le paramètre d'échelle $\alpha = 100$ et le paramètre de forme $\beta = 2,3$, les paramètres de coût (C_{rep} , Q , T , $C_{late\ penalty}$) sont déterminés par le responsable du service maintenance et de la production. $C_{SP+M} = 150$, $C_L = 50$, $C_{fc} = 20$, $Q = 35$, $T = 10$, $C_{late\ penalty} = 1000$, $\alpha_{cr} = 1,2$, $DT = 10$.

Selon l'hypothèse, la fonction du taux de risque de Weibull est la suivante $h(t) = \frac{\beta}{\theta} * \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$. Il peut être utilisé pour un processus d'échantillonnage dans la maintenance pour l'analyse de données de fiabilité et pour déterminer le cycle de maintenance conditionnelle. La figure 34 montre la fiabilité du système en termes de temps t_p , comme illustré à la figure 34. On peut constater que, dans les paramètres actuels, la fiabilité devient proche de 0 à t_p égal à 95 heures.

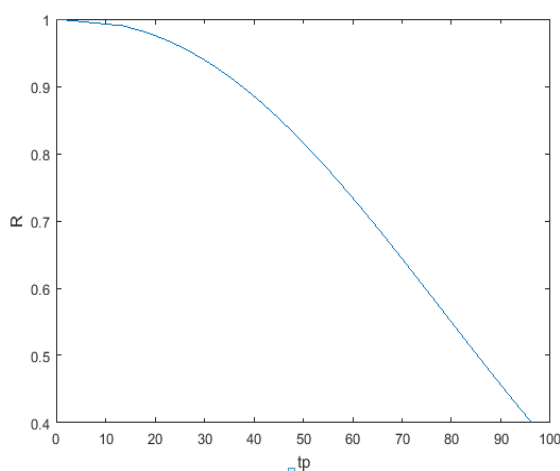


Figure 38: Variation de la fiabilité en fonction du temps

Les fourchettes supposées de fiabilité et de coût des capteurs sont estimées respectivement, $R \in [0,4-1]$ avec un pas de 0,01 et $K \in [50-300]$ avec un pas de 30. Le tableau 4 présente le résultat de la simulation utilisant (Eq. (11)), la valeur optimale de R permettant de minimiser le coût unitaire escompté en cas de maintenance prédictive est de $R = 0,84$ avec une valeur minimale de K , les résultats obtenus sont également esquissés à la figure 35, qui présente le coût escompté unifié fonction de R pour diverses valeurs de capteurs de coût.

R/UEC _c /K	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
0,8	10,2509	10,7116	11,172	11,6331	12,0938	12,5545	13,0152	13,476	13,9367	14,3974
0,81	10,23	10,7082	11,1864	11,6647	12,1429	12,6212	13,0994	13,5776	14,0559	14,5341
0,82	10,2135	10,7104	11,2073	11,7043	12,2012	12,6982	13,1951	13,692	14,189	14,6859
0,83	10,2024	10,7194	11,2363	11,7533	12,2703	12,7873	13,3042	13,8212	14,3382238	14,8551
0,84	10,1979	10,7364	11,275	11,8135	12,352	12,8906	13,4291	13,9677	14,506235	15,0447
0,85	10,2015	10,7634	11,3252	11,8871	12,4489	13,0108	13,5726	14,1345	14,6964	15,2582
0,86	10,215	10,8022	11,3895	11,9767	12,5639	13,1512	13,7384	14,3256	14,9128	15,5001
0,87	10,2408	10,8558	11,4708	12,0859	12,7009	13,3159	13,9309	14,5459	15,1609	15,776
0,88	10,282	10,9276	11,5733	12,219	12,8647	13,5104	14,1561	14,8017	15,4474	16,0931
0,89	10,3426	11,0224	11,7022	12,3821	13,0619	13,7417	14,4216	15,1014	15,7812	16,4611
0,9	10,4281	11,1464	11,8647	12,5829	13,3012	14,0195	14,7377	15,456	16,1743	16,8925
0,91	10,5464	11,3085	12,0705	12,8326	13,5947	14,3568	15,1189	15,881	16,6431	17,4052
0,92	10,7083	11,5212	12,334	13,1469	13,9597	14,7726	15,5854	16,3983	17,2111	18,024
0,93	10,9306	11,8034	12,6762	13,549	14,4218	15,2947	16,1675	17,0403	17,9131	18,7859
0,94	11,239	12,1846	13,1301	14,0756	15,0212	15,9667	16,9122	17,8578	18,8033	19,7488
0,95	11,6774	12,7142	13,751	14,7878	15,8245	16,8613	17,8981	18,9349	19,9717	21,0085
0,96	12,3257	13,4828	14,6398	15,7969	16,9539	18,111	19,268	20,4251	21,5821	22,7392

0,97 13,3514 14,6792 16,007 17,3349 18,6627 19,9906 21,3184 22,6462 23,9741 25,3019

Tableau 8: résultats de simulation du coût unitaire prévu de la maintenance conditionnelle

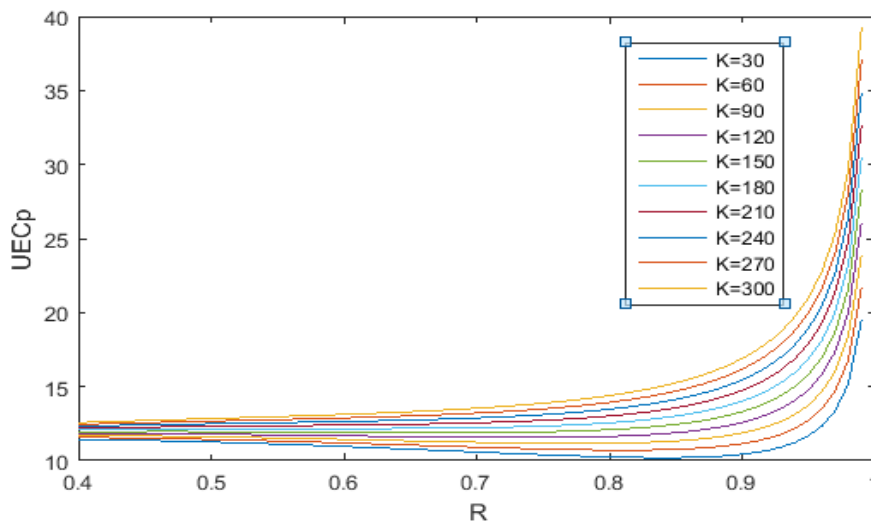


Figure 39: Effet de la fiabilité sur le coût de la maintenance conditionnelle

La figure 40 montre que la forme des courbes de coûts présente certaines similitudes. Lorsque $K < 90$, le coût unitaire escompté est une fonction convexe, ce qui signifie qu'il existe un coût minimum garantissant l'existence d'une solution optimale, mais lorsque le coût du capteur augmente le coût unitaire escompté augmente avec la fiabilité (figure 35). Cela implique de maintenir une fiabilité plus élevée pour les équipements de production, il est préférable d'augmenter le nombre de capteurs.

