

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Electronique
Option : Micro-électronique

Présenté par :

M^{elle} BANDO FARIDA

Ingénieur d'Etat en Electronique

Université UMMTO

Thème

Diagnostic de pannes d'un système de pompage photovoltaïque

Devant le jury d'examen composé de :

Mr	Med said	BELKAID	Professeur	Président
Mr	Amar	HADJ ARAB	Directeur de recherche	Rapporteur
Mr	Abderrahmane	HAMIDAT	Maître de recherche	Examineur
Mr	Mourad	LAGHROUCHE	Maître de Conférences	Examineur
Mr	Salah	HADDAB	Maître de Conférences	Examineur

Soutenue le 19/12/2010



Remerciements

Je remercie Dieu de m'avoir donné la santé, le courage et la volonté de faire ce présent travail.

Ce travail été effectué au laboratoire photovoltaïque du centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) sis à Bouzaréah sous la direction scientifique de Dr A. Hadj Arab, Directeur de Recherche à CDER, je tiens à lui exprimer mes plus vifs remerciements et ma profonde respectueuse reconnaissance par l'intérêt la bienveillance avec lesquels il a dirigé mes recherches.

J'exprime ma reconnaissance au Professeur Med Said Belkaid Doyen de la Faculté de Génie Electrique et d'Informatique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour l'honneur qu'il a bien voulu me faire en président de jury.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur A. HAMIDAT, maître de recherche à CDER et Monsieur M. LAGHROUCHE, Maître de Conférences et Monsieur S.HADDAB, Maître de Conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou d'avoir répondu aimablement afin d'examiner ce travail.

Mes remerciement, sont adressés à l'équipe du projet de recherche E-Maintenance des systèmes solaires photovoltaïques (EMASSOL), qui a participé, d'une manière ou d'une autre à ma formation ainsi qu'à l'élaboration et l'aboutissement de ce projet. Je cite plus particulièrement Dr Brigitte Chebel-Morello, Pr.Noureddine Zerhouni et Dr Karim Haouchine de Laboratoire d'Automatique de Besançon (France). Ainsi Monsieur Samir Benbelkacem de Centre de Développement des Technologies Avancé (CDTA) et sans oublier mes collègues du Centre de Développement des Energies Renouvelables à leur tête Monsieur M. kaci, Monsieur A. Chouder et Monsieur S. Bouchaib, A. Badaoui et à tous les membres du Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Electrique (LATAGE), j'exprime ma reconnaissance pour leur amitié, et leur aide qu'ils m'ont apportée. et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin afin de mener ce travail.

Je tiens également à adresser mes sincères reconnaissances à Monsieur K. Bouchouicha d'avoir mis à ma disposition la documentation nécessaire pour effectuer ce travail. Ainsi pour l'aide et les encouragements qui ma apporté.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère et mon père

Mes frères

Tous mes proches de près ou de loin

Tous mes amis (es).

Résumé

Le Sahara algérien recèle d'importants gisements énergétiques renouvelables, caractérisé par un potentiel solaire fort appréciable et une population répartie d'une manière très éparse. L'installation des systèmes photovoltaïques sert à exploiter une partie de ce gisement. Le système de pompage photovoltaïque est une solution bien adaptée pour une grande partie de ces régions. En effet, dans ces régions il existe un potentiel hydraulique important et pas forcément trop profond sous terre.

Un système de pompage photovoltaïque (PVPS) se compose généralement d'un générateur photovoltaïque (PV), d'un onduleur, d'un sous-ensemble moteur-pompe et d'un réservoir d'eau. Malheureusement les systèmes de pompage PV ne sont pas toujours fiables, des pannes peuvent surgir (par exemple défaillance des robinets, pannes dues aux moteurs, onduleurs, fuites des tuyaux, les modules PV, etc.).

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons au diagnostic de pannes de la mini station de pompage photovoltaïque du CDER, qui fait partie de l'étude des comportements des systèmes de pompage photovoltaïque pour assurer le bon fonctionnement de l'équipement.

Pour résoudre un problème de diagnostic de pannes, nous avons proposé d'utiliser la méthode orientée connaissance de conception de diagnostic par le raisonnement à partir de cas, et une démarche de capitalisation des connaissances pour pallier le manque d'expertise, en exploitant des outils des suretés de fonctionnement. Deux modèles ont été mis en place : un modèle fonctionnel de l'équipement et une taxonomie des composants associés à une base de cas issue de l'exploitation d'un historique de pannes, d'une AMDEC et de données expertes concernant l'équipement à maintenir.

L'ontologie du domaine et une étape de manipulation à l'aide du raisonnement à partir de cas (RàPC). Le management de ces connaissances par la méthode de raisonnement à partir de cas, nous a permis de développer une base de cas manipulée par différentes phases de traitement à savoir : la remémoration et l'adaptation. Ces deux phases sont liées entre elles. Pour cela, nous avons ainsi proposé d'utiliser une méthode de remémoration guidée par l'adaptation en mettant en place deux mesures, à savoir : la mesure de remémoration et la mesure d'adaptation. Ces mesures permettent de choisir le cas le plus facilement adaptable lors de la phase de remémoration. Ensuite, nous avons mis en place un algorithme d'adaptation qui prend appui sur les relations de dépendance des descripteurs de problèmes et de solutions.

Mots-clés : diagnostic, méthode de diagnostic, raisonnement à partir de cas, système de pompage photovoltaïque.

Sommaire

<i>Introduction Générale</i>	1
 <i>Chapitre I : Système de pompage photovoltaïque :principe et fonctionnement</i>	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Irradiation Solaire	5
I.2.1. Masse d'air.....	7
I.2.3. Mesure de l'irradiation solaire	8
I.3. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque	9
I.3.1. Générateur photovoltaïque.....	9
I.3.1.1 Cellules solaires	9
I.3.2. Modèle mathématique du générateur photovoltaïque.....	13
I.3.3. Facteurs de limitation du rendement	16
I.3.3.1 Influence de l'éclairement	16
I.3.3.2 Influence de la température	17
I.4. Groupe moteur-pompe	17
I.4.1. Moteur.....	17
I.4.1.1 Moteur à courant continu	18
I.4.1.2 Moteur à courant alternatif.....	18
I.4.2. Pompes.....	18
I.4.2.1 Pompes volumétriques	18
I.4.2.2 Pompes dynamiques	19
I.4.2.3 Pompes de surface ou immergées	21
I.5. Conditionnement de puissance	21
I.5.1. Convertisseur continu/continu	21
I.5.2. Convertisseur continu/alternatif.....	21
I.6. Stockage.....	22
I.7. Notions hydrauliques	22
I.8. Configuration de systèmes de pompage	24
I.10. Conclusion	24

Chapitre II : Maintenance industrielle: application au cas du système de pompage photovoltaïque

II.1.Introduction	25
II.2.Définitions de base de sûreté de fonctionnement et de maintenance	25
II.2.1.Activations de la maintenance.....	26
II.2.2.Fonctions et tâches associées à la maintenance.....	26
II.2.2.1.Fonction études et méthodes	27
II.2.2.2.Fonction exécution	28
II.2.2.3.Fonction documentation	28
II.3.Types de maintenance	29
II.3.1.Maintenance préventive.....	29
II.3.1.1.Maintenance préventive systématique.....	30
II.3.1.2.Maintenance préventive conditionnelle.....	31
II.3.1.3.But de la maintenance préventive	31
II.3.2. Maintenance corrective.....	31
II.3.2.1.Maintenance corrective palliative (dépannage) :	32
II.4. Dossier de maintenance	32
II.4.1.Connaissance du matériel	32
II.5.Conclusion.....	33

Chapitre III : Diagnostic et Raisonnement à Partir de Cas

III.1.Introduction	34
III.2.Le diagnostic	34
III.2.1.Description du diagnostic industriel	35
III.3.Types de connaissances.....	36
III.3.1. Connaissance instantanée.....	36
III.4.Problèmes rencontrés lors d'un diagnostic	37
III.5.Méthodes de diagnostic.....	37
III.5.1. Méthodes quantitatives	37
III.5.2. Méthodes qualitatives	37

III.6. Définition de Raisonnement à partir de cas (RàPC) « Case-Based Reasoning» (CBR).....	38
III.6.1. Approche de raisonnement à partir de cas	39
III.6.2. Origine de RàPC	39
III.6.3. Principe de RàPC	39
III.6.3.1. Raisonnement par analogie	39
III.6.3.2. Représentation d'un cas	41
III.6.3.3. Base de cas (la mémoire dans les systèmes de RàPC)	42
III.6.4. Cycle de Raisonnement à Partir de Cas (RàPC).....	42
III.6.4.1. Elaboration	43
III.6.4.2. Remémoration	44
III.6.4.3. Techniques de recherche des cas similaires	44
III.6.4.4. Adaptation	47
III.6.4.5. Révision.....	48
III.6.4.6. Mémorisation et apprentissage.....	48
III.6.5. Composants d'un système RàPC	49
III.6.6. Systèmes à base de connaissances	49
III.6.7. Formalisation et organisation des cas dans le système du RàPC	50
III.6.7.1. Résolution de problèmes et système interprétatif	50
III.6.8. Indexation du cas.....	51
III.6.9. Modèle d'organisation des cas dans une base de cas	51
III.6.10. Domaines d'application RàPC	52
III. 6.10.1. Type d'applications	52
III.6.10.2. Conditions d'application	52
III.7. Modèles de RàPC	54
III.8. Avantage de RàPC	56
III.9. Conclusion	56

Chapitre IV : Etat de l'art des systèmes de RàPC

IV.1. Introduction.....	57
IV.2. Présentation des différents systèmes de RàPC dédiés au diagnostic Industriel.....	57
IV.3. Méthodologie proposée pour les systèmes d'aide au diagnostic	61
IV.4. Description générale d'un modèle de système de RàPC.....	62
IV.4.1. Systèmes orientés connaissances (knowledge).....	63

IV.4.1.1.Ressources du domaine.....	63
IV.4.1.2.Containers de connaissance	64
IV.4.1.3.Modèle de gestion des connaissances du système de RàPC	64
IV.5.Construction du cas de la base de cas	65
IV.6.Cycle du système de RàPC	66
IV 6.1.Elaboration du cas cible	67
IV.6.2. Proposition d'une méthode de remémoration guidée par l'adaptation	67
IV.6.2.1.Phase de Remémoration des cas similaires.....	67
IV.6.2.1.1.Mesure de Remémoration (MR)	68
IV.6.2.1.2.Mesure d'Adaptation (MA)	69
IV.6.3. Etape d'adaptation	70
IV.6.3.1.Relations de dépendance.....	71
IV.6.4. Algorithme d'adaptation	71
IV.7.Conclusion	71

Chapitre V : Application sur le système de pompage photovoltaïque

V.1. Introduction	73
V.2. Présentation du banc d'essais	73
V.2.1. Description du banc d'essais	73
V.2.2. Composition du banc d'essais	74
V.2.2.1. Capteurs.....	74
V.2.2.2. Eléments de régulation et de fermeture.....	75
V.2.2.3.Eléments de contrôle manuelle et visualisation	75
V.2.2.4. Eléments de connexion.....	76
V.2.2.5. Alimentation du système de pompage	76
V.2.2.6. Instrumentation de mesure	76
V.2.2.7. Acquisition de données et contrôle	76
V.3.Analyse fonctionnelle du système de pompage photovoltaïque	79
V.4.Analyse dysfonctionnelle du système de pompage photovoltaïque.....	80
V.4.1.Classification des défaillances dans le système de pompage photovoltaïque.....	80
V.4.1.1. Analyse des Modes de Défaillance de leur Effet et de leur Criticité (AMDEC)	80
V.4.1.2.Arbre de défaillance	82
V.5. Modélisation des différentes parties du système de pompage	86

V.5.1. Modèle de l'éclairément.....	86
V.5.2. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	86
V.5.3. Modélisation de l'onduleur	88
V.5.4. Modélisation de débit de la pompe	89
V.6. Simulation de pannes au niveau de banc d'essais de système de pompage PV	90
V.6.1. Simulation de pannes au niveau de générateur photovoltaïque	91
V.6.2. Simulation de pannes an niveau d'onduleur	95
V.6.3. Simulation de pannes an niveau de la motopompe	96
V.6.4. Analyse de résultats.....	98
V.7. Mise en place du système de diagnostic par RàPC sur le banc d'essais	98
V.7.1.Réalisation de la base de cas :	98
V.7.2. Modèle hiérarchique des composants	103
V.7.3. Modèle de contexte général de l'équipement.....	104
V.7.3.1. Graphe d'équipement	104
V.8. Cycle du RàPC	104
V.8.1. Elaboration du cas cible	104
V.8.2. Application de la méthode de remémoration guidée par l'adaptation	105
V.8.3. Mise en place des relations de dépendance (RD).....	106
V.9. Conclusion.....	108
 Conclusion générale	 109
 Références bibliographiques	 112
 Annexes :	
A Organigramme des règles de décisions	118
B Algorithme d'adaptation.....	119
C Programme de diagnostic	120

Nomenclature

- V : Tension du module [V].
- n : Facteur d'idéalité de la diode.
- β : Coefficient de température pour la tension en Volt/degré Celsius [$V/^\circ C$].
- I_0 : Courant de saturation de la diode [A].
- h : Rendement [%].
- R_{sh} : Résistance shunt [Ω].
- R_s : Résistance série [Ω].
- G : l'éclairement mesuré [(W/m^2)].
- G : Eclairement incident sur la surface inclinée de générateur photovoltaïque [w/m^2].
- G_{ref} : l'éclairement de référence [(W/m^2)].
- H : Heure de la journée [h].
- H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation.
- HMT : Hauteur manométrique totale [m].
- I : Courant du module [A].
- I_{gpv} : Courant sous charge de générateur photovoltaïque [A].
- I_{mmp} : Courant mesuré au point de puissance maximale dans des conditions réelles de G et de T [A].
- I_{mmpo} : Courant calculé au point de puissance maximale dans des conditions réelles de G_{ref} et de T_{ref} [A]
- I_{mp} : Courant optimal [A].
- I_{on} : Courant à la sortie d'onduleur [A].
- I_{ph} : Courant photovoltaïque [A].
- I_{sc} : Courant de court-circuit [A].
- K : Constante de Boltzmann (Joule/degré Kelvin) [$k = 1,38.10^{-23} J.K^{-1}$].
- N_d : Niveau dynamique d'un puits ou d'un forage.
- N_s : Niveau statique d'un puits ou d'un forage.
- P_{gpv} : Puissance de générateur photovoltaïque [Wc]
- P_c : Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites.
- P_{max} : Puissance maximale [W].

P_{mmp} : Puissance mesurée au point de puissance maximale dans des conditions réelles de G et de T [Wc].

P_{mmpo} : puissance calculée au point de puissance maximale dans des conditions réelles de G_{ref} et de T_{ref} [Wc].

P_{on} : Puissance de convertisseur [W]

Q : Charge de l'électron (Coulomb) [$q = 1.302.10^{-19} C$].

Q : Débit instantané de la pompe [m^3/h].

T : Température mesuré [$^{\circ}C$]

T : Température de la cellule [K].

T : Température de la journée [$^{\circ}c$].

T_{ref} : Température référence [$^{\circ}C$].

V_{gpv} : Tension sous charge de générateur photovoltaïque [V].

V_{mmp} : Tension mesurée au point de puissance maximale dans des conditions réelles de G et de T [V].

V_{mmpo} : Tension calculée au point de puissance maximale dans des conditions réelles de G_{ref} et de T_{ref} [V].

V_{mp} : Tension optimale [V]

V_{oc} : Tension à circuit ouvert [V]

V_{on} : Tension à la sortie d'onduleur [V].

V_t : Tension thermique. [$V_t = \frac{kT}{q}$] [$J.C^{-1}$].

Abréviation

AFNOR : Association Française de Normalisation.

AMDEC : Analyse des modes de défaillance et de leur criticité.

CDER : Centre Développement Energies Renouvelables.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

KPPV : K plus Proches Voisins.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

PPM : Point de Puissance Maximum.

PV : Photovoltaïque.

RàPC : Raisonnement à Partir de Cas

Introduction générale

De nos jours, il nous semble que personne ne peut douter sur l'importance de l'eau et de l'énergie pour les besoins humains. Avec les avancés technologiques, les besoins en énergie ne cessent d'augmenter. Ce problème d'énergie est encore plus sensible dans les sites isolés où l'utilisation des ressources classiques s'avère souvent très coûteuse. En effet, plusieurs contraintes, comme les entretiens périodiques des moteurs diesels, rendent la recherche d'une source d'énergie alternative indispensable pour ce type de sites.

Comme nous le savons, la plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel, etc...). Les études et les prévisions récentes nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement total de ces réserves. En plus, tout le monde est convaincu par le danger de ce processus sur l'environnement.

A partir de ce constat, il a été nécessaire de chercher d'autres ressources d'énergie de remplacement. Les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, représentent une solution de remplacement par excellence et elles sont de plus en plus utilisées de nos jours. Ce type d'énergie n'est pas seulement inépuisable, mais aussi très propre pour l'environnement. D'ailleurs, on parle souvent d'une énergie « verte », puisqu'elle permet d'éviter totalement la pollution produite par les sources traditionnelles.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'énergie solaire photovoltaïque avec comme application, le pompage d'eau dans des sites isolés. Nous verrons que cette solution est particulièrement intéressante pour ce type de sites. D'autant plus que le territoire national dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation peut atteindre les 3900 heures par an au Sahara. De plus, il y a dans ces régions un potentiel hydraulique souterrain peu profond. Une autre coïncidence très importante favorise l'utilisation de ce type d'énergie pour le pompage d'eau est que la demande d'eau, surtout dans l'agriculture, atteint son maximum par temps chaud et sec où c'est justement le moment où l'on a accès au maximum d'énergie solaire.

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons à la maintenance et plus particulièrement au diagnostic de pannes d'un système de pompage photovoltaïque pour assurer le bon fonctionnement.

Le but de ce mémoire est de développer un outil d'aide au diagnostic pour les systèmes de pompage photovoltaïque.

Cet outil doit être conçu en tenant compte de :

- La modélisation de l'expérience
 - comment l'outil va représenter et formaliser l'expérience terrain ?
- La réutilisation de l'expérience rencontrée
 - comment l'outil va sélectionner, évaluer et adapter l'expérience rencontrée dans le contexte dans lequel elle se trouve afin de pouvoir la réutiliser ?

Cependant, nous voulons développer une méthode de diagnostic qualitative notamment orientée connaissance. Ce qui nous amène à choisir l'outil de formalisation de l'expérience terrain : le raisonnement à partir de cas (RàPC). En effet, l'approche du RàPC est un outil d'intelligence artificielle, considéré comme l'outil privilégié de modélisation de l'expérience des utilisateurs et d'apprentissage incrémental de ces expériences. Les systèmes de RàPC ont pour fonction de capitaliser l'expertise terrain sous forme de connaissances dans sa mémoire, de pouvoir raisonner dans un domaine à connaissance réduite, de réutiliser des connaissances analogues pour prendre une décision et d'enrichir la mémoire en ajoutant de nouvelles connaissances d'une façon dynamique. Parmi les différentes applications possibles dans les systèmes de RàPC, allant de la classification à la gestion des connaissances, nous développons un type de systèmes, à savoir le système orienté connaissances.

En effet , ce type de système de diagnostic raisonnant sur des modèles de connaissances obtenus en appliquant la démarche experte utilisée sur le terrain, à savoir l'analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle de l'équipement.

Dans ce cas nous comptons développer les points suivants :

- une représentation de cas plus complexe orientée objet mais qui raisonne sur un ensemble restreint de cas. Cette représentation est issue d'une étude dysfonctionnelle, en prenant appui sur la définition du diagnostic.
- deux modèles de connaissances à savoir : un modèle taxonomique regroupant les composants en familles fonctionnelles et un modèle de contexte décrivant les relations entre les composants de l'équipement industriel à diagnostiquer.

Toutefois, ce type de système exige une attention particulière aux phases de remémoration et d'adaptation afin d'explicitier les cas génériques de la base de cas. De ce fait, nous comptons développer :

- une phase de remémoration guidée par l'adaptation qui s'appuie sur deux mesures de similarité et d'adaptation.
- un algorithme d'adaptation basé sur les relations de dépendance dédié au diagnostic industriel.

Ce mémoire de thèse est constitué de cinq chapitres.

Dans le premier chapitre nous avons présenté la constitution d'un système de pompage photovoltaïque au fil de soleil, ainsi que le principe de fonctionnement de chaque composant de ce dernier.

Le deuxième chapitre a été entièrement consacré à l'application de la maintenance industrielle dans un système de pompage photovoltaïque.

Le troisième chapitre introduit les notions du diagnostic et les principes fondamentaux du RàPC ainsi que la relation entre le diagnostic et le RàPC. Ce dernier s'appuie sur des connaissances représentant l'ensemble des notions et des principes acquis par l'étude, l'observation ou l'expérience. La modélisation des connaissances passe par l'expertise terrain qui est représentée sous forme de cas. Le cas est manipulé via un cycle comportant différentes phases pour résoudre des problèmes et/ou acquérir des nouvelles connaissances. La connaissance du système de RàPC est organisée sous forme de « containers de connaissances » qui sont associés aux phases du cycle et à la base de cas contenant tous les cas du système.

Le quatrième chapitre présente un état de l'art des systèmes de diagnostic basés sur l'approche de RàPC, suivi par une analyse de ces systèmes concernant les techniques utilisées dans chaque phase du cycle. Nous présentons nos choix et nos démarches concernant la mise en place de notre système d'aide au diagnostic par RàPC. Nous mettons en évidence le type de représentation des connaissances qui va se répercuter sur le type du système manipulé. Le type choisi est *système orienté connaissances* qui est associé aux modèles de connaissances du domaine et dans lequel la représentation des cas est générique et plus complexe. Nous nous

intéressons particulièrement aux phases de remémoration et d'adaptation. Ainsi, nous développons la méthode de remémoration guidée par l'adaptation prenant appui sur la formalisation du cas de diagnostic associé aux modèles de connaissances. La liaison entre les deux phases est caractérisée par la mesure de remémoration (MR) et la mesure d'adaptation (MA). Cette dernière permet de sélectionner le cas le plus facilement adaptable. Enfin nous proposons d'utiliser un algorithme d'adaptation qui prend appui sur les relations de dépendance entre l'espace problème et l'espace solution du cas.

Le cinquième chapitre est consacré à la présentation du banc d'essais de système de pompage photovoltaïque et la démarche de proposition d'une méthode de détection de pannes de notre système. Ensuite, nous appliquons le système de diagnostic par RàPC sur le banc d'essais. En effet, nous allons débiter par la mise en place de la base de cas et deux modèles de connaissance sous-jacents. Enfin nous appliquons nos différentes contributions développées dans les phases du cycle RàPC.

Chapitre I

Système de pompage photovoltaïque : principe et fonctionnement

I.1. Introduction

L'Algérie présente beaucoup de zones isolées caractérisées par de faibles taux de population en noyaux dispersés. Cette population souffre de graves problèmes d'alimentation en eau potable ainsi que pour l'irrigation. Vu l'absence de réseau électrique, les systèmes de pompage photovoltaïque (PV) peuvent constituer une solution parfaite pour ces zones. En effet, le but de ce type de systèmes est d'utiliser la conversion directe de l'énergie solaire abondante, par effet photovoltaïque pour subvenir aux besoins en énergie électrique et hydraulique.

Dans ce qui suit, nous allons donner les notions basiques du phénomène de la conversion photovoltaïque. Dans un premier lieu nous donnerons quelques notions théoriques sur le rayonnement solaire et nous enchainons par la suite par la description des différents éléments constituant un système de conversion photovoltaïque, plus particulièrement un système de pompage photovoltaïque.

I.2. Irradiation Solaire

La principale source d'énergie dont nous disposons est le soleil. Cette immense source d'énergie située à environ 150 millions de kilomètres de la terre, elle émet un rayonnement électromagnétique qui peut être assimilé, en première approximation, à celui d'un corps noir (parfaitement émissif et parfaitement absorbant) à une température de 5750°K [1].

La radiation solaire se propage dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques, et qui arrive à la surface de la terre après huit minutes de son point de départ. Afin de quantifier l'énergie reçue au niveau de la surface terrestre, il est nécessaire de connaître les différentes composantes de l'irradiation solaire.

En effet, quatre composantes de l'irradiation ont été répertoriées dans la littérature [2].

- *L'irradiation directe* : c'est l'irradiation reçue directement du Soleil au sol.
- *L'irradiation diffuse* : c'est due à l'absorption et à la diffusion d'une partie de l'irradiation solaire globale par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.
- *L'irradiation réfléchie (l'albédo) du sol* : c'est l'irradiation qui est réfléchie par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

- *L'irradiation globale* : c'est la somme de toutes les irradiations reçus à la surface terrestre.

Dans la figure I.1 ci-dessous, il est schématisé l'ensemble des irradiations solaires reçu sur une surface terrestre [3].

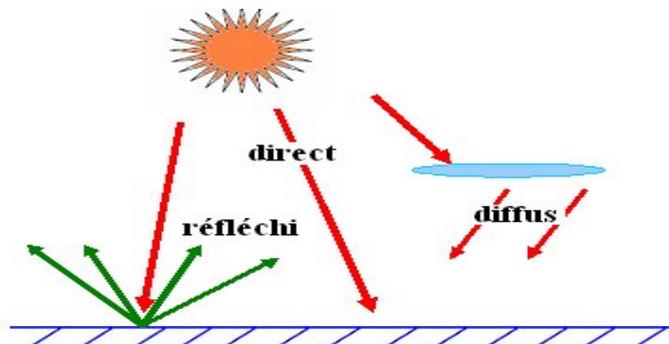


Figure I.1: Types d'irradiation solaire reçus sur une surface plane.

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée éclairement (noté généralement par la lettre G), il est exprimé en watts par mètre carré (w/m^2) [4,2].

La valeur de l'éclairement reçu sur la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. L'éclairement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons du Soleil [3,4].

Dans les figures ci-après (figure I.2 et I.3) est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité du rayonnement reçu sur leurs surfaces du lever au coucher du soleil.

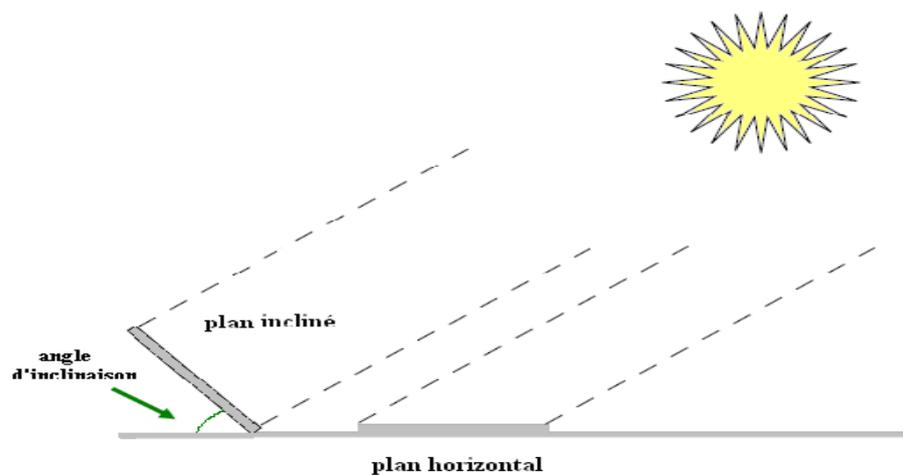


Figure I.2: Eclairement solaire reçu sur un plan horizontal et incliné.

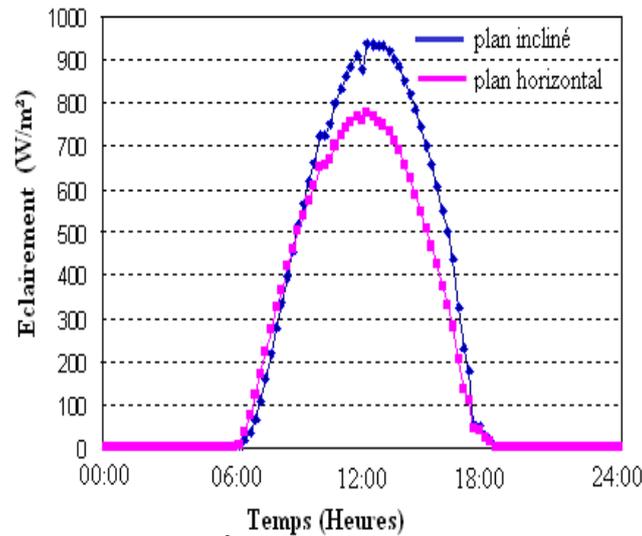


Figure I.3: Eclairement (w/m^2) de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné.

I.2.1. Masse d'air

On appelle masse d'air (AM), la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique [5]. Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith [6, 7].

$$A M \approx \frac{1}{\sin \theta} \quad (I.1)$$

Où :

θ : L'angle entre l'incidence des rayons lumineux et l'horizontale à la Terre.

Spectre AM_0 : il correspond à la masse d'air arrivant au dessus de l'atmosphère (hors atmosphère). Il correspond à la puissance $1367 W/m^2$. Ce spectre est utilisé pour les applications spatiales.

Spectre AM_1 : il correspond à la masse d'air arrivant perpendiculairement à la surface de la terre [10].

Spectre $AM_{1,5}$: il correspond à un rayonnement arrivant à un angle d'inclinaison du soleil de $48,19^\circ$ par rapport au zénith [8]. La puissance correspondante au spectre $AM_{1,5}$ est de $1000 W/m^2$. C'est le spectre le plus couramment utilisé. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est de 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith [9].

La description de nombre d'air masse (AM) est représentée ci-dessous (figure I.4).