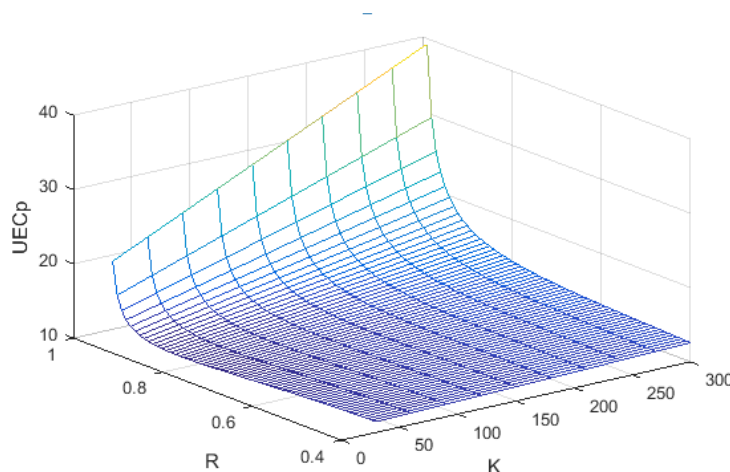


Figure 40: coût unitaire attendu en fonction de la fiabilité et du coût des capteurs

Le tableau 5 indique les autres simulations utiles. Le temps attendu de l'unité est évalué avec une valeur différente du temps d'immobilisation qui augmente le coût de la défaillance. DT prend les valeurs de 1 à 29 avec la taille de pas 4. Il est clair que ce paramètre de coût a un

impact significatif sur le coût de maintenance. C'est pourquoi il est utile de fournir une surveillance élevée du système de production critique afin de réduire le temps d'immobilisation des équipements afin de réduire les risques de panne et les coûts de maintenance.

R	K	DT	UEC _c
0.85	100	1	10,1740096
0.85	100	5	10,7689165
0.85	100	9	11,3638234
0.85	100	13	11,9587303
0.85	100	17	12,5536372
0.85	100	21	13,148544
0.85	100	25	13,7434509
0.85	100	29	14,3383578

Tableau 9: Résultats de la simulation de l'impact des temps d'arrêt sur le coût unitaire prévu

L'optimisation suivante est effectuée par le biais d'une étude de simulation afin de comparer le moment où le coût de remplacement d'un composant avant sa défaillance à l'aide de capteurs intelligents est inférieur au coût de remplacement du composant après une défaillance. Selon les résultats des calculs obtenus par le solveur MATLAB. La figure 38 présente la relation entre le seuil de fiabilité et le coût global; elle montre l'évolution des quatre seuils de fiabilité lorsque différentes valeurs du coût des capteurs et du temps de défaillance sont pris en compte. La zone rouge indique que la maintenance en cas corrective est plus coûteuse et que la politique de maintenance conditionnelle est justifiée, et la zone bleue indique que la maintenance conditionnelle est coûteuse et que la politique de maintenance en cas de défaillance est justifiée.

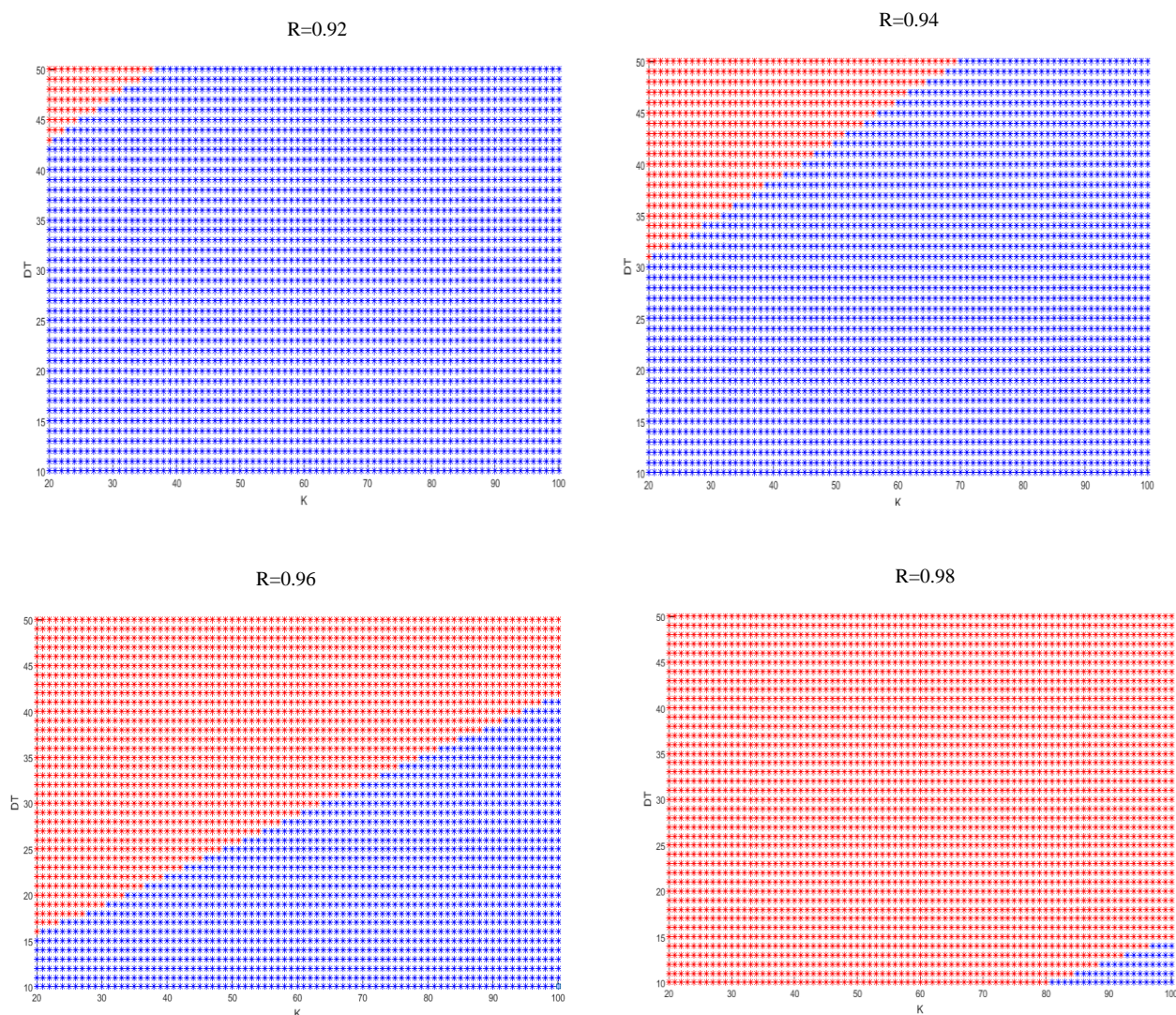


Figure 41: Comparisons des coûts B=2,3

Il ressort clairement de ces comparaisons que la stratégie de maintenance conditionnelle peuvent réduire les coûts de maintenance par rapport à la maintenance non planifiée lorsque le système nécessite un niveau de fiabilité élevée $R = 0,98$. L'idée est d'implémenter les capteurs du réseau intelligent dans des composants qui nécessitent une fiabilité accrue afin d'équilibrer les coûts et les performances en améliorant les priorités de maintenance et lorsque le système n'est pas critique et nécessite une fiabilité faible, la maintenance corrective est plus justifiée.

6 CONCLUSION

Ce travail a présenté certains défis associés à l'utilisation de réseaux de capteurs intelligents pour simuler l'impact des coûts du capteur intelligent de maintenance conditionnelle et la fiabilité. Les méthodes sont basées sur le coût par unité de temps pour montrer comment différents paramètres ont un impact sur le coût de la maintenance et nous avons décrit un cadre quantitatif pour guider les preneurs de décisions vers le bon choix entre une politique de maintenance conditionnelle intelligente ou une maintenance traditionnelle.

Conclusions et perspectives

Conclusion générale

L'objectif primordial de la présente thèse a été particulièrement centré autour de l'amélioration de la productivité, la durabilité et la compétitivité de l'industrie manufacturière grâce à l'amélioration de la disponibilité via l'intégration des nouvelles technologies pour la surveillance des équipements de production.

À travers cette thèse, nous avons traité dans le premier chapitre, les notions de la migration des stratégies de la maintenance, allant des stratégies traditionnelles aux stratégies intelligentes. Nous avons présenté les nouvelles technologies de réseaux de capteurs intelligents pour le support de cette problématique. Par la suite, nous avons présenté un état des lieux sur les différents domaines d'application des RCSF en mettant l'accent sur leurs utilisations dans le domaine industriel, leurs intégration dans la surveillance des équipements de production et leurs impacts sur l'amélioration de la performance industrielle, tout en présentant les différents travaux de maintenance moderne et intelligent.

Dans ce sens, nous avons cherché à cerner au mieux les applications intelligentes de la maintenance industrielle via la présentation de quelques normes et plateformes importantes fondus sur les systèmes d'information intégrale et liées à la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle.

Nous avons également conçu une plate-forme de télésurveillance industrielle. Cette dernière consolidera le savoir-faire des industriels et des prestataires de services maintenance.

Cette conception est suivie par une phase de modélisation des fonctions de notre plateforme de télésurveillance à base de capteurs intelligents à l'aide du langage UML.

Dans le même cadre et pour répondre à l'application de notre plateforme, nous avons proposé une démarche générique sur les différentes étapes nécessaires d'intégration des réseaux de capteurs intelligents au sein de la politique de la maintenance conditionnelle en tenant compte de tous les aspects organisationnels et techniques relatifs à la mise en œuvre d'un tel système.

De même nous avons cerné au mieux ses caractéristiques pour pouvoir dégager les moyens informatiques et techniques susceptibles (identification du nœud du capteur, Efficacité énergétique des capteurs, configurations des nœuds, choix de topologies de réseau...) afin de soutenir de manière flexible et interactive l'implémentation de notre plateforme de télésurveillance. La finalité de cette démarche proposée, est de guider les industriels pour réussir un projet qui couple la maintenance conditionnelle et les RCSF afin de faciliter la migration vers la maintenance intelligente, et par conséquent vers l'ère de l'industrie 4.0.

Afin de valider l'architecture matérielle et logicielle mises en œuvre pour répondre aux spécifications établies dans la phase de la modélisation, nous avons évalué notre application RCSF développée dans une centrale thermique pour la télésurveillance d'une turbine.

A cet égard, nous avons ensuite utilisé l'environnement Instant Contiki pour étudier la robustesse de notre système. Dans un scénario, où les capteurs collectent les données en temps réel et les transmettent au nœud central par une alerte chaque fois que les capteurs détectent les valeurs de seuil à partir de l'un des autres capteurs ou une anomalie. De même, en cas d'urgence pour éviter les problèmes fatals qui entraînerait des temps d'arrêt ou des dommages au système.

L'intégration des RCSF dans la télésurveillance des équipements de production est un domaine en plein essor, c'est la raison pour laquelle dans la dernière partie, nous avons étudié certains défis associés à l'utilisation de réseaux de capteurs intelligents pour simuler l'impact du capteur intelligent sur les coûts de maintenance conditionnelle et la fiabilité. Les méthodes sont basées sur le coût par unité de temps pour montrer comment différents paramètres ont un impact sur le coût de la maintenance. Nous avons décrit dans un cadre quantitatif un modèle décisionnel pour guider les gestionnaires vers le bon choix de leurs politiques de maintenance. Aussi, afin de comparer dans quel cas le coût de remplacement des composants, avant qu'ils ne tombent en panne (en utilisant la technologie des capteurs intelligents) est moins coûteux que de remplacer le composant après sa panne. Pour conclure, il est judicieux d'investir dans cette technologie pour maintenir le composant à titre préventif.

Perspectives

Les perspectives liées à ce travail de recherche, à court terme, concernent l'implémentation de notre démarche générique pour l'intégration des réseaux de capteurs intelligents dans la politique de la maintenance conditionnelle, c'est l'exploitation de nos simulations et algorithmes proposées dans un cadre réel.

Dans l'avenir, nous prévoyons de nous lancer dans une implémentation complète de notre architecture qui consistera non seulement à intégrer des capteurs sur les équipements industriels, mais aussi une application connectée intégrant toutes les activités de service maintenance : la gestion des parcs et des pièces de rechange, la gestion des ressources humaines, la gestion des budgets et la gestion des interventions... Ceci ouvre la porte vers l'ère de l'industrie 4.0 qui est basée sur les technologies suivantes (voir figure 42) :

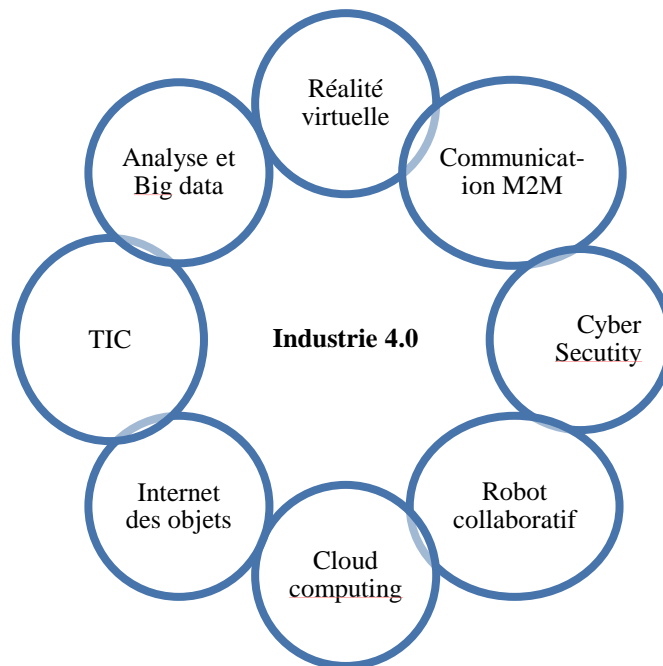


Figure 42: Technologies utilisées dans l'industrie 4.0

Une autre perspective pourrait concerner l'adaptation et la migration des outils et méthodes managériales utilisés dans l'industrie 3.0 vers l'industrie 4.0.

En tant que perspective, concernant notre étude économique, Nous allons valider notre étude dans un cadre industrielle qui opte pour l'intégration de cette nouvelle technologie. Nous pouvons aussi étudier d'autres objectifs pouvant influencer sur la maintenance conditionnelle, comme la sécurité; Ainsi de nouvelles opportunités pour développer un cadre qui compare d'autres politiques de maintenance.

Bibliographies

- A.~Dunkels, B.~Gronvall & T.~Voigt, 2004. Contiki -- A Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors. *LCN '04: Proceedings of the 29th Annual {IEEE} International Conference on Local Computer Networks*, pp.455–462.
- Ait-kadi, A.C.D., 2002. Classement des équipements par ordre de priorité pour la maintenance : une approche multicritère. , 11, pp.1–23.
- Akhondi, M.R. et al., 2010. Applications of Wireless Sensor Networks in the Oil, Gas and Resources Industries. *Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2010 24th IEEE International Conference on*, pp.941–948.
- Albert H.C. Tsang, (1995), 1995. Condition-Based Maintenance: Tools and Decision Making. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*,, 1(1995), pp.3–17.
- Alexander, T. et al., 2005. This is the author version of article published as : , pp.206–219.
- IMS, Development of Smart Prognostics Agents (WATCHDOG AGENT ®).
- HASEGAWA Fumio, 2011. Remote Monitoring and Maintenance Technology Providing “ Anytime , Anywhere ” Equipment Support — Development of a Common Remote Monitoring and Maintenance Platform — . , pp.2–5.
- Atzori, L., Iera, A. & Morabito, G., 2010. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), pp.2787–2805. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
- Bahi, J. et al., 2019. Reliable diagnostics using wireless sensor networks. *Computers in Industry*, 104, pp.103–115. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.10.006>.
- Baxter, N. & Services, A.B.M.T., 2008. Remote Machinery Monitoring – a Developing Industry. , (June 2006).
- Béjaïa, U.A.M. De & Rosa,2016. Simulation d’un Réseau de capteur sans fil sous contiki"La localisation d’un mobile
- Beylot, L., Kacimi, R. & Irit, R.D. 2009, Techniques de conservation d’énergie pour les réseaux de capteurs sans fi.
- Bossche, A. Van Den et al., Réseau de capteurs sans fil distribués pour le monitoring des activités de vie au sein d ’ une maison intelligente. , 3(1), pp.3–7.
- Bouabdallah, A., Cours1 Yacine CHALLAL Hatem BETTAHAR Les Réseaux de capteurs (WSN: Wireless Sensor Networks).
- Bousdekis, A. et al., 2015. A proactive decision making framework for condition-based maintenance. *Industrial Management & Data Systems*, 115(7), pp.1225–1250. Available at: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edb&AN=108602956&site=eds-live%5Cnhttp://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/IMDS-03-2015-0071>.
- British Standards Institution, 2010. BSI Standards Publication Maintenance — Maintenance terminology. , p.36.