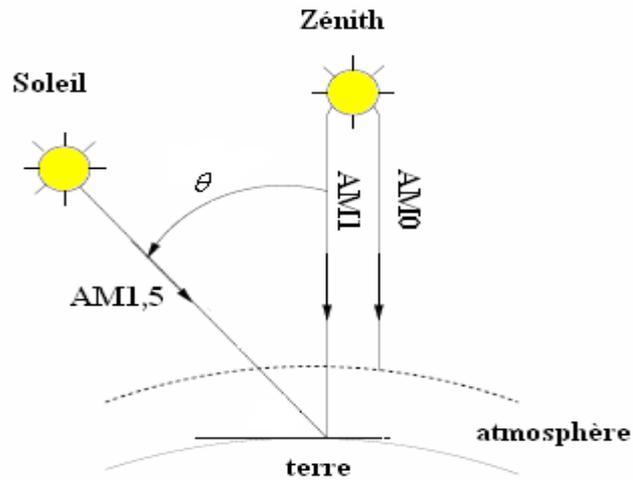


Figure I.4 : Description du nombre de masse d'air.

I.2.3. Mesure de l'irradiation solaire

Le Pyranomètre est un appareil qui mesure l'irradiation solaire sur le plan des modules ainsi que sur une surface horizontale. Cet appareil est généralement fixé à proximité des modules PV (figure I.5) [3].



Figure I.5 : Mesure de l'irradiation par un pyranomètre.

I.3. Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

Un système de pompage photovoltaïque (PV) est constitué généralement d'un générateur PV, un convertisseur, un sous système de pompage (moteur -pompe), la tuyauterie, les accessoires et enfin un réservoir d'eau (figure I.6) [10,11].

Dans les systèmes de pompage PV qui fonctionnent au fil du soleil, le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans les batteries. Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie photovoltaïque est utilisé pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation.

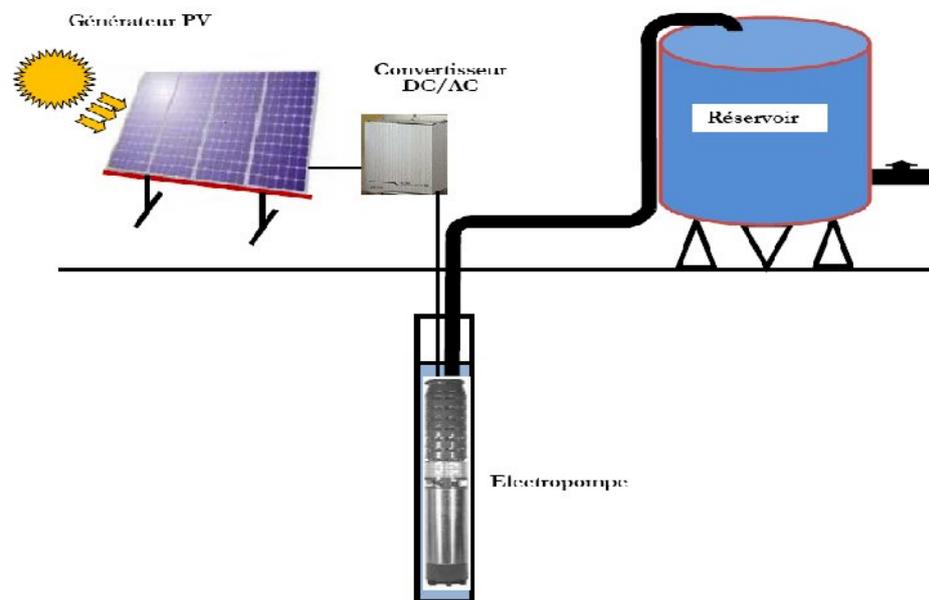


Figure I.6 : Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque.

I.3.1. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules assemblés en série et en parallèle selon la puissance demandée. Chaque module est lui-même constitué de cellules photovoltaïques généralement connectées aussi en série et en parallèle (figure I.7).

I.3.1.1 Cellules solaires

Une cellule photovoltaïque (PV) est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel [4]. Lorsque les photons sont absorbés par le semiconducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de

telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la (figure I.7) [12].

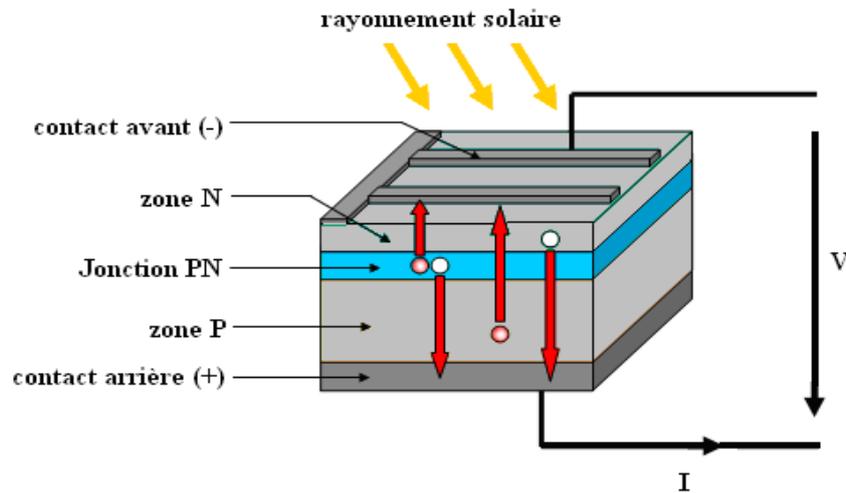


Figure I.7 : Structure d'une cellule photovoltaïque.

Ces cellules sont encapsulées dans une même structure pour former un module (figure I.8) et ce pour les raisons suivantes [13].

- Protection des cellules contre les agressions extérieures (chocs, humidité, corrosion, poussière... etc).
- Contrôle de température des cellules qui vont permettre une bonne dissipation vers l'extérieur de la partie de l'énergie incidente qui n'est pas transformée en énergie électrique.

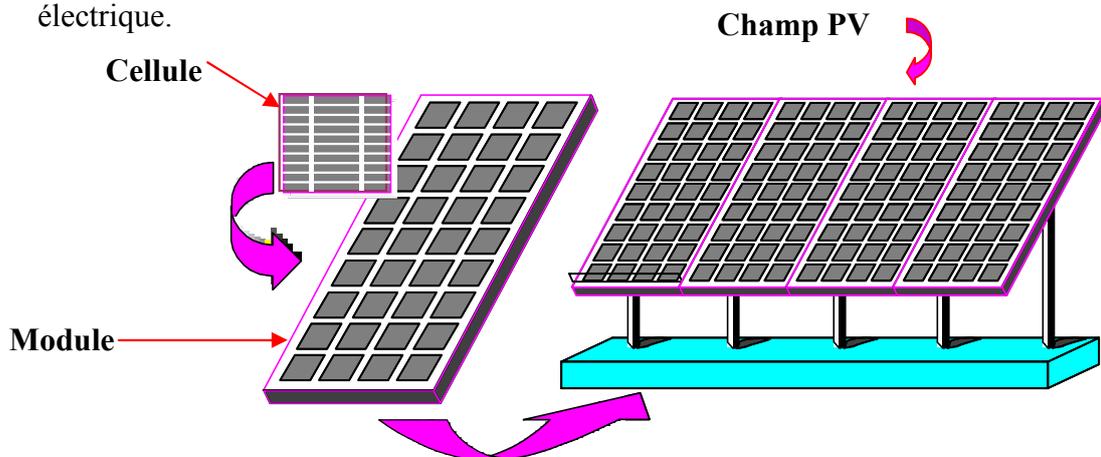


Figure I.8 : Composants d'un générateur photovoltaïque.

La tension délivrée par une cellule PV étant très faible, pour avoir des tensions compatibles avec les charges à alimenter, il faudra associer plusieurs cellules en série ou en parallèle. En outre, le générateur photovoltaïque est obtenu par l'interconnexion des modules en série et/ou en parallèle pour obtenir une puissance encore plus grande [4].

- **Association en série**

En additionnant des cellules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre des cellules connectées en série (figure I.9).

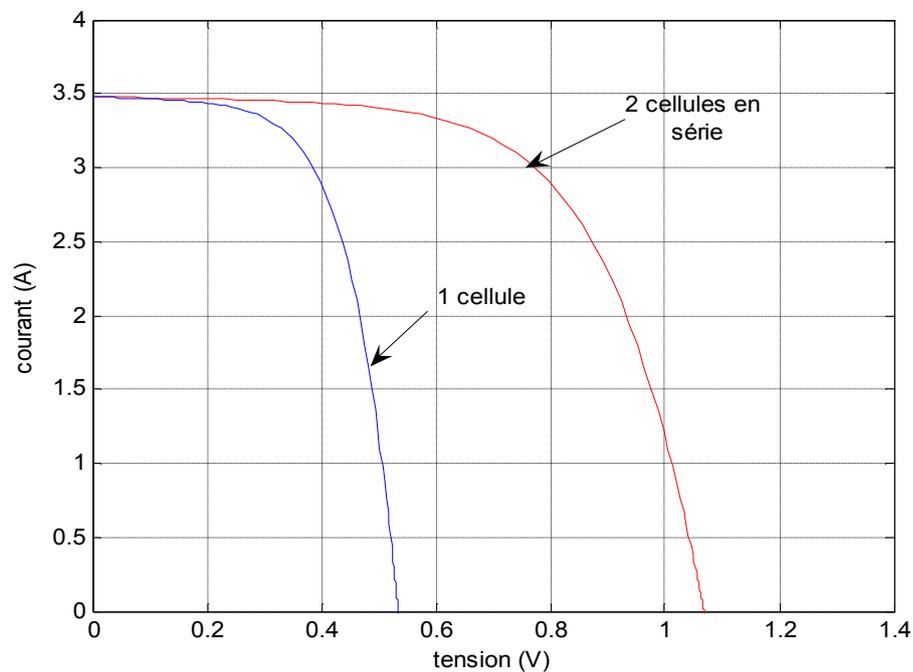


Figure I.9 : Caractéristique I (V) pour 2 cellules connectées en série.

- **Association en parallèle**

En additionnant des cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque cellule et l'intensité du courant augmente proportionnellement au nombre de cellules en parallèle dans la branche (figure I.10).

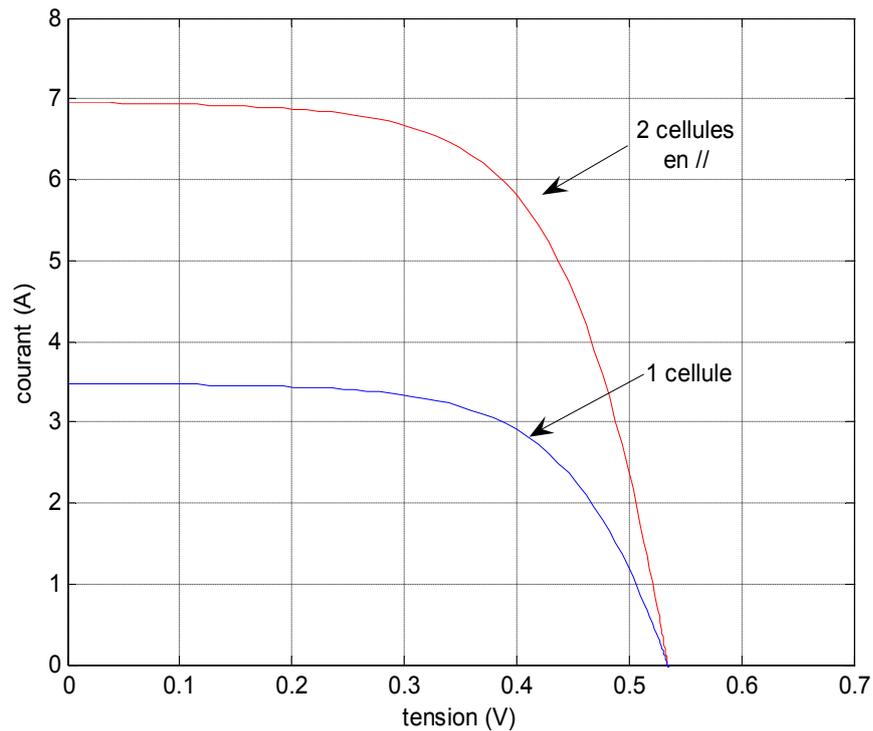


Figure I.10 : Caractéristique I (V) pour 2 cellules connectées en parallèle.

Actuellement la puissance d'un module est de quelques watts crêtes à plusieurs dizaines de watts crêtes. Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série-parallèle des modules pour avoir un générateur PV.

Le courant et la tension aux bornes d'un générateur PV sont exprimés par la relation suivante :

$$I_M = N_p \cdot I_{cc} \quad (I.2)$$

$$V_M = N_s \cdot V_{co} \quad (I.3)$$

Où :

I_{cc}, V_{co} : Sont le courant et la tension aux bornes du module PV respectivement.

I_M, V_M : Sont le Courant et la tension aux bornes du générateur PV respectivement.

N_s, N_p : Sont le nombre de modules connectés en série et en parallèle respectivement.

Pour des déséquilibres importants dus à l'occultation d'une ou plusieurs cellules, les modules peuvent être amenés à travailler en récepteur. Pour remédier à ces problèmes, des diodes peuvent être placées en parallèle et en série avec les modules [14].

- **Les diodes en série**

Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les cellules PV ou pour empêcher une série de modules contenant un module défaillant ou masqué de devenir récepteur du courant fourni par les autres modules en série, qui ont alors une tension plus élevée. On appelle une diode anti-retour, la diode qui est située en série avec les modules (figure I.11. (a)).

- **Les diodes en parallèles**

Au sein d'une série, un module qui ne peut plus produire d'énergie (masqué, défaillant), doit être protégé pour ne pas devenir récepteur et s'endommager irrémédiablement, des diodes sont donc placées en parallèle sur chacun des modules du générateur. Elles permettent de dévier le courant produit par les autres modules de la série et sont placées en parallèle avec les modules (figure I.11. (b)) [15].

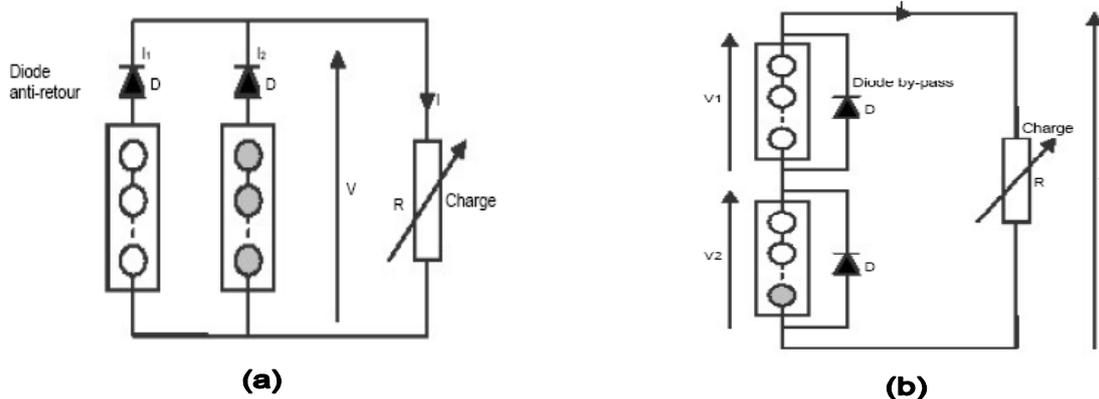


Figure I.11: Schéma synoptique d'un générateur PV contient des diodes : (a) en série, (b) en parallèle.