- Cachada, A. et al., 2018. Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, 2018–Septe, pp.139–146.
- Cam, V. Le et al., 2008. Applications des réseaux de capteurs intelligents et de la communication sans fil à l'instrumentation des structures de génie civil. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (273), pp.9–37.
- Campos, M.A.L. & Márquez, A.C., 2011. Modelling a Maintenance Management Framework Based on PAS 55 Standard. , (December 2010).
- Chesworth, D. & Beng, D.C., 2018. Industry 4.0 Techniques as a Maintenance Strategy (A Review Paper) Maintenance Strategies in Industry View project Industry 4.0 Techniques as a Maintenance Strategy (A Review Paper). , (January), pp.0–8. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/322369285>.
- Choudhary, R., Perinpanayagam, S. & He, H., 2018. Network performance analysis for CBM implementation based on OSA-CBM framework. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2018–March, pp.1–7.
- Coimbatore, T., 2014. RPL Optimization for Precise Green House Management using Wireless Sensor Network. *Icgcee*, pp.1–6.
- Cti réseau , LA CYBERSÉCURITÉ ET LES PME MANUFACTURIÈRES.
- ISO 13374, 2012. Condition monitoring and diagnostics of machine –Data processing-Communication and presentation, Part 3 communication. Djurdjanovic, D., Lee, J. & Ni, J., 2003. Watchdog agent - An infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. *Advanced Engineering Informatics*, 17(3–4), pp.109–125.
- Dong, L., Mingyue, R. & Guoying, M., 2017. Application of Internet of Things Technology on Predictive Maintenance System of Coal Equipment. *Procedia Engineering*, 174, pp.885–889. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.237>.
- Duchêne, F. et al., 2005. Fusion de Données Multicapteurs pour un Système de Télésurveillance Médicale de Personnes à Domicile To cite this version : HAL Id : tel-00007607 Fusion de données multicapteurs pour un système de télésurveillance médicale de personnes `.
- Elwany, A.H. & Gebrael, N.Z., 2008. Sensor-driven prognostic models for equipment replacement and spare parts inventory. *IIE Transactions*, 40(7), pp.629–639.
- Ervural, B.C. & Ervural, B., 2018. *Overview of Cyber Security in the Industry 4.0 Era*,
- Fang, L. & Zhaodong, H., 2015. System Dynamics Based Simulation Approach on Corrective Maintenance Cost of Aviation Equipments. *Procedia Engineering*, 99, pp.150–155. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705814036339>.
- Flammini, A. et al., 2009. Wired and wireless sensor networks for industrial applications. *Microelectronics Journal*, 40(9), pp.1322–1336. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mejo.2008.08.012>.

- Francis CAMPAN. et al., 2013. ‘Vigires’eau : système de surveillance en temps réel de la qualité de l’eau potable d’un réseau de distribution en vue de la détection d’intrusion’.
- Garcia, M.C., Sanz-Bobi, M.A. & del Pico, J., 2006. SIMAP: Intelligent System for Predictive Maintenance. Application to the health condition monitoring of a windturbine gearbox. *Computers in Industry*, 57(6), pp.552–568.
- García, S.G. & García, M.G., 2018. Design and simulation of production and maintenance management applying the Viable System Model: The case of an OEM plant. *Materials*, 11(8).
- García, S.G. & García, M.G., 2019. Industry 4.0 implications in production and maintenance management: An overview. *Procedia Manufacturing*, 41, pp.415–422. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.027>.
- Golmakani, H.R. & Fattahipour, F., 2011. Optimal replacement policy and inspection interval for condition-based maintenance. *International Journal of Production Research*, 49(17), pp.5153–5167.
- Gope, P. et al., 2019. Lightweight and Physically Secure Anonymous Mutual Authentication Protocol for Real-Time Data Access in Industrial Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(9), pp.4957–4968.
- Grall, A. et al., 2002. Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system. *IEEE Transactions on Reliability*, 51(2), pp.141–150.
- Guillén, A.J. et al., 2016. A framework for effective management of condition based maintenance programs in the context of industrial development of E-Maintenance strategies. *Computers in Industry*, 82, pp.170–185.
- Gungor, V.C. & Hancke, G.P., 2009. Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10), pp.4258–4265.
- Gungor, V.C. & Hancke, G.P., 2009. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 56(10), pp.4258–4265.
- Gustavo A. et al., 2016. Duty Cycle Based Energy Management Tool for Wireless Sensor Networks.
- Ha, M. et al., 2010. Inter-MARIO: A fast and seamless mobility protocol to support inter-PAN handover in 6LoWPAN. *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*, pp.1–6.
- Han, T. & Yang, B.S., 2006. Development of an e-maintenance system integrating advanced techniques. *Computers in Industry*, 57(6), pp.569–580.
- Hashemian, H.M., 2010. State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(1), pp.226–236.
- Henry, C. & Coduys, T., 2004. Traitement de données pour capteurs embarqués. , pp.1–5.

- Hodge, V.J. et al., 2015. Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(3), pp.1088–1106.
- Howitt, I. & Gutierrez, J.A., 2003. IEEE 802.15.4 low rate - Wireless personal area network coexistence issues. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, 3(C), pp.1481–1486.
- Industrie, L. & Française, S.-E.L.I., 2012. L'industrie 4.0. , pp.0–3.
- ISO 17359:2002, 2002. Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines. *International Organization for Standardization*, 2002(50).
- Jardine, A.K.S., Joseph, T. & Banjevic, D., 1999. Optimizing condition-based maintenance decisions for equipment subject to vibration monitoring. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 5(3), pp.192–202. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0032653742&partnerID=tZOtx3y1>.
- Jardine, A.K.S., Lin, D. & Banjevic, D., 2006. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), pp.1483–1510.
- Jevtić, M., Zogović, N. & Dimić, G., 2009. Evaluation of Wireless Sensor Network Simulators. *Proceedings of the 17th Telecommunications Forum TELFOR 2009 Belgrade Serbia*, pp.1303–1306. Available at: http://2009.telfor.rs/files/radovi/10_48.pdf.
- Kaiser, K.A. & Gebraeel, N.Z., 2009. Predictive maintenance management using sensor-based degradation models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 39(4), pp.840–849.
- Kaiser, K.A. & Gebraeel, N.Z., 2009. Sensor-Based Degradation Models. , 39(4), pp.840–849.
- Tahar BELKHIR Med. et al., 2016. La maintenance des équipements par l'analyse vibratoire..
- Khanlari, A., Mohammadi, K. & Sohrabi, B., 2008. Prioritizing equipments for preventive maintenance (PM) activities using fuzzy rules. *Computers and Industrial Engineering*, 54(2), pp.169–184.
- Khelifa, B. et al., 2015. Smart irrigation using internet of things. *2015 4th International Conference on Future Generation Communication Technology, FGCT 2015*, (Fgct), pp.91–96.
- Khoury, E. et al., 2012. On the use of time-limited and monitoring information for maintenance decision support. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 8(PART 1), pp.480–485.
- Kugler, P., Nordhus, P. & Eskofier, B., 2013. Shimmer, Cooja and Contiki: A new toolset for the simulation of on-node signal processing algorithms. *2013 IEEE International Conference on Body Sensor Networks, BSN 2013*.

- Kumar, A. & Gupta, S., 2013. Study on ZIGBEE Technology. , 2(10), pp.297–301.
- Lebold, M., Reichard, K., Hejda, P., et al., 2002. A framework for next generation machinery monitoring and diagnostics. *Proceedings of the Society for Machinery Failure Prevention Technology Meeting*, pp.115–126. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/a36b/cfe999dc5b0c77611204d0b1614d13727563.pdf>.
- Lebold, M., Reichard, K., Byington, C.S., et al., 2002. OSA-CBM architecture development with emphasis on XML implementations. *Maintenance and Reliability Conference (MARCON)*, (January), pp.6–8. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.110.4066&rep=rep1&type=pd>
- Lee, J., 2000. A Systematic Approach to Design and Deploy Predictive and Preventive Maintenance Systems • Introduction and Productivity Model.
- Levrat, E., Iung, B. & Crespo Marquez, A., 2008. E-maintenance: review and conceptual framework. *Production Planning & Control*, 19(4), pp.408–429.
- Li, X. et al., 2017. A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. *Wireless Networks*, 23(1), pp.23–41.
- Lin, C.C. & Tseng, H.Y., 2005. A neural network application for reliability modelling and condition-based predictive maintenance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(1–2), pp.174–179.
- Liu, Y. & Xu, X., 2017. Industry 4.0 and cloud manufacturing: A comparative analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 139(3), pp.1–8.
- López-Campos, M.A., Crespo Márquez, A. & Gómez Fernández, J.F., 2013. Modelling using UML and BPMN the integration of open reliability, maintenance and condition monitoring management systems: An application in an electric transformer system. *Computers in Industry*, 64(5), pp.524–542.
- Low, K.S. et al., 2005. Wireless Sensor Networks for Industrial Environments. *International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents Web Technologies and Internet Commerce CIMCAIAWTIC06*, 2, pp.271–276.
- Magazine, I.C. et al., 2017. From 6LoWPAN to 6Lo: Expanding the Universe of IPv6-Supported Technologies for the Internet of Things. , (January).
- Makis, V., Wu, J. & Gao, Y., 2006. An application of DPCA to oil data for CBM modeling. *European Journal of Operational Research*, 174(1), pp.112–123.
- Marc NOUVELLON, Alain BILLET, Laurent GUISE, Jean-Christophe IANESELLI Schneider Electric Industries SAS - France. & Sas, I., Système de surveillance embarqué sur un disjoncteur MT, pp.1–6.
- Manufacturing, M.F., 2006. OpenO & M For Manufacturing Collaborative Operations & Maintenance Collaborative Operations & Maintenance Using MIMOSA ' s OSA-EAI and ISA-95 / B2MML OpenO & M For Manufacturing Collaborative Operations &

- Maintenance Why Use Both ISA-95 / B2MML and OSA-EA. *Work*, pp.1–15.
- SÉBASTIEN GAMACHE. et al., 2019. STRATÉGIES DE MISE EN ŒUVRE DE L'INDUSTRIE 4.0 DANS LES PETITES ET MOYENNES ENTREPRISES MANUFACTURIÈRES QUÉBÉCOISES.
- Mihajlov, B. & Bogdanoski, M., 2011. Overview and Analysis of the Performances of ZigBeebased Wireless Sensor Networks. *International Journal of Computer Applications*, 29(12), pp.28–35.
- Michael Thurston. et al., 2001. STANDARDS DEVELOPMENTS FOR CONDITION-BASED MAINTENANCE SYSTEMS
- Moteiv Corporation, 2006. Moteiv: tmote sky low power wireless sensor module. *Product Data Sheet*, pp.1–28.
- Muller, A., Crespo Marquez, A. & Jung, B., 2008. On the concept of e-maintenance: Review and current research. *Reliability Engineering and System Safety*, 93(8), pp.1165–1187.
- Musznicki, B. & Zwierzykowski, P., 2014. How to choose the right WSN simulation environment. , (December 2013).
- Navarro, D. & Mieyeville, F., 2012. Simulation de réseaux de capteurs sans fil.
- Ogor, R. & Booch, G., 2003. Modélisation avec UML Modélisation avec UML Vue générale du cours Modélisation avec UML 1) Introduction au langage de modélisation UML Unified Modeling language. , pp.1–82.
- Ondel, O., 2006. Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur - machine asynchrone. *These École Centrale De Lyon*.
- Ota, N. & Wright, P., 2006. Trends in wireless sensor networks for manufacturing Nathan Ota* and Paul Wright. *Mechanical Engineering*, 1(1), pp.3–17.
- Arnaud Martinez. et al., 2014. Maîtrise de l'estimation de l'usure des plaquettes de coupe en usinage. , (October).
- Prajapati, A., Bechtel, J. & Ganesan, S., 2012. Condition based maintenance: a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(4), pp.384–400. Available at: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/13552511211281552>.
- Ramadany, M. & Amegouz, D., 2017a. Diagnosis of the Integration Remote Monitoring System Based on Smart Sensors for a Production System: a Case Study Issues of Integration and Deployment of Smart Remote Monitoring System. , 10(March), pp.152–158.
- Ramadany, M. & Amegouz, D., 2017b. Diagnosis of the integration remote monitoring system based on smart sensors for a production system: A case study. *International Review of Automatic Control*, 10(2), pp.152–158.
- Rasovska, I. et al., 2007. Classification des différentes architectures en maintenance . To cite this version : Classification des différentes architectures en maintenance.

- Rastegari, A., 2018. *Condition Based Maintenance in the Manufacturing Industry*,
- Ravnå, R., Society, P.S.-N.M. & 2016, undefined, 2016. Industry 4.0 and Maintenance. *Nfv.No.* Available at: https://www.nfv.no/images/Temahefter/Industry_4_0_and_Maintenance-revised_-_27.10.16.pdf.
- Sarammal, K. & Roseline, R.A., 2013. A Review: Wireless Sensor Networks and Its Application, Platforms, Standards and Tools. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 4(8), pp.2905–2911. Available at: <http://www.ijctjournal.org>.
- Sehgal, A., 2013. Using the Contiki Cooja Simulator. *Computer Science, Jacobs University Bremen Campus Ring*, 1, p.28759.
- Semma, E.M. et al., 2015. ELABORATION D ' UNE DÉMARCHE DE MISE EN ŒUVRE DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE BASÉE SUR L'ANALYSE VIBRATOIRE El Mehdi Semma , Ahmed Mousrij , Hassan Gziri To cite this version : HAL Id : hal-01166665 MAINTENANCE CONDITIO NNELLE BASÉE SUR L ' A NALYSE.
- Sheu, C. & Krajewski, L.I., 1994. A decision model for corrective maintenance management. *International Journal of Production Research*, 32(6), pp.1365–1382.
- Shin, J.-H. & Jun, H.-B., 2015. On condition based maintenance policy. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(2), pp.119–127. Available at: www.sciencedirect.com.
- BOUAMARA Ouarda., 2016. Simulation d'un Réseau de capteur sans fil sous contiki"La localisation d'un mobile".
- Sreenuch, T., Tsourdos, A. & Jennions, I.K., 2013. Distributed embedded condition monitoring systems based on OSA-CBM standard. *Computer Standards and Interfaces*, 35(2), pp.238–246. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csi.2012.10.002>.
- Technology, V., 2010. PLANIFICATION ADAPTATIVE D ' OPERATIONS DE MAINTENANCE BASEE SUR LA DEGRADATION DES COMPOSANTS D ' UN VÉHICULE INDUSTRIEL ADAPTATIVE MAINTENANCE SCHEDULING ACCORDING TO THE COMPONENT DEGRADATION OF A COMMERCIAL HEAVY VEHICLE Définition du problème. , pp.1–10.
- Tian, Z., Lin, D. & Wu, B., 2012. Condition based maintenance optimization considering multiple objectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(2), pp.333–340.
- Tiwari, A., Ballal, P. & Lewis, F.L., 2007. Energy-efficient wireless sensor network design and implementation for condition-based maintenance. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 3(1), p.1–es. Available at: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1210669.1210670>.
- Tseng, S.T., 1996. Optimal preventive maintenance policy for deteriorating production systems. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 28(8), pp.687–694.
- Tuomi, A. Application integration for condition based maintenance, 2010. A !