I.3.2. Modèle mathématique du générateur photovoltaïque

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque est modélisé par un circuit équivalent donné par la (figure I.12) [16]. Ce modèle est composé d'un générateur de courant dont la valeur du courant est proportionnel à l'éclairement reçu sur la surface du générateur PV, une diode qui modélise la jonction PN, une résistance série qui modélise les pertes ohmiques dû au contact électrique et enfin une résistance shunt qui modélise les courants de fuite [17].

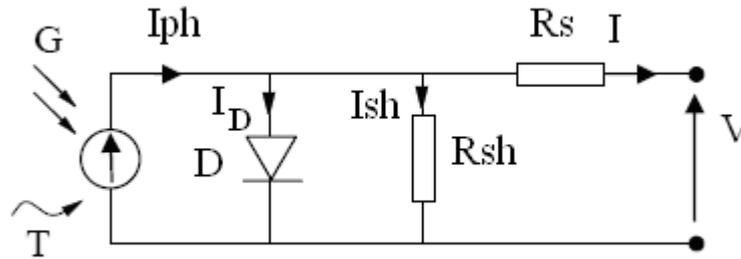


Figure I.12: Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque.

➤ Application de la loi de Kirchoff :

D'après La loi de Kirchoff (loi des nœuds), le courant délivré par le générateur PV est donné par l'expression ci-après :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (I.4)$$

D'où, le courant de la diode est donné par l'équation suivante :

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) \quad (I.5)$$

Le courant aux bornes de la résistance shunt est exprimé par la relation suivante :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

L'équation caractéristique de générateur PV sera donc donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.7)$$

Avec :

I_{ph} : Le courant photovoltaïque [A].

I_0 : Le courant de saturation de la diode [A].

n : Le facteur d'idéalité de la diode.

R_s : La résistance série (Ω).

R_{sh} : La résistance shunt (Ω).

k : La constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23} J.K^{-1}$).

q : La charge de l'électron ($q = 1,302.10^{-19} C$).

T : La température de la cellule ($^{\circ}K$).

V_t : La tension thermique. $V_t = \frac{kT}{q}$ (J.C⁻¹).

La (figure I.13) montre bien que dans la partie verticale de la caractéristique, le générateur photovoltaïque peut être considéré comme un générateur à tension constante et dans sa partie horizontale comme une source de courant constante.

Les paramètres de fonctionnement d'un générateur PV sont :

- Le courant de court-circuit : I_{cc}

C'est le courant obtenu aux bornes du générateur quand la tension à ses bornes est nulle.

- La puissance maximale : P_{max}

La caractéristique d'une charge résistive R étant une droite de pente $1/R$.

La puissance délivrée à cette charge dépendra exclusivement de la valeur de la résistance R .

- La puissance maximale sera obtenue pour $R = R_{opt}$ (point M sur la figure I.13) lorsque la caractéristique $I = f(V)$ du générateur est tangente à l'une des courbes de même puissance.
- La puissance de sortie du générateur est le produit du courant de sortie délivrée par une charge électrique et la tension aux bornes du générateur.
- La tension à circuit ouvert V_{co} : C'est la tension pour laquelle le courant aux bornes du générateur est nul. Elle constitue la tension maximum qui peut être obtenue d'un générateur PV.

La caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque (figure I.13) décrit son comportement sous l'influence de conditions météorologiques (niveau d'éclairement et température ambiante).

Cette courbe passe par trois points :

- Le courant de court-circuit (I_{cc})
- La tension à circuit ouvert (V_{oc})
- La puissance maximale (P_{max})

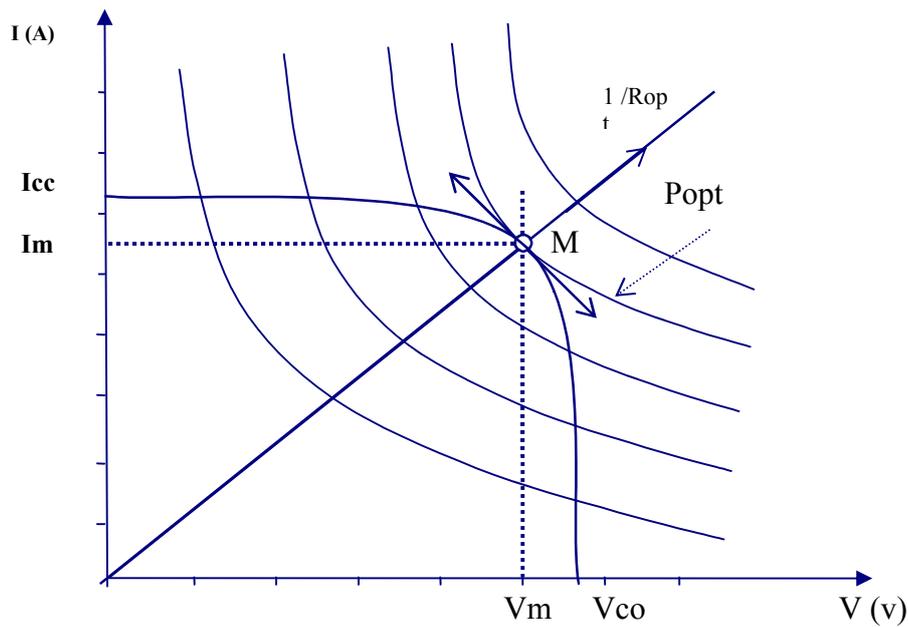


Figure I.13: Caractéristique $I=f(V)$ du générateur PV.

I.3.3. Facteurs de limitation du rendement

I.3.3.1. Influence de l'éclairement

L'augmentation de l'éclairement se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=f(V)$ suivant l'axe des courants pour une température $T=25^{\circ}\text{C}$ représentée (figure I.14) [17].

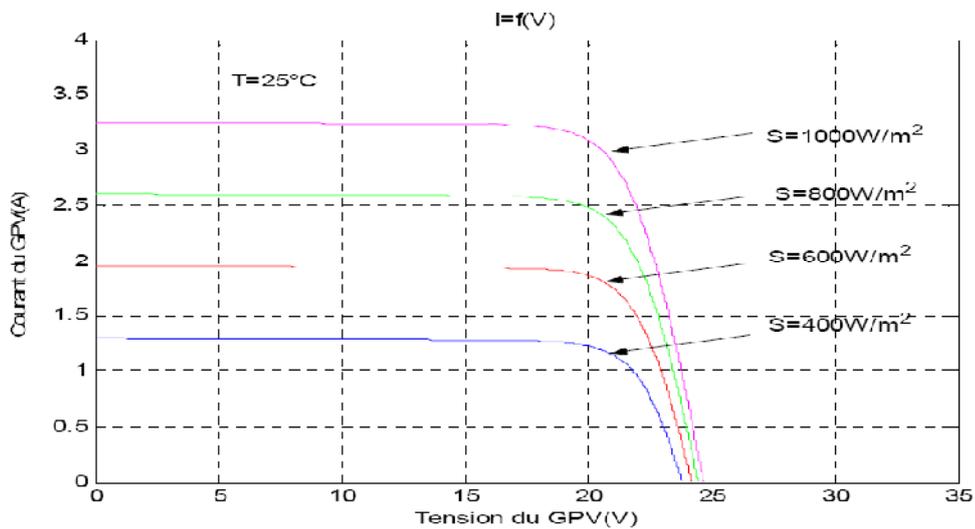


Figure I.14 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.

On remarque que la valeur du courant de court circuit est directement proportionnelle à l'éclairement. Par contre, la tension à circuit ouvert varie très peu en fonction de l'éclairement.

I.3.3.2. Influence de la température

L'influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ est représentée sur la (figure I.15) pour un éclairement fixe $G=1000 \text{ W/m}^2$.

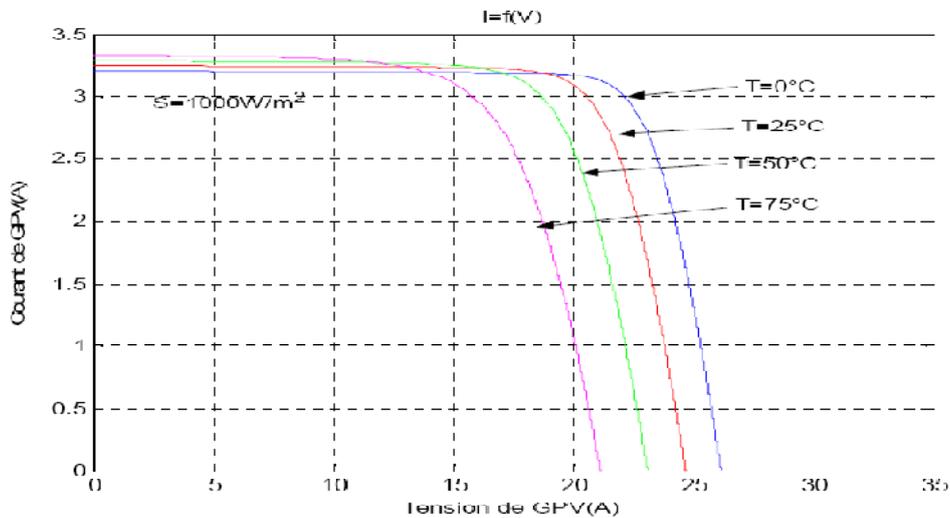


Figure I.15 : L'influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension à circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une nouvelle installation, la prise en compte du paramètre température est nécessaire.

I.4. Groupe moteur-pompe

I.4.1. Moteur

Un moteur est une machine qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique selon l'alimentation électrique (figure I.16).

Le principe de fonctionnement des moteurs est l'induction électromagnétique selon laquelle une spire parcourue par un courant électrique, placé dans un champ magnétique est soumise à une force de déplacement. Nous avons des moteurs à courant continu et des moteurs à courant alternatif.

I.4.1.1. Moteur à courant continu

Le choix d'un moteur à courant continu est intéressant dû au fait que le générateur photovoltaïque génère un courant continu et qui ne nécessite pas un onduleur. Jusqu'à maintenant, ce type de moteur est utilisé pour des applications de pompage pour de petites superficies et pour de faibles puissances [14].

I.4.1.2. Moteur à courant alternatif

Il existe aussi de systèmes qui utilisent des moteurs à courant alternatif. Parmi les avantages de ces derniers : la grande disponibilité, la robustesse, et son faible coût d'entretien et de maintenance. Cependant, ils nécessitent l'utilisation d'un onduleur. Ils sont utilisés pour des applications de grandes puissances.



Figure I.16 : Moteur utilisé pour les pompes.

I.4.2. Pompes

Les pompes sont des machines servant à véhiculer un fluide qui doit être de l'eau ou quelconque (pétrole, huile,...etc.) en l'aspirant pour le refouler à une certaine pression [21]. Il existe principalement deux grandes catégories de pompe; les pompes volumétriques et celles dynamiques.

I.4.2.1. Pompes volumétriques

Les pompes volumétriques (ou à déplacement positif) ont un environnement mobile par changement de volume, oblige le fluide à avancer à travers la machine. Le fluide pénètre dans une cavité à travers la prise. Après, la cavité se ferme et le fluide est expulsé par l'ouverture de la sortie (figure I.17).

Les pompes volumétriques sont utilisées pour des hauteurs élevées avec de faibles débits. Elles ont un rendement d'eau quasi indépendant de la hauteur, mais elles nécessitent de grands courants de démarrage [14,16].

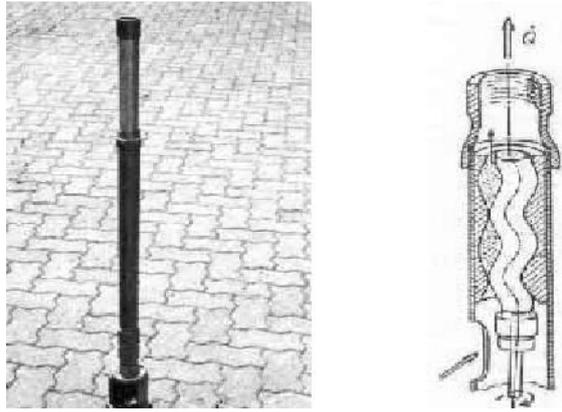


Figure I.17 : Pompe à déplacement positif.

I.4.2.2. Pompes dynamiques

Les pompes dynamiques ajoutent simplement de la quantité de mouvement au fluide à l'aide de palettes ou ailettes giratoires. Les plus utilisées dans les applications de pompage sont les pompes centrifuges [10].

Une pompe dynamique est constituée d'un rotor à l'intérieur d'une carcasse. Le fluide entre suivant l'axe de la carcasse, les ailettes du rotor le forcent à prendre un mouvement tangential et radial vers l'extérieur du rotor, où il est récolté par la carcasse et diffusé vers l'extérieur. Le fluide augmente sa vitesse et sa pression quand il passe à travers le rotor (figure I.18).

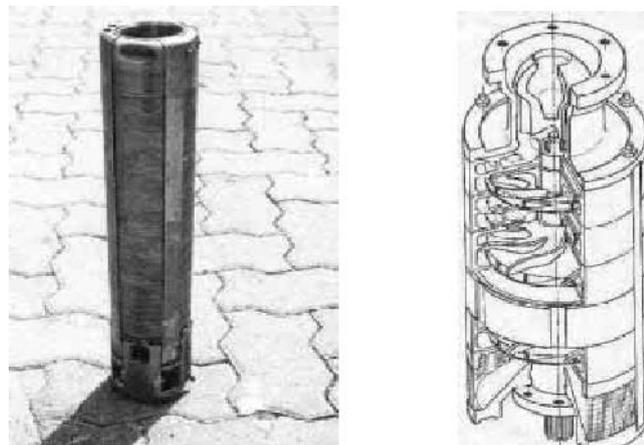


Figure I.18 : Pompe centrifuge.

Il est à noter que pour chaque type de pompe, il existe un seuil d'éclairement au dessous duquel la pompe ne fournit pas d'eau. Ces seuils sont obtenus au lever et au coucher du soleil et éventuellement durant les jours nuageux ou partiellement nuageux [14].

La figure (I.19) montre la différence entre les courbes caractéristiques hauteur-débit (H-Q) pour les deux types de pompes.