- Anware Medaoui, 2013. CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DES COÛTS DU PROCESSUS DE LA MAINTENANCE BASÉE SUR LA NOTION D'ACTIVITE (TDABC) ET LES METHODES D'ANALYSE MULTICRITERE (AHP), pp.2012–2013.
- Ustundag, A. & Cevikcan, E., 2018. *Managing The Digital Transformation*,
- Do Van, P. et al., 2012. Remaining useful life (RUL) based maintenance decision making for deteriorating systems. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, pp.66–72.
- Velinov, A. & Mileva, A., 2016. Running and Testing Applications for Contiki OS Using Cooja Simulator. *International Conference on Information Technology and Development of Education*, pp.279–285.
- Vlok, P.J. et al., 2002. Optimal component replacement decisions using vibration monitoring and the proportional-hazards model. *Journal of the Operational Research Society*, 53(2), pp.193–202.
- Wang, W., 2000. A model to determine the optimal critical level and the monitoring intervals in condition-based maintenance. *International Journal of Production Research*, 38(6), pp.1425–1436.
- Wood, a. et al., 2006. ALARM-NET: Wireless sensor networks for assisted-living and residential monitoring. *University of Virginia ...*, pp.1–14. Available at: <http://ursuletz.com/~control/docs/papers/tr06-alarmnet.pdf>.
- Yan, J. et al., 2017. Industrial Big Data in an Industry 4 . 0 Environment : Challenges , Schemes , and Applications for Predictive Maintenance. , 5.
- Yang, L., Ma, X. & Zhao, Y., 2017. Computers & Industrial Engineering A condition-based maintenance model for a three-state system subject to degradation and environmental shocks. *Computers & Industrial Engineering*, 105, pp.210–222. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.01.012>.
- Yick, J., Mukherjee, B. & Ghosal, D., 2008. Wireless sensor network survey. , 52, pp.2292–2330.
- Yun-feng, G., 2015. Greenhouse Environment Monitoring System Design Based on WSN and GPRS Networks. , pp.795–798.
- Zhang, Q., Hua, C. & Xu, G., 2014. A mixture Weibull proportional hazard model for mechanical system failure prediction utilising lifetime and monitoring data. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 43(1–2), pp.103–112. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.10.013>.
- Zhao, G., 2011. Wireless Sensor Networks for Industrial Process Monitoring and Control: A Survey. *Network Protocols and Algorithms*, 3(1), pp.46–63. Available at: <http://www.macrothink.org/journal/index.php/npa/article/view/580>.
- Zhou, X., Xi, L. & Lee, J., 2007. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. *Reliability Engineering and System Safety*, 92(4), pp.530–534.

Annexes

Annexe A : Modélisation UML

Nous présentons dans cette annexe la modélisation UML (Unified Modeling Language) : Ce qui est un langage de modélisation orienté objet le plus connu et le plus utilisé au monde, il permet la représentation des constructions des systèmes complexes. Ce langage a été proposé suite à une requête lancée par l'OMG (Object Management Group) (Ogor & Booch 2003). Les trois composantes d'une modélisation UML sont:

- **Modèle Fonctionnel: Que fait le système**
 - Les diagrammes des cas d'utilisation
- **Modèle structurel (Aspect statique) : Sur quoi le système agit**
 - Les diagrammes de classes
 - Les diagrammes d'objets
 - Les diagrammes de composants
 - Les diagrammes de déploiement
- **Modèle temporel (Aspect dynamique) : Séquencement des actions dans le système**
 - Les diagrammes de séquence
 - Les diagrammes de collaboration
 - Les diagrammes d'états-transition
 - Les diagrammes d'activités

➤ Diagramme de classe

Les diagrammes de classes expriment de manière générale la structure statique d'un système, en termes de classes et de relations entre ces classes. Nous présentons le formalisme de représentation statique des différents concepts (classe, instance, héritage et association) permettant de modéliser (représenter) les connaissances du domaine.

Une classe: représente la structure commune d'un ensemble d'objets. Elle est représentée par un rectangle qui contient une chaîne de caractères correspondant au nom de la classe. Ce rectangle peut être séparé en trois parties (nom, attributs, opérations).

Un attribut : est une propriété commune à tous les objets d'une classe. Il est attaché à une classe et possède un nom, un type et, éventuellement, une méthode d'évaluation. Le type d'attribut peut être un nombre, une chaîne de caractères ou une classe.

Une opération : est un service qu'une instance de la classe peut exécuter

Une méthode : est l'implémentation d'une opération sur une classe et elle peut avoir des paramètres.

Un exemple général d'une classe est présenté à la figure 43

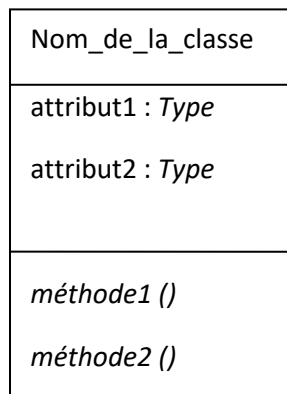


Figure 43:Exemple général d'une classe

-Les types de relation entre les classes

Relation d'héritage : La notion d'héritage permet de spécialiser une description selon différentes classes. Le terme de généralisation est également utilisé. Ainsi, des classes générales peuvent être reliées à des classes spécifiques. Ces dernières héritent de toutes les propriétés contenues dans la classe générale. La relation de généralisation peut être qualifiée de relation « sorte-de » ou « est-un ». Plusieurs niveaux d'abstraction peuvent ainsi être représentés. La figure 44 présente un exemple d'héritage.

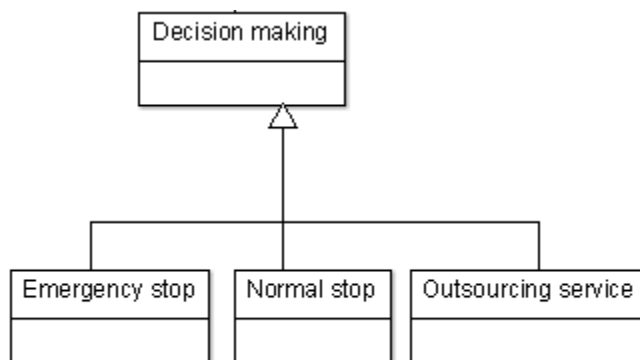


Figure 44:Exemple d'héritage

Relation d'association: Une association est une relation structurelle qui relie plusieurs classes. Une association peut avoir un nom ainsi que des rôles : il s'agit des rôles joués par chacune des classes dans l'association. Dans l'exemple de la figure 45. « My have » est une association de la classe « Function » avec la classe « Function faillure ».

- Les associations binaires connectent deux éléments entre eux
- Une association binaire est composée de deux associations ends.
- Une association end est paramétrée par: un nom (le role joué par l'entité connectée) et Une multiplicity (0, 1, *, 1..*, ...)

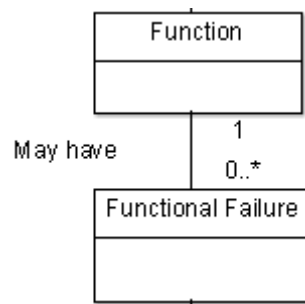


Figure 45: Exemple d'une association


Multiplicités

1 : la classe est en relation avec un et un seul objet de l'autre classe

1..* : la classe est en relation avec au moins un objet de l'autre classe

0..* : la classe est en relation avec 0 ou n objets de l'autre classe

0..1 : la classe est en relation avec au plus un objet de l'autre classe

Relation d'agrégation  : est une relation « composé-composant » ou « partie-de » dans laquelle les objets représentant les composants d'une chose sont associés à un objet représentant l'assemblage (ou l'agrégation) entier. L'exemple dans la figure 46, exprime l'idée que un «Element de systeme» est composé de «Elément maintenable».

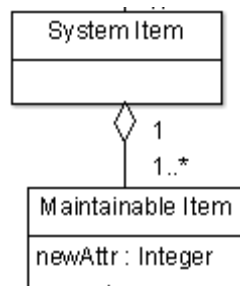



Figure 46: Exemple d'une agrégation

Relation de composition (Agrégation forte)  : est une variante de l'agrégation. La composition est une agrégation réalisée par valeur. Le principe pour les classes composantes est le même que si les classes composantes étaient des attributs de la classe composée. Un exemple est montré sur la figure 47. La classe « Node » est la composante de la classe « WSN».

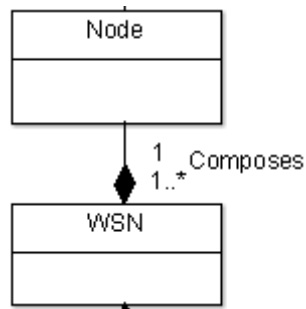


Figure 47: Exemple d'une composition

Un diagramme d'activité : représente la vue dynamique d'un ensemble d'éléments sous de flux d'exécution. Ils permettent ainsi de représenter graphiquement le comportement d'une méthode ou le déroulement d'un cas d'utilisation

Annexe B

I. Les modules de simulation avec Contiki

1. Les procédures de simulation dans Cooja

Une fois le simulateur Cooja ouvert, on lance une nouvelle simulation en sélectionnant Fichier-> Nouvelle simulation.

La fenêtre suivante apparaît. On donne un nom à la simulation. Ensuite on clique sur le bouton crée et une fenêtre de simulation apparaît.

On choisit **Motes->Add notes->Create a new mote->sky mote/ Z1 mote...**

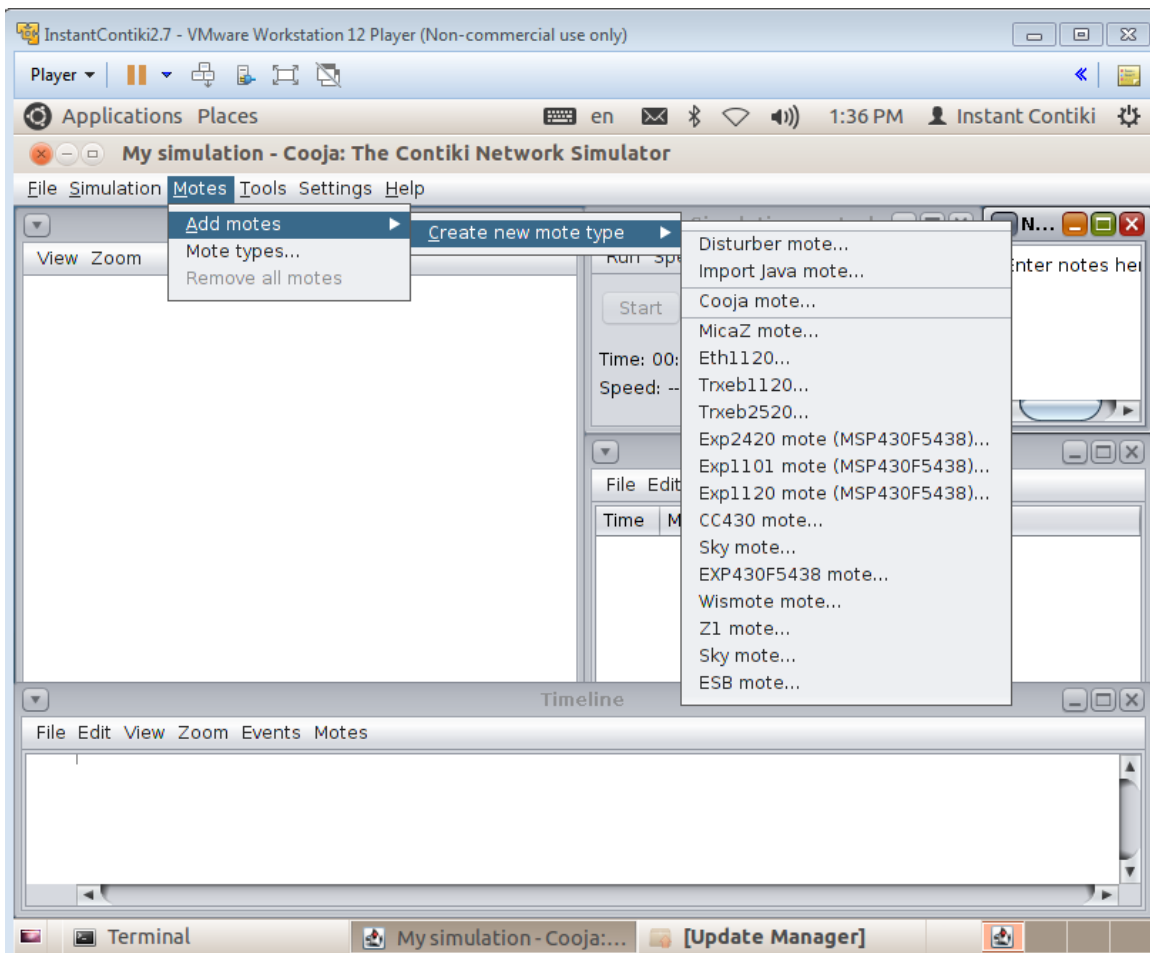


Figure 48: Choix des plateformes de simulation

Dans le champ «Processus / Firmware Contiki», on choisit notre fichier source (le fichier .c). La compilation des commandes de ce code source devient active, ensuite, nous allons simplement utiliser le bouton ‘Parcourir’ pour sélectionner le fichier ‘border-router.sky’. Si on spécifie le code source, on appuie sur **Compiler** avant de créer le type de Mote. On peut voir

la sortie / les résultats de la compilation dans la fenêtre de contrôle de simulation (où on trouve des boutons pour démarrer, suspendre, arrêter et recharger la simulation). Il montre également le temps et la vitesse d'exécution de la simulation.

Pendant la simulation, la fenêtre «Sortie Mote» affiche les sorties pour chaque nœud de capteur selon la chronologie des données transférées (Chaque message affiche des détails comme, l'heure à laquelle le message a été envoyés ou reçus et les détails de l'ID du nœud). Les données peuvent également être enregistrées et seront utilisées pour les calculs d'énergie.