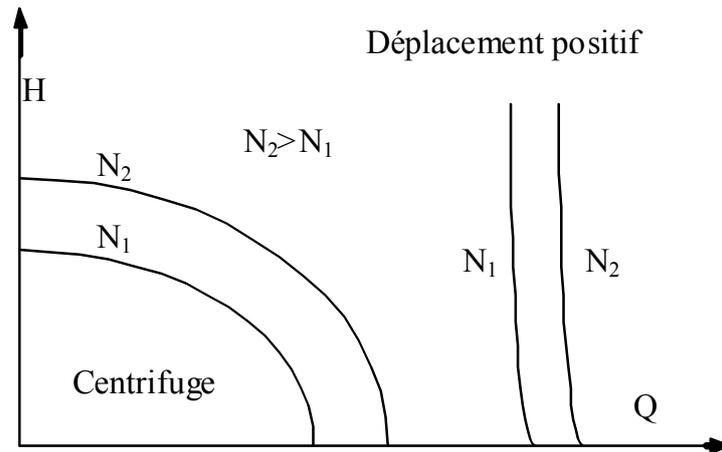


Figure I.19 : Comparaison des courbes caractéristiques (hauteur-débit) des pompes centrifuges et de déplacement positif pour différentes vitesses de rotation de l'axe.

Les courbes caractéristiques d'une pompe montrent la dépendance entre le débit, la hauteur, le rendement et la puissance absorbée.

Les pompes à déplacement positif fournissent un débit approximativement constant directement proportionnel à la vitesse et indépendamment de la hauteur, tandis que les pompes centrifuges donnent une courbe débit-hauteur variable.

Les courbes contenues normalement dans les catalogues techniques sont obtenues pour une pompe fonctionnant à vitesse constante. Pour des vitesses de fonctionnement distinctes, on peut appliquer la loi de similitude de Newton; dans le changement d'un nombre de tours N_1 à un autre N_2 , on obtient les relations entre le débit Q , la hauteur H et la puissance P suivantes [20], valables uniquement pour des pompes centrifuges:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{N_1^3}{N_2^3} \quad (I.8)$$

I.4.2.3. Pompes de surface ou immergées

Le choix d'une pompe se fera en fonction des caractéristiques hydrauliques de l'installation envisagée (débit, HMT,...) mais également en fonction des conditions particulières d'utilisation (puits, forage, pompage de rivière...)

- *Les pompes de surface* : compte tenu du faible pouvoir d'aspiration limitant ainsi la hauteur d'aspiration (inférieure à 8 mètres), les pompes de surface voient leur utilisation très limitée plus particulièrement dans des sites présentant des conditions climatiques très sévères.
- *Les pompes immergées* : c'est la configuration la plus communément utilisée. L'ensemble motopompe est immergé dans un puits.

I.5. Conditionnement de puissance

Le conditionnement de puissance assure l'adaptation de la génération à la consommation et dépendant de la configuration du système. On peut avoir des convertisseurs continu-continu ou continu-alternatif.

I.5.1. Convertisseur continu/continu

Si le moteur électrique est connecté directement au générateur photovoltaïque, le système fonctionnera aux points d'intersection des courbes courant-tension (I-V) du générateur photovoltaïque et de l'ensemble moteur-pompe.

L'idéal serait que ces points coïncident avec les points de puissance maximale de la courbe I-V du générateur. Quand ceci n'est pas possible, on peut utiliser des convertisseurs continu/continu pour approcher les points de fonctionnement à ces valeurs optimales.

La convenance d'utiliser des convertisseurs DC-DC se limite aux cas où le gain net en énergie dans la charge, dérivé de son utilisation, permet de rentabiliser économiquement l'investissement résultant [20].

I.5.2. Convertisseur continu/alternatif

Il est utilisé dans le cas d'un système à courant alternatif. Il existe principalement deux types d'onduleurs qui se différencient par leurs fréquences de sortie fixe ou variable [20, 21].

- **Onduleur à fréquence fixe**

Son utilisation dans les systèmes de pompage nécessite l'interposition d'une batterie d'accumulateurs entre le générateur photovoltaïque et l'onduleur. Ainsi, la tension de la batterie fixe la tension de l'onduleur qui représente la tension de fonctionnement du système.

- **Onduleur à fréquence variable**

Ce type d'onduleur fournit des signaux de fréquence variable proportionnelle à la puissance fournit par le générateur photovoltaïque. Ainsi, si l'éclairement solaire augmente, le convertisseur augmente automatiquement la fréquence. Ceci provoque une augmentation de la vitesse de la pompe et par conséquent une augmentation de la puissance (figure I.20).



Figure I.20 : Schéma descriptif de l'onduleur.

I.6. Stockage

Le stockage peut se faire de deux façons: stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Aussi, le système de stockage avec batterie génère un coût additionnel, des problèmes de maintenance de la batterie et de l'obligation de la remplacer après 3 à 5 ans d'usage. De plus, le rendement énergétique est meilleur quand il n'y a pas d'accumulateurs.

Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement [22].

I.7. Notions hydrauliques

Les stations de pompage sont constituées d'une ou plusieurs pompes qui aspirent des volumes d'eau et les refoulent sous une certaine pression dans les canalisations du réseau. Les paramètres nécessaires pour dimensionner la pompe solaire sont le débit d'exploitation et la hauteur à laquelle la pompe devra refouler. Celle-ci est majorée par des pertes de charges et de la pression de refoulement dans la conduite [16].

- **Le débit Q :**

Le débit fourni par une pompe est la quantité d'eau qu'elle refoule durant un intervalle de temps donné. En pompage solaire, le débit est souvent exprimé en m^3 par jour (m^3/j) [23].

- **La hauteur manométrique totale HMT**

C'est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée comme suit [9]:

$$HMT = H_g + P_c \quad (I.9)$$

Avec :

H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation, illustré par la (figure I.20). Elle est calculée par la formule suivante :

$$H_g = A + B + C \quad (I.10)$$

P_c : Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites, elles s'expriment en mètres d'eau et elles sont fonction de la distance des conduites (D), de leur diamètre et du débit de la pompe.

N_s : Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance entre le sol et la surface de l'eau avant pompage.

N_d : Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance entre le sol et la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen.

Rabatement : La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique.

Rabatement maximal : est le rabatement maximal acceptable avant de stopper la pompe.

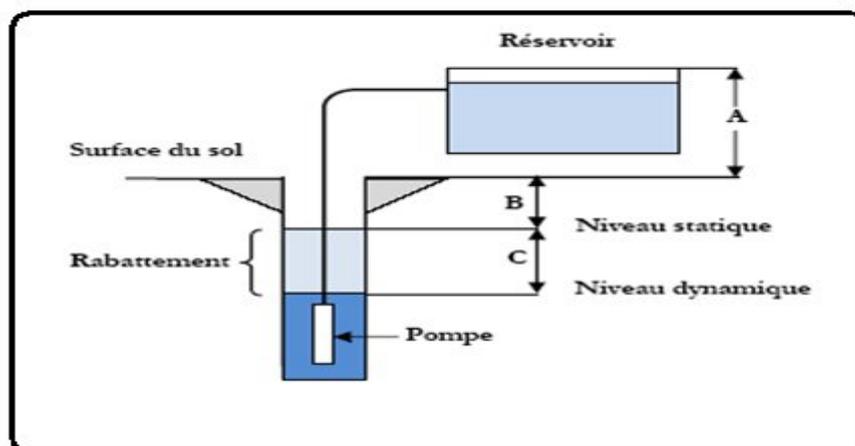


Figure I.20 : Hauteur manométrique totale.

I.8. Configuration de systèmes de pompage

Les configurations du groupe moteur-pompe les plus utilisées sont :

- Ensemble moteur-pompe immergé.
- Ensemble moteur-pompe flottant.
- Ensemble moteur-pompe en superficie.

Chaque configuration est utilisée selon le débit et la hauteur de pompage nécessaires. En général, les pompes immergées sont utilisées dans des puits profonds, de petits diamètres. Cependant, les pompes flottantes sont installées dans des puits, lacs ou puits de grands diamètres.

I.10. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons défini le principe de l'ensoleillement solaire et le rôle qui peut jouer dans la mise en évidence de l'effet photovoltaïque.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté les différents éléments principaux du système de pompage photovoltaïque. Nous avons tout d'abord commencé par définir le principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque, du groupe moteur-pompe, du conditionnement de puissance et de la partie stockage. Ensuite nous avons cité quelques notions d'hydrauliques pour mieux assimiler l'effet photovoltaïque.

En effet, les systèmes de pompage photovoltaïques sont devenus une part de marché très prometteuse. Ces systèmes permettent de répondre à certains besoins liés au pompage d'eau surtout dans les zones désertiques ou à faible sources hydriques. Pour cela, leur utilisation est devenue indispensable. Cependant, ce type d'équipement peut être exposé à des problèmes de dysfonctionnement et de dégradation. A cet effet, nous nous sommes intéressés aux maintenances de ces équipements. Ainsi, nous allons présenter dans le chapitre suivant quelques aspects de la maintenance nécessaires à notre problématique à savoir garantir un fonctionnement permanent des systèmes de pompage photovoltaïque.

Chapitre II

*Maintenance industrielle: application au cas
du système de pompage photovoltaïque*

II.1. Introduction

La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations à un coût global minimal. Une pompe de bonne qualité, bien conçue et bien installée, peut fonctionner correctement pendant plusieurs années, si elle est bien entretenue.

II.2. Définitions de base de sûreté de fonctionnement et de maintenance

Dans cette partie nous allons introduire les concepts et les définitions de base de la norme AFNOR (Association Française de Normalisation) [24], concernant la sûreté de fonctionnement et plus précisément la maintenance.

- **La sûreté de fonctionnement** est « un ensemble des propriétés qui décrivent la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent : fiabilité, maintenabilité, et logistique de maintenance ».
- **La disponibilité** est « une aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée ». Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la supportabilité de la maintenance.
- **La fiabilité** est « une aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné ».
- **La maintenabilité** est « dans des conditions données d'utilisation, une aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits ».
- **La supportabilité** est « une aptitude d'une organisation de maintenance à mettre en place les moyens de la maintenance appropriés à l'endroit voulu en vue d'exécuter l'activité de maintenance demandée à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné ».
- **La logistique de maintenance** représente « des ressources, services et moyens de gestion nécessaires à l'exécution de la maintenance ».
- **La fonction requise** est définie comme « une fonction, ou un ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaires pour fournir un service donné »

- **La maintenance** est « un ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Maintenir un bien est considéré comme étant une action à long terme contrairement à l'action rétablir, considérée à court terme [25].

II.2.1. Activations de la maintenance

Certains auteurs présentent la fonction maintenance comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion (figure II.1).

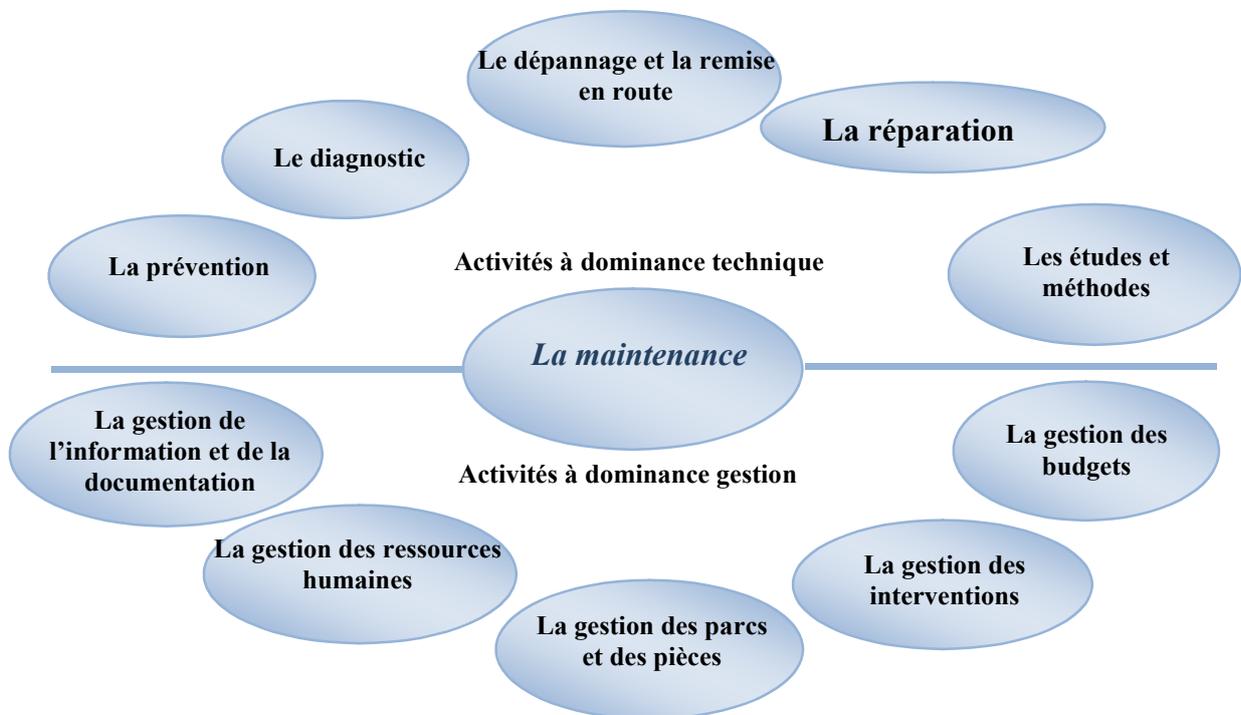


Figure II.1 : Contenu de la fonction maintenance.

Après avoir présenté la définition de la maintenance, Nous nous intéressons à cette première classe d'activités qui comporte des tâches de prévention, de dépannage et de diagnostic. Cette dernière tâche fera l'objet de notre étude.

II.2.2. Fonctions et tâches associées à la maintenance

Nous présentons les fonctions et les tâches associées à la maintenance. Nous identifions trois fonctions associées à la gestion de la maintenance (figure II.2). Ces tâches

associées à chacune de ces fonctions, bien que différentes dans leurs descriptions, sont complémentaires dans leurs finalités.

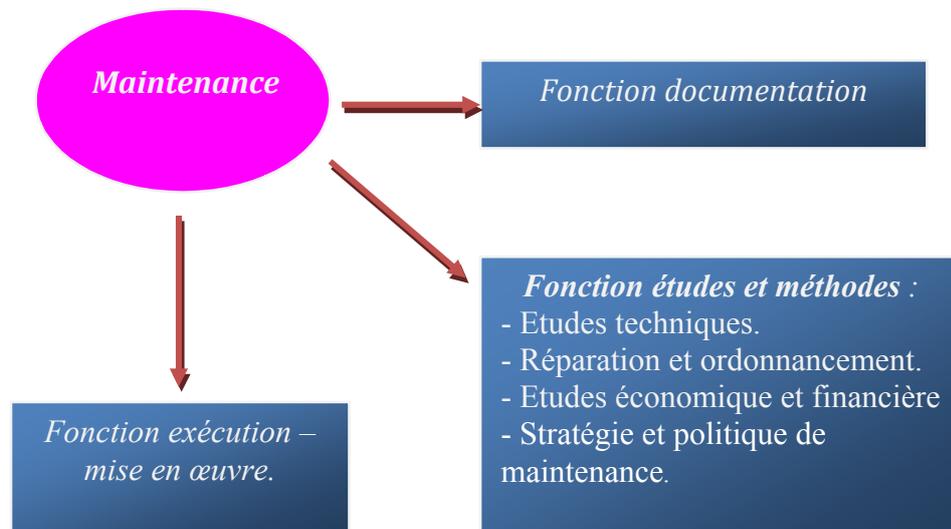


Figure II.2 : Fonctions et tâches associées à la maintenance.