2. Simulation des données physiques de la turbine

Afin de programmer les étapes de la maintenance conditionnelle, nous avons développé de nouveaux modules pour différents capteurs à l'aide de la programmation conventionnelle en langage C. Ce programme est déployé dans les capteurs choisis, et validé avec succès. La figure suivante présente le code source extrait du programme C pour le fonctionnement de notre application.

```

#include "sys/node-id.h"

#include "dev/button-sensor.h"
#include "dev/leds.h"
#include "powertrace.c"

#include "params.h"

/*-----*/
PROCESS(temperature_process, "Temperature unicast");
AUTOSTART_PROCESSES(&temperature_process);
/*-----*/
int bld1, bld2, bld3, bld4, vib;
int flag;

static void
recv_uc(struct unicast_conn *c, const rimeaddr_t *from)
{
    char *sd = (char *)packetbuf_dataptr();
    int val;

    if ((from->u8[0]==blade1 || from->u8[0]==blade2 || from->u8[0]==blade3 || from->u8[0]==blade4) && flag!=1){
        printf("Blade%d Temperature: %s degree celsius\n", from->u8[0], (char *)packetbuf_dataptr());

        val = atoi(sd);
        if(val >= blade_alarm){
            printf("Temperature of blade%d reached %s degree celsius. Alarm Raised.\n", from->u8[0],(char *)packetbuf_dataptr());

            if(val >= blade_shutdown){
                printf("Temperature of blade%d reached %s degree celsius. Central node Shutting Down.\n", from->u8[0],(char *)packetbuf_dataptr());
                flag=1;
            }
        }
    }
}

```

Figure 49:Extrait du code de fonctionnement des capteurs

3. Programmation de la communication entre les capteurs

Afin de programmer la communication entre les nœuds capteurs et le nœud central, nous avons testé l'architecture proposée. La figure suivante montre un extrait du programme qui a été testé avec succès.

```
//Setting receiver to Central node
addr.u8[0] = central_node;
addr.u8[1] = 0;

//Adding Powertrace module
powertrace_start(CLOCK_SECOND * 10);

//Sending blade1 into to central node
if(node_id == blade1) {
    char buffer[6];
    itoa(bladeOne[bld1++],buffer,10);
    const void *message= buffer;
    packetbuf_copyfrom(message, 3);
    unicast_send(&uc, &addr);
}

//Sending Vibration into to central node
if(node_id == vibration) {
    char buffer[6];
    itoa(vibrate[vib++],buffer,10);
    const void *message= buffer;
    packetbuf_copyfrom(message, 3);
    unicast_send(&uc, &addr);
}
}
```

Figure 50: Extrait du programme de la communication entre les nœuds et le nœud central

4. Utilisation du Powetrace et Enegest power profile pour l'estimation de la consommation d'énergie

Après avoir configuré la simulation des nœuds avec les programmes précédents, on peut estimer la consommation d'énergie dans Cooja pour le reste de l'application Contiki. Nous avons utilisé un outil appelé powertrace. APPS += powertrace. Dans le code du fichier coap-client-example.c, nous avons ajouté les lignes de code suivantes pour estimer la consommation énergétique (cpu_ON, LPM, TX, RX) dans différents états:

```
#include "powertrace.h"

powertrace_start (CLOCK_SECOND * 10);

Power(mW) = (rxend - rxstart) * 20mA * 3V / 4096 / runtime(seconds).
```

Cette formule nous permet d'obtenir la consommation d'énergie pendant le temps d'exécution.

La figure suivante présente un extrait de programme de la consommation énergétique du mote

```

#include "contiki.h"
#include "contiki-lib.h"
#include "sys/compower.h"
#include "powertrace.h"
#include <stdio.h>
#include <string.h>

PROCESS(powertrace_process, "Periodic power output");
/*-----*/
void
powertrace_print(char *str)
{
    static uint32_t last_cpu, last_lpm, last_transmit, last_listen;
    uint32_t all_cpu, all_lpm, all_transmit, all_listen;
    uint32_t cpu, lpm, transmit, listen;

    energest_flush();

    all_cpu = energest_type_time(ENERGEST_TYPE_CPU);
    all_lpm = energest_type_time(ENERGEST_TYPE_LPM);
    all_transmit = energest_type_time(ENERGEST_TYPE_TRANSMIT);
    all_listen = energest_type_time(ENERGEST_TYPE_LISTEN);

    cpu = all_cpu - last_cpu;
    lpm = all_lpm - last_lpm;
    transmit = all_transmit - last_transmit;
    listen = all_listen - last_listen;

    printf("%lu %lu %lu %lu %lu %lu %lu %lu\n",
        all_cpu, all_lpm, all_transmit, all_listen, cpu, lpm, transmit, listen);
}
/*-----*/
PROCESS_THREAD(powertrace_process, ev, data)
{
    static struct etimer periodic;
    clock_time_t *period;
    PROCESS_BEGIN();

    period = data;

    if(period == NULL) {
        PROCESS_EXIT();
    }
    etimer_set(&periodic, *period);

    while(1) {
        PROCESS_WAIT_UNTIL(etimer_expired(&periodic));
        etimer_reset(&periodic);
        powertrace_print("");
    }

    PROCESS_END();
}

```

```

/*-----*/
void
powertrace_start(clock_time_t period)
{
    process_start(&powertrace_process, (void *)&period);
}
/*-----*/
void
powertrace_stop(void)
{
    process_exit(&powertrace_process);
}
/*-----*/

```

Figure 51: Extrait du programme de l'estimation énergétique

Le tableau ci-dessous montre la sortie des valeurs des données powertrace ALL_CPU, ALL_LPM, ALL_TX et ALL_RX.

All CPU	ALL LPM	ALL TX	RX
45999	314469	9180	17366
86016	602109	15348	30027
132947	882824	24873	46913
167029	1176402	29502	57173
213865	1457209	39109	74196
244532	1754197	42760	82999
287142	2039232	50167	97558
326499	2327533	55952	110206
362824	2618855	60732	121096
400308	2909026	65839	132441
523155	3113743	98691	175947
523760	3440807	97399	182960
555423	3736797	100887	191928
602293	4017581	110698	208909
639439	4308083	115674	220016
674957	4600214	120910	231188
710891	4891928	126133	242284
738171	5192307	128644	249753
789992	5468129	140344	269467

Tableau 10: Extrait des données Powertrace

LISTE DES TRAVAUX SCIENTIFIQUES REALISES

1. Articles

Article3: "**Intelligent sensor impact on predictive maintenance program costs**", International Journal of Mathematics in Operational Research. S. Sadiki, F. Maurizio, M. Ramadany, S. Boutahari, D. Amegouz.

Article2: "**Running Smart Monitoring Maintenance Application Using Cooja Simulator**", International Journal of Engineering Research in Africa. S. Sadiki, M. Ramadany, F. Maurizio, S. Boutahari, D. Amegouz.

Article1: "**Implementation of a remote monitoring system for Condition maintenance using WSN**" Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Juillet 2018. S. Sadiki, M. Ramadany, F. Maurizio, S. Boutahari, D. Amegouz. <http://www.jatit.org/volumes/Vol96No15/7Vol96No15.pdf>

2. Communications

Communication5: "**Selection of suitable maintenance policy in process industries using MCDM model**", The 11th International Conference on Integrated Design and Production . S. Sadiki, F. Maurizio, M. Ramadany, S. Boutahari, D. Amegouz.

Communication4: "**Quantitative analysis for intelligent sensor impact on predictive maintenance program costs**", The 4th International Conference on Optimization and Applications, Mohammadia, 26-27 Mai 2018. S. Sadiki, M. Ramadany, F. Maurizio, S. Boutahari, D. Amegouz. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8370573/>

Communication3 : "**L'intégration d'une nouvelle technologie de réseau de capteurs intelligents pour la télésurveillance d'un système de production**", 05- 06 Décembre 2017, CIMOSM17, FSTF. S. Sadiki, M. Ramadany, F. Maurizio, S. Boutahari, D. Amegouz.

Communication2: "**Modèles de prise de décision pour le choix des stratégies de la maintenance**", Workshop Systèmes de production industrielle: pilotage, automatisation et maintenance industrielle, FSTF, Mai 2016. S. Sadiki, M. Ramadany, F. Maurizio, S. Boutahari, D. Amegouz.

Communication1: "**Optimisation des coûts de la maintenance : état d'art et étude critique et comparative des modèles**", JMOCL'16 à FST Settat, 22Février 2016. S. Sadiki, M. Ramadany, F. Maurizio, S. Boutahari, D. Amegouz.