II.2.2.1. Fonction études et méthodes

Elle consiste à optimiser toutes les tâches en fonction des critères retenus dans le cadre de la formulation de la politique de maintenance. Cette partie regroupe quatre tâches principales.

La première tâche, relative à l'étude technique, consiste à :

- Rechercher des améliorations dans le système de production.
- Participer à la conception des travaux neufs tout en tenant compte de l'aspect maintenance de l'appareil de production.
- Participer à l'analyse des accidents de travail pour essayer d'y remédier en apportant des consignes de sécurité dans un premier lieu, et des actions de maintenance corrective et préventive dans un second lieu.

La deuxième tâche, relative à la préparation et l'ordonnancement, consiste à :

- Établir les fiches d'instructions nécessaires pour effectuer les interventions.
- Constituer la documentation pour tous les genres d'intervention.
- Établir les plannings des interventions préventives et d'approvisionnement (la politique de gestion du stock étant dépendante de celle de l'entreprise).
- Recevoir et classer les documents relatifs à l'intervention.

La troisième tâche, relative à l'étude économique et financière, comporte plusieurs étapes telles que :

- Gérer les approvisionnements pour optimiser la gestion des matières premières nécessaires au processus de production.
- Analyser les coûts de maintenance, de défaillance et de fonctionnement, ce qui aura un impact direct sur la politique de maintenance choisie par l'entreprise manufacturière et aussi sur le coût de production.
- Participer à la rédaction des cahiers de charges pour tenir compte de la maintenabilité et de la fiabilité des systèmes à commander.
- Gérer le suivi et la réalisation des travaux pour ainsi mettre à jour la partie historique du dossier technique des machines.

II.2.2.2. Fonction exécution

Elle met en œuvre, une expérience considérable sur le matériel des entreprises modernes et une connaissance approfondie des différentes technologies sont nécessaires. Les principales tâches pour remplir cette fonction sont les suivantes :

- Installer les machines et le matériel (réception, contrôle, etc.).
- Informer le personnel sur la façon d'utiliser les équipements et faire la mise à niveau.
- Appliquer les consignes d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail.
- Gérer l'ordonancement et l'intervention de la maintenance et établir le diagnostic de défaillance du matériel.
- Coordonner les interventions de la maintenance et remettre en marche le matériel après intervention.
- Gérer les ressources matérielles (les pièces de rechange, l'outillage... etc).

II.2.2.3. Fonction documentation

Elle est complémentaire aux deux autres. Ses principales tâches consistent à :

- Etablir et mettre à jour l'inventaire du matériel et des installations.
- Constituer et compléter les dossiers techniques, historiques et économiques ainsi que le dossier des fournisseurs.
- Constituer et compléter une documentation générale (technique, scientifique, d'hygiène et de sécurité).

II.3. Types de maintenance

Dans l'introduction, nous trouvons deux mots-clés : maintenir et rétablir. Le premier fait référence à une action préventive, et l'autre fait référence à l'aspect correctif (figure II.3) [26].

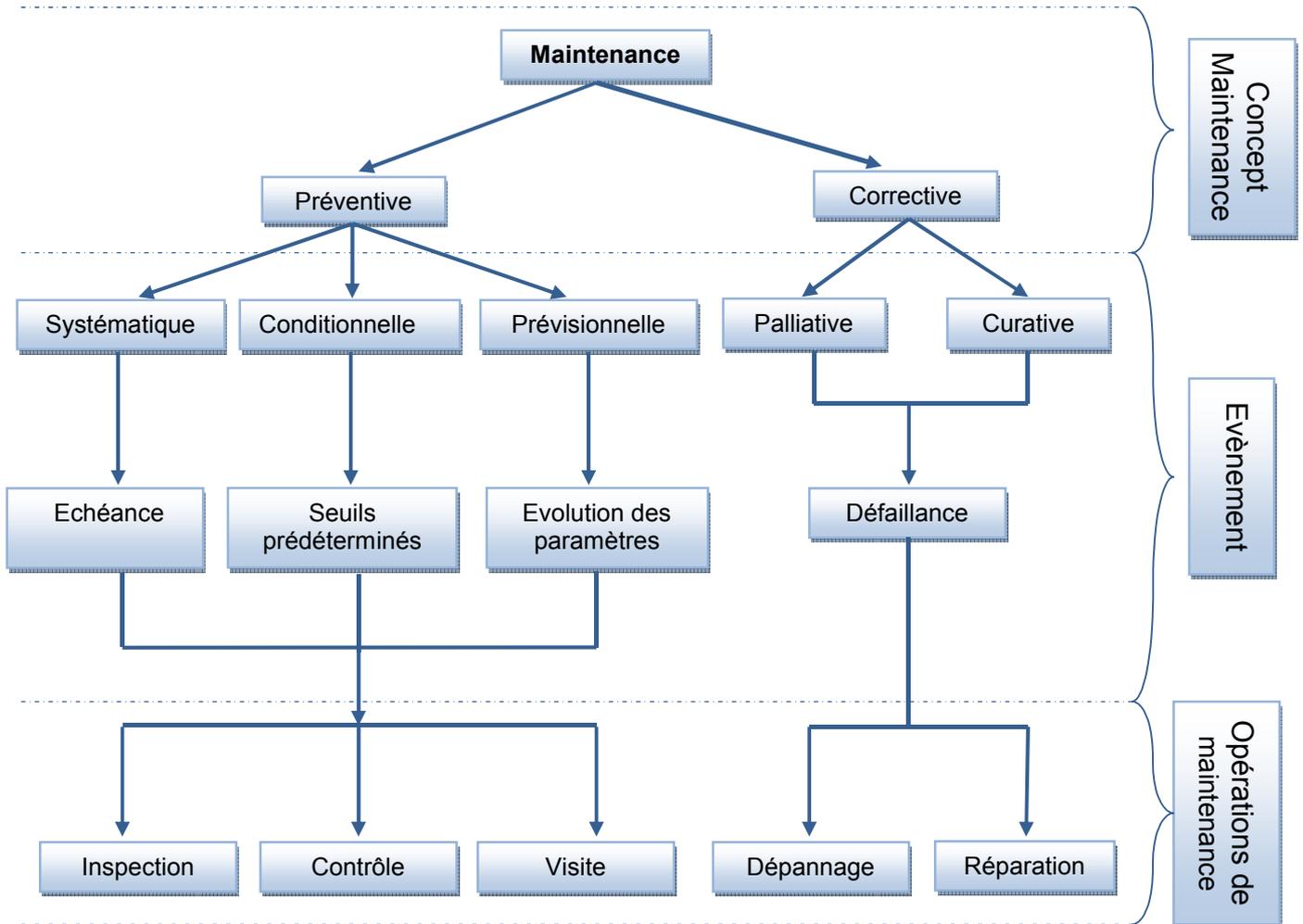


Figure II.3 : Types de la maintenance.

II.3.1. Maintenance préventive

La maintenance préventive a pour objectif d'éviter que l'installation tombe en panne. Pour y arriver, on effectue régulièrement un suivi et un contrôle rigoureux de chacun des constituants de la station, tout en prenant soin de remplacer les pièces usées juste avant que leur état ne perturbe pas le fonctionnement normal du système. Cependant, on doit différencier trois modes de maintenance préventive : la maintenance systématique, la maintenance conditionnelle et prévisionnelle.

II.3.1.1. Maintenance préventive systématique

La maintenance systématique consiste à changer les pièces selon un échéancier préétabli. Elle ne donne pas de résultats directement visibles immédiatement, mais elle permet surtout d'assurer la fiabilité du système.

L'objectif de ce type de maintenance étant de maintenir l'équipement dans l'état de son rendement initial. Les coûts directs de cette maintenance (main-d'œuvre et prix des pièces) ne doivent pas être supérieurs à la valeur des conséquences des pannes que l'on cherche à éviter.

Ce type de maintenance, souvent appelé entretien du système, se limite généralement au nettoyage des modules, au désherbage de la station, à la prévention de l'ombre sur les modules et au contrôle visuel de l'état des câbles et des autres constituants externes (supports, réservoirs...etc.).

Cet entretien est assuré au niveau local par les utilisateurs eux-mêmes. Il est généralement confié à une structure technique locale constituée d'opérateurs techniques.

La figure II.4 [27] donne une récapitulation des actions et contrôles en maintenance préventive.

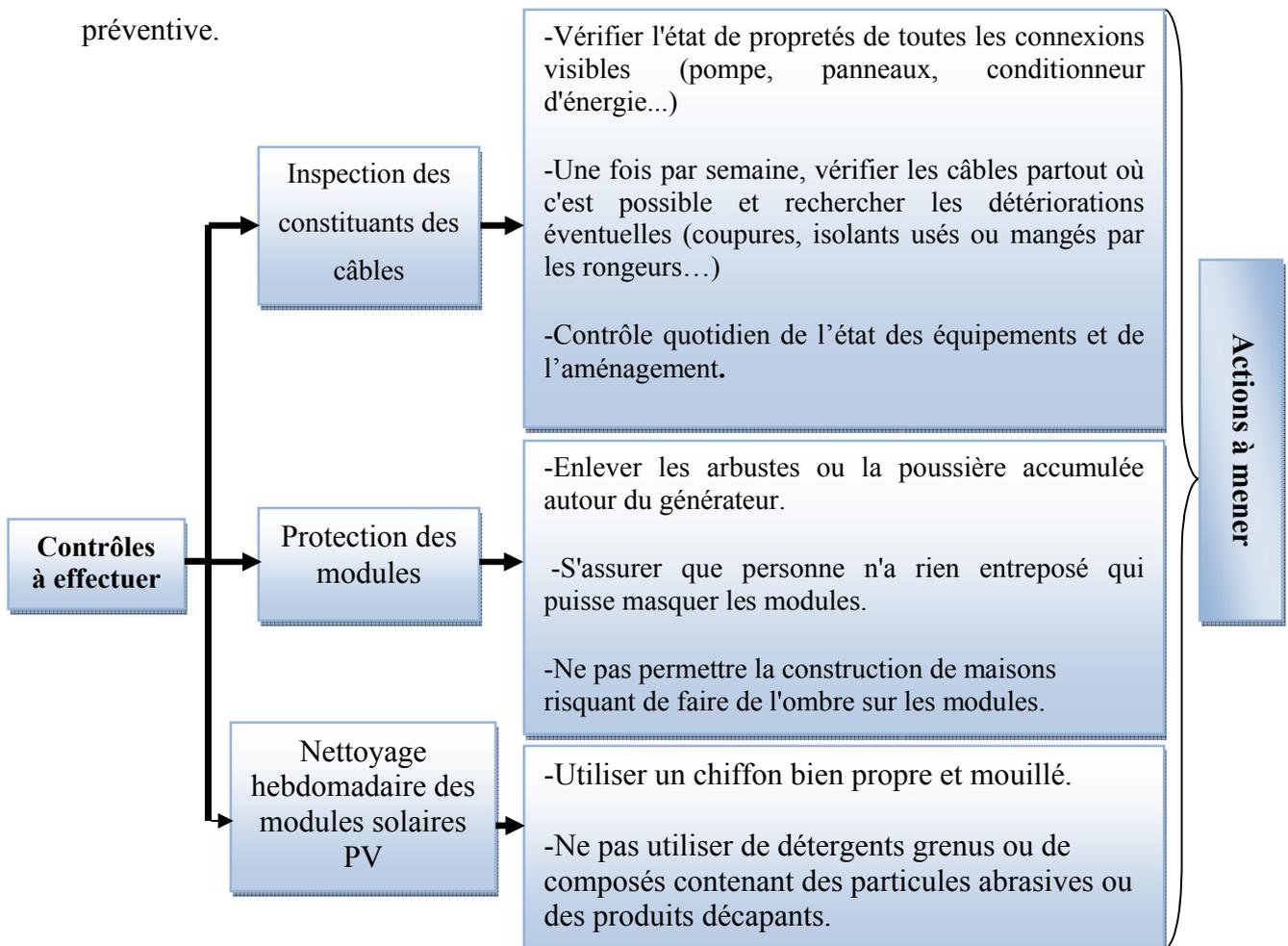


Figure II.4 : Diagramme récapitulatif de la maintenance préventive.

II.3.1.2. Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle a pour objectif la correction de la dérive éventuelle du rendement technique de la station, ceci à travers une exploitation rigoureuse des relevés de mesures et des constats effectués sur le site. C'est une maintenance préventive qui nécessite un diagnostic avant le remplacement de la pièce. Elle dépend des résultats des visites et des inspections (apparition d'un symptôme extérieur). Ces inspections doivent être confiées au maître d'œuvre ou à toute autre structure compétente et doivent être assurées par un technicien spécialisé.

La maintenance préventive peut se présenter sous deux formes : la maintenance améliorative (actions d'amélioration permettant d'accroître la fiabilité et la maintenabilité) et la maintenance prédictive (ou prévisionnelle) (détermination de l'époque optimale d'intervention à partir de l'évolution dans le temps des symptômes constatés).

II.3.1.3. But de la maintenance préventive

- Augmenter la durée de vie des matériels.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Prévenir et prévoir les interventions coûteuses.
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant...etc.
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- Diminuer le budget de maintenance.
- Supprimer les causes d'accidents graves.

II.3.2. Maintenance corrective

La maintenance corrective consiste à remettre en état de marche une installation tombée en panne. L'arrêt de la station peut être dramatique pour les populations (absence d'eau, pertes agricoles...etc), d'autant plus que les pièces de rechange peuvent ne pas être disponibles localement. Afin de répondre le plus rapidement à cette situation, la maintenance corrective se fait habituellement en deux étapes.

II.3.2.1. Maintenance corrective palliative (dépannage) :

Le dépannage permet de remettre provisoirement en service un équipement victime d'une défaillance partielle ou totale, en attendant une réparation définitive. Dans ce cas, la rapidité de l'intervention prime sur la qualité.

Cette action doit répondre le plus rapidement possible à l'arrêt du système en amenant des solutions de marche même temporaires. L'action de dépannage peut être faite par le personnel technique habilité au service de la pompe ou, si le problème est grave, par une équipe technique rapide.

Le but de cette action n'est pas de réparer l'équipement mais de lui permettre de fournir une partie du service pour lequel il a été mis en place. Si nécessaire, une partie de l'équipement sera court-circuitée afin de permettre le fonctionnement partiel du système.

II.4. Dossier de maintenance

Le dossier de maintenance est un dossier dans lequel tout sera noté. Il devra permettre à toute nouvelle personne de s'informer avec précision et d'exécuter les tâches aisément. Nous présentons ci-dessous les renseignements à rassembler pour une bonne connaissance du matériel et surtout la façon de procéder pour constituer le dossier de maintenance d'une installation. Les principes élaborés ci-dessous s'appliquent surtout à la structure extérieure qui assurera la maintenance de la pompe.

II.4.1. Connaissance du matériel

Pour une bonne connaissance du matériel, on doit pouvoir trouver, dans le dossier de maintenance de chaque pompe, les informations suivantes :

- **Fiche descriptive** : nom et adresse du constructeur ou du fournisseur, téléphone, télécopieur, type et numéro de série, année de fabrication...,
- **Caractéristiques physiques** : encombrement, masse, capacité de production...,
- **Commande**: date et références, spécifications techniques, conditions de réception, conditions de garantie...,
- **Plans** : d'ensemble, de détails de toutes les pièces susceptibles d'être remplacées ou réparées, de montage donnant les jeux, les réglages, les vues éclatées...,
- **Schémas**: cinématique, électrique, hydraulique, électronique, de régulation...,
- **Plans d'installation** : fondations, raccordements électriques, hydrauliques,
- **Fiches** : entretien, réglage, mise en route, arrêt, conduite...,

- **Consignes particulières** : sécurité, incendie...,
- **Liste** : des ensembles pour échange standard, des pièces de rechange...

II.5. Conclusion

La maintenance des équipements de système de pompage photovoltaïque demande une grande rigueur ainsi que le respect de grands principes, afin d'assurer une maintenance efficace et fiable. Ce qui permet de corriger toute erreur due à un manque de vigilance de la part du technicien.

De plus pour mener à bien cette action, il doit suivre en permanence des formations et réaliser un système de diagnostic. A cet effet, nous allons présenter dans le chapitre suivant quelques notions de diagnostic ainsi sur l'approche de raisonnement à partir de cas.

Chapitre III

Diagnostic et Raisonnement à Partir de Cas

III.1. Introduction

De nombreux travaux ont porté sur la réduction des coûts de la maintenance ont intensifié l'intérêt pour les techniques de détection et diagnostic, qui est l'objectif de notre étude.

Il existe une pluralité de méthodes dans ce domaine. Parmi ces méthodes, nous nous intéressons à l'approche par raisonnement à partir de cas (RàPC). Ce choix est justifié par le fait que le RàPC est une approche qui permet un raisonnement sur un ensemble restreint de données et de connaissances du domaine, qui s'enrichit au fur et à mesure grâce à un processus d'apprentissage et s'affranchit de la phase de collecte de données d'apprentissage.

En effet, le RàPC s'appuie sur des connaissances représentant l'ensemble des notions et des principes acquis par l'étude, l'observation ou l'expérience. Il permet la manipulation des connaissances qui a pour but de résoudre les problèmes en retrouvant des situations analogues modélisées dans sa base de connaissances et en les adaptant à la situation considérée. La modélisation des connaissances passe par l'expertise terrain qui est représentée sous forme de cas.

Dans ce chapitre nous donnons les notions de base concernant le diagnostic ainsi que la relation diagnostic RàPC, nous présentons les principes fondamentaux du RàPC qui vont nous permettre d'une part, de nous familiariser avec les différents termes utilisés dans le cadre de notre étude et d'autre part, d'introduire les bases des différentes phases de développement d'un système de RàPC.

III.2. Le diagnostic

Etymologiquement, diagnostic vient du grec diagnosis (connaissance). A l'origine utilisé dans le domaine médical, ce terme signifie : « *identification d'une maladie par ses symptômes* » le diagnostic a été ainsi utilisé dans les domaines comme l'ingénierie des connaissances et les systèmes industriels dont la gestion d'entreprise, la maintenance, service après vente, l'intelligence artificielle, le système informatique,...etc. Selon Bussenault et Prête, le diagnostic est un instrument de direction, dans la mesure où il permet de comprendre le passé, et donc d'enclencher une action, pour l'immédiat et pour l'avenir [29]. Le mot diagnostic prend différents sens suivant le contexte : par exemple le diagnostic médical est la détermination d'une maladie pour en identifier les causes, et le diagnostic industriel consiste à trouver la cause d'une défaillance.

III.2.1. Description du diagnostic industriel

Le diagnostic industriel dont la vocation première est de détecter et de localiser une défaillance des matériels des systèmes industriels, joue un rôle primordial dans la détection. Le diagnostic sauvant assimilé strictement au dépannage, fait maintenant partie intégrante de la fonction de maintenance.

Selon AFNOR (Association Française de Normalisation), la maintenance est « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à l'établir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » [24].

Nous introduisons quelques notions de bases à savoir :

- **Un bien** tout élément, composant, mécanisme, sous-système, unité, fonctionnelle, équipement ou système qui peut être considéré individuellement.
- **Un système** est décomposé en sous-systèmes. Les sous-systèmes sont décomposés en composants. En règle générale et en pratique, ce sont sur ces composants que l'ont effectuera la maintenance et non sur le système.
- **Un composant** est en interaction avec les autres composants. C'est l'unité de description minimale de l'analyse systématique.

En effet, notre système sujet à des événements imprévisibles tels qu'une défaillance d'un composant peut entraîner la dégradation de sa performance générale.

- **Une défaillance** : une défaillance est définie comme la cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise. C'est un événement correspondant à un dysfonctionnement du service lié à un fonctionnement anormal ou plus exactement non conforme aux spécifications à un instant donné.
- **Une dégradation** est une évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une autre cause externe.
- **Une observation** : une observation est une information obtenue sur un équipement. Grâce à l'observation, on peut déduire l'état des composants. Les observations interviennent lors de l'apparition des symptômes.
- **Un symptôme** : un symptôme est un phénomène qui survient sur un dispositif et qui révèle un dysfonctionnement. Il est également fréquent de regrouper les symptômes en fonction du dysfonctionnement auxquels ils sont liés : on parle alors de syndrome. L'apparition de symptômes cause une défaillance.

- **Un défaut** : un défaut est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications.
- **Une panne** : la panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation du dispositif à accomplir sa fonction, le dispositif sera déclaré en panne [28].

Notre système peut évoluer sous différents modes de fonctionnement, parmi lesquels on peut citer :

- les modes normaux sous lesquels la mission est totalement remplie, l'un d'eux est le mode nominal correspondant à une qualité parfaite de la mission.
- les modes anormaux sous lesquels la mission est partiellement ou totalement non remplie, incluant les modes défaillants, les modes interdits.
- les modes évolutifs qui caractérisent des modes, souvent transitoires, de passage d'un mode de fonctionnement à un autre [26].

- **Le diagnostic industriel**

C'est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Il y a deux tâches essentielles en diagnostic :

- l'observation des symptômes de défaillance.
- l'identification de la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur l'observation [29].

Le diagnostic est l'étape qui consiste à rechercher quelle est l'origine du défaut. Cette recherche n'a lieu qu'à la condition qu'un défaut ait été détecté.

III.3. Types de connaissances

Dubuisson et al. [30] considèrent deux types de données de diagnostic : les données numériques (exploitation des observations issues des capteurs par exemple) et les données symboliques (connaissances sur le système étudié).

III.3.1. Connaissance instantanée

Qui concerne l'ensemble des biens impliqués à un instant donné afin de prendre une décision et l'exploiter, cette connaissance est issue des observations qui peuvent être numériques ou symboliques.

Une définition normalisée du diagnostic que nous prenons comme référence a été proposée par l'AFNOR, « *ce sont les actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause* » [24]. Selon la même source, la localisation de la panne représente les actions menées en vue d'identifier où se situe le fait générateur de la panne (la cause).

III.4. Problèmes rencontrés lors d'un diagnostic

Le diagnostic d'un problème est assez compliqué à réaliser car :

- Un symptôme peut être causé par différentes conditions de défaillance.
- Certains symptômes ne sont pas faciles à reconnaître. Par exemple, la génération simultanée des conditions de défaillances peut produire un seul symptôme.
- Il existe de nombreux composants fabriqués dans un même produit.
- Il y a un très haut niveau d'interaction entre ces composants.

III.5. Méthodes de diagnostic

Le diagnostic de défaillance (panne) regroupe deux types de méthodes, à savoir ; les méthodes quantitatives et les méthodes qualitatives [31].

III.5.1. Méthodes quantitatives

Ces méthodes se basent sur des modèles mathématiques (analytique : équations différentielles, espaces d'état, fonctions de transfert...) des signaux et du système. Les modèles mathématiques des signaux concernent le traitement du signal tel que le filtrage, l'analyse spectrale, la méthode des résidus, le seuillage, les tests statistiques...

Quant aux modèles mathématiques du système, ils concernent les redondances analytiques telles que l'espace de parité, les bonds graphes et le filtre de Kalman...

III.5.2. Méthodes qualitatives

Ces méthodes ne se servent pas de modèles mathématiques mais prennent appui sur des bases de données symboliques et/ou numériques. Ces méthodes concernent les outils d'intelligence artificielle tels que la reconnaissance de formes, les systèmes experts, les réseaux de neurones, le Raisonnement à Partir de Cas (RàPC).

Par ailleurs, les méthodes de diagnostic sont classées en trois groupes, à savoir [29] :

- le premier groupe comprend les méthodes qui reposent sur la connaissance d'un modèle mathématique du processus de diagnostic. Ces méthodes s'apparentent à un problème d'estimation paramétrique ou d'état.

- le deuxième groupe comprend les méthodes se basant sur la connaissance des différents modes de fonctionnement du processus. Ces méthodes s'apparentent à un problème de classification permettant de caractériser les éléments défectueux.
- le troisième groupe comporte les méthodes qui se basent sur les techniques d'intelligence artificielle impliquant l'emploi d'un système expert.

Nous nous intéressons dans notre étude au troisième groupe de méthodes. Dans ce cadre, Palluat [32] propose une étude sur les méthodes de diagnostic basées sur des outils d'intelligence artificielle accomplissant la fonction de recherche de causes. Nous pouvons recenser :

- **les méthodes à base de modèles comportementaux**

Elles permettent de construire des modèles qui sont liés directement au fonctionnement du système (les automates d'états finis, les réseaux de Petri « dans une optique d'utilisation en diagnostic de systèmes »).

- **les méthodes de reconnaissance de formes**

Elles supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience (les outils statistiques, les réseaux de neurones, la logique floue, les réseaux neuro-flous, les systèmes experts et le RàPC) [26].

- **les méthodes à base de modèles explicatifs**

Elles reposent sur une analyse profonde du système de manière à avoir les connaissances suffisantes à l'expression de ces relations de cause à effet (les graphes contextuels, la logique floue...etc.)

Nous nous intéressons dans notre étude à l'approche du RàPC qui est largement utilisée dans le domaine du diagnostic.

III.6. Définition de Raisonnement à partir de cas (RàPC) « Case-Based Reasoning en anglais » (CBR)

Le RàPC a émergé depuis les années 80, est une approche issue de l'intelligence et de psychologie orientée vers la résolution de problèmes. Le principe RàPC est simple, il utilise des expériences antérieures connues par analogie pour résoudre de nouveaux problèmes, appelés cas [33]. Un « **cas** » est un ensemble de problèmes et de leurs solutions associées. Un « **cas source** » est un cas dont on va s'inspirer pour résoudre un problème appelé « **cas cible** ».

III.6.1. Approche de raisonnement à partir de cas

Le RàPC touche principalement deux types de communautés : celles de l'intelligence artificielle et des sciences cognitives. La méthode se situe entre ces deux communautés de recherche et constitue un pont « naturel » entre elles [29].

- **Les sciences cognitives** étudient la théorie de la compréhension, la résolution et l'apprentissage des problèmes par les hommes et essaient donc de modéliser les connaissances, les expériences et le raisonnement d'un être humain afin d'expliquer les motifs et le fonctionnement de son cerveau.
- **Les systèmes d'intelligence artificielle** à base de connaissance évoquent l'insuffisance des méthodes prenant appui sur la généralisation et essaient d'adopter le raisonnement humain et de l'apprendre aux machines automatiques artificielles. C'est une méthodologie pour développer des systèmes intelligents.

Récemment les deux communautés se rejoignent et les systèmes de raisonnement à partir de cas développés par les chercheurs de la communauté informatique de l'intelligence artificielle font souvent l'objet d'applications industrielles en gestion et capitalisation des connaissances dont les principes.

III.6.2. Origine de RàPC

L'origine de RàPC vient des travaux de Schank et Abelson à l'université de Yale sur la mémoire dynamique et l'apprentissage et qui précisent l'importance des expériences passées au cours d'une solution de problème [33].

La théorie de la mémoire dynamique explique que la plupart des personnes améliorent leurs capacités à résoudre des problèmes grâce à leurs expériences acquises.

Ces auteurs considèrent que nos connaissances générales sur les situations sont enregistrées en tant que scripts qui nous permettent de créer des attentes et de réaliser des inférences. Les scripts sont à comprendre comme une structure conceptuelle pour la mémoire et décrivant les stéréotypes d'informations sur des événements.

III.6.3. Principe de RàPC

III.6.3.1. Raisonnement par analogie

Le principe du RàPC s'appuie sur le raisonnement par analogie, qui vise à caractériser une situation encours, appelée « cible », en mettant en correspondance avec une situation déjà rencontrée, appelée « source ». On sous-entend donc que si deux situations se

ressemblent ou sont analogues, les conclusions que l'on peut en tirer de l'analogie permettent d'établir des relations entre un problème cible et problème source (figure III.1).

Un cas source est sélectionné à partir des valeurs de descripteurs du problème cible et en utilisant la mesure de similarité Alpha.

Les relations de dépendance Béta entre les valeurs de descripteurs de problème et les valeurs de descripteurs de solution mettent en évidence les descripteurs de solution qui doivent être adaptés. Les descripteurs de solution dépendent des descripteurs de problèmes source qui sont différents des descripteurs de problèmes cible.

Autrement dit, si une valeur de descripteur source dépend d'une valeur de descripteur de problème, une modification de la valeur du descripteur de problème entraînera une modification « analogue » à la dépendance du descripteur de solution correspondant. Cette connaissance est nécessaire pour l'adaptation.

En fonction de ces dépendances et des écarts α constatés à corriger, l'adaptation permet de proposer une solution cible candidate qui pourra être vérifiée par rapport à sa conformité aux dépendances particulières qui pourraient exister entre problème et solution cible [34].

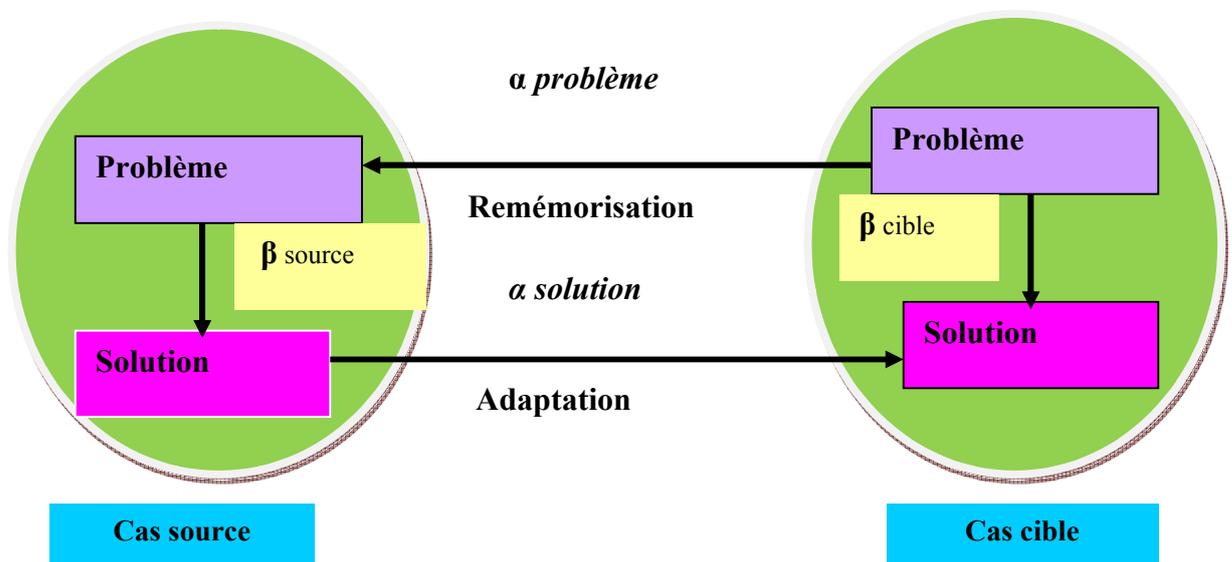


Figure III.1: Carré d'analogie.

α : similarité entre deux problèmes (cas)

β : trace du raisonnement menant à la solution

III.6.3.2. Représentation d'un cas

Un cas est une expérience représentée par une connaissance. Cette expérience constitue une leçon permettant au système de RàPC de résoudre des problèmes de différentes natures [25].

Un cas dans une base de cas représente différents types de connaissances qui peuvent être stockées selon différents formats de représentations. Un cas en RàPC est généralement composé de deux espaces disjoints : l'espace des problèmes et l'espace des solutions.

- L'espace problème concerne la partie dans laquelle on trouve les objectifs à atteindre « pb ».
- L'espace solution, il regroupe la description de la solution apportée par le raisonnement, sa justification, son évaluation ainsi que les étapes qui ont mené à cette solution « sol (pb) ». Cas= (pb, sol (pb)).

On peut distinguer deux types de cas : **cas source** et **cas cible**.

- **cas source**

Est celui dans lequel les parties « problème » et « solution » sont renseignées. Donc, c'est un cas dont on va s'inspirer pour résoudre un nouveau problème. Le cas source peut aussi contenir une autre partie appelée « information de qualité ». Cette partie contient des informations sur l'utilisation du cas dans le système.

- **cas cible**

C'est celui qui porte le problème et dont sa partie solution n'est pas renseignée.

Dans chacun de ces types de systèmes RàPC, un cas peut être représenté différemment. Selon les applications de RàPC, son problème et sa solution, sont décrits par un ensemble de descripteurs.

Un descripteur est tout caractérisé par une paire $d = (a, v)$.

Où :

a : est un attribut défini par un nom.

v : est la valeur qui lui est associée.

La définition de la formalisation de ces cas est :

- Un cas source est représenté par un couple (*srce*, *Sol (srce)*).
- Un cas cible est représenté par le couple (*cible*, *Sol (cible)*), où *Sol (cible)* est

inconnue et pour laquelle on voudrait lui apporter un résultat.

Comme les cas sont représentés par un ensemble de descripteurs alors :

- d_{si} (pour $i = 1, \dots, n$) : représente les descripteurs de la partie problème du cas source «srce ».
- d_{ci} (pour $i = 1, \dots, n$) : représente les descripteurs de la partie problème du cas cible «cible ».
- D_{si} (pour $i = 1, \dots, m$) : représente les descripteurs de la partie solution du cas source « *Sol (srce)* » ;
- D_{ci} (pour $i = 1, \dots, m$) : représente les descripteurs de la partie solution du cas cible « *Sol (cible)* ».

III.6.3.3. Base de cas (la mémoire dans les systèmes de RèPC)

Le bon fonctionnement et les performances d'un système de RèPC sont fortement liés à l'organisation de sa mémoire. En effet, la mémoire qui contient tous les cas sources précédemment retenus est appelée base de cas. La base de cas est un élément majeur dans l'indexation et l'organisation des cas afin de pouvoir les retrouver facilement et efficacement.

III.6.4. Cycle de Raisonnement à Partir de Cas (RèPC)

Le cycle de résolution de problème du RèPC a été proposé la première fois par Aamodt et Plaza [35]. Ces auteurs ont proposé les quatre étapes suivantes : Remémorer (Retrouver), réutiliser, Réviser, Mémoriser. Ce cycle a été complété plus tard par Mille, en ajoutant une étape supplémentaire avant la remémoration. Cette étape s'appelle « Elaboration » (figure III.2). Nous présentons ci-après une brève description des cinq étapes du cycle RèPC :

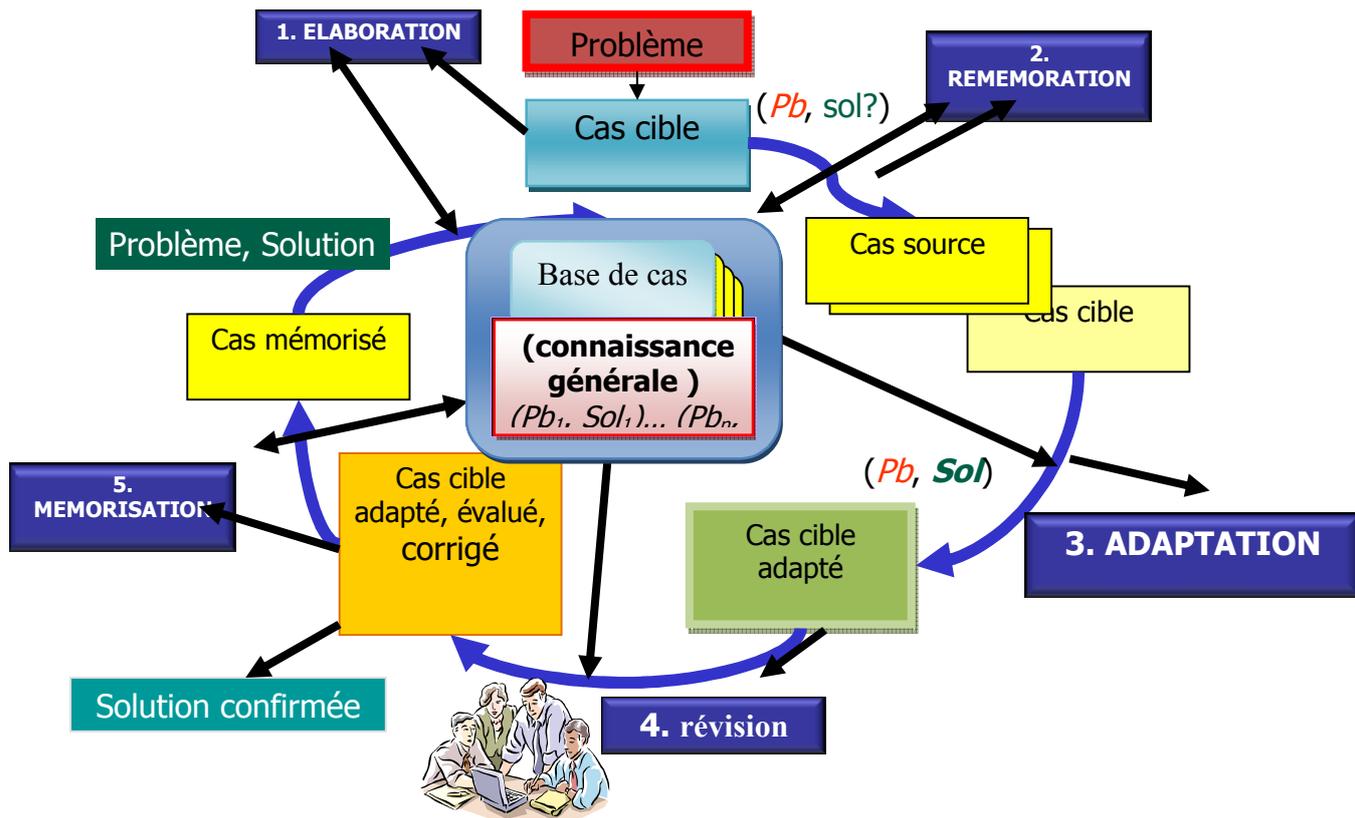


Figure III.2 : Cycle de Raisonnement à Partir de Cas (RàPC).

- **Elaboration** dans laquelle le cas cible est construite en complétant ou filtrant la description d'un problème à partir d'une description éventuellement incomplète.
- **Remémoration** des cas sources à partir de la base de cas en recherchant des correspondances entre descripteurs des cas sources et du cas à résoudre (cible).
- **Adaptation (Réutilisation)** consiste à construire une solution au problème du cas cible inspirée de la solution du (des) cas source(s) le(s) plus similaire(s).
- **Révision** de la solution proposée en cas d'une éventuelle solution insatisfaisante, alors il serait possible de la corriger. Dans ce cas, la solution est évaluée dans le monde réel en s'appuyant soit sur l'utilisateur, un expert humain, les connaissances du domaine ou sur un processus automatique.
- **mémorisation** consiste à stocker un nouveau cas résolu dans la base de cas si ce stockage est jugé opportun afin d'enrichir la mémoire du système.

Chacune des phases précédentes vont être détaillées comme suit :

III.6.4.1. Elaboration

La phase d'élaboration consiste à partir de l'entrée du système du RàPC, à construire le problème cible :

Élaboration : pré-cible \longrightarrow cible

Où, la pré-cible dénote l'entrée du système de RàPC, c'est-à-dire, le problème cible avant sa mise en forme. La mesure de similarité réalisée dans la phase de remémoration exprime ainsi l'importance et l'influence des descripteurs de problèmes pour sélectionner un cas dont la solution sera adaptable en vue de la résolution d'un problème cible. Cette phase nécessite deux tâches principales, création d'un cas et préparation de cas.

Lors de l'élaboration, un nouveau cas crée et la description du problème est ensuite complétée en collectant d'autres informations pertinentes pour le problème à résoudre. La deuxième tâche s'agit de préparer le cas, c'est-à-dire choisir les indices adéquats pour la recherche des cas. Ces indices sont les descripteurs du cas considérés comme pertinents pour la résolution du problème et utilisés comme critères de recherche dans la base de cas. Ceci est en vue de la remémoration en choisissant les indices à utiliser pour se remémorer un cas passé. Le rôle de l'élaboration est donc de construire les descripteurs influents afin que la recherche des cas proche puis l'adaptation soit efficace.

Dans notre étude, nous tenons compte de cette phase qui va être le point de départ du cycle de RàPC. En effet, notre élaboration consiste à exprimer une défaillance (panne) sous forme de cas cible.

III.6.4.2. Remémoration

La phase de remémoration est une étape importante dans le système de RàPC. L'une des hypothèses majeures dans le RàPC est de dire que des expériences similaires peuvent guider de futurs raisonnements, des résolutions de problèmes et permettre un apprentissage de la base de cas. La remémoration est donc le processus qui permet de retrouver des cas sources similaires au cas cible. Les cas sources similaires sont des cas qui ont besoin de moins d'adaptation. La mesure de similarité cherche la ressemblance entre les descripteurs des sources et cibles. Les tâches de remémoration consistent à « rechercher » des cas similaires, à les « apparier », c'est-à-dire les « évaluer et calculer la similarité », et enfin à « sélectionner » le cas source le plus adapté.

III.6.4.3. Techniques de recherche des cas similaires

Il existe différentes mesures pour calculer la similarité, ces mesures peuvent être locales ou globales [29].

- **similarités locales** : elles sont basées sur les caractéristiques du cas. Elles dépendent du type des caractéristiques et des rangs des valeurs des caractéristiques. Généralement, le calcul des similarités locales dépend du type de descripteur et est basé sur la distance.

- Pour les valeurs de descripteurs numériques :

$$sim(a,b) = 1 - \frac{|a-b|}{range} \quad (III.1)$$

- Pour les valeurs de descripteurs symboliques (mono-valeurs) :

$$sim(a,b) = \begin{cases} 1 \rightarrow a = b \\ 0 \rightarrow a \neq b \end{cases} \quad (III.2)$$

- Pour les valeurs de descripteurs symboliques (multi-valeurs) :

$$sim(a,b) = \frac{card(a) \cap card(b)}{card(a \cup b)} \quad (III.3)$$

- Pour les valeurs de descripteurs taxonomiques :

$$sim(a,b) = \frac{h(commonnode(a,b))}{\min(h(a), h(b))} \quad (III.4)$$

Où :

a et **b** : sont des valeurs des descripteurs.

Card : est la cardinalité de l'ensemble.

range : est la valeur absolue de la différence entre la borne supérieure et la borne inférieure de l'ensemble des valeurs.

h : est le poids (le nombre de niveaux) de l'arbre taxonomique.

- **similarités globales** : elles sont calculées au niveau des cas ou des objets en agrégeant les similarités locales. Plusieurs similarités globales sont utilisées dans les systèmes de RàPC et aucune d'elles n'est universelles et restent dépendantes du domaine concerné.

On peut citer:

- **Weighted Block-City**

$$sim(A,B) = \sum_{i=1}^n w_i sim_i(a_i, b_i) \quad (III.5)$$

- **la distance de Minkowski**. Si $r = 2$ alors on retrouve la distance **Euclidienne** et si $r = 1$ alors il s'agira de la distance de **Manhattan**.

$$sim(A,B) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n sim_i(a_i, b_i)^r \right]^{\frac{1}{r}} \quad (III.6)$$

- **Maximum based**

$$sim(A, B) = \max_i w_i sim(a_i, b_i) \quad (III.7)$$

Où :

n: est le nombre d'attributs,

w_i: est le poids (évalué en fonction de l'importance) de l'attribut *i*,

Sim_i: est la similarité locale calculée pour l'attribut *i*.

Plusieurs techniques de similarités existent dans la phase de remémoration : K plus Proches Voisins (KPPV), les approches inductives, la logique floue ou encore les réseaux neurones.

Nous décrivons par la suite les deux approches plus utilisées dans ce domaine : L'approche K plus Proches Voisins ainsi que les approches inductives.

- **L'approche K plus Proches Voisins**

La technique K Plus Proches voisins est une technique la plus utilisée dans les RàPC. Cette technique est établie selon la mesure de Minkowski. Elle est basée sur les poids des descripteurs. **w_i** qui évalue la similarité entre les cas sources de la base de cas et le cas cible. Le poids permet alors de modifier l'importance d'un descripteur par rapport à un autre descripteur. La partie la plus délicate dans cette technique est de définir les poids des descripteurs. Dans l'équation suivant [33].

$$sim(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i sim(a_i, b_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (III.8)$$

n: est le nombre d'attributs,

w_i: est le poids (évalué en fonction de l'importance) de l'attribut *i*,

a_i: valeur du descripteur cas cible.

b_i: valeur du descripteur cas source.

- **Les approches inductives**

Les approches inductives déterminent quels sont des descripteurs qui apportent un meilleur effet pour une discrimination des cas. Les algorithmes d'induction, tels que ID3 et CART (classification And Regression Trees) [36], permettent de construire des arbres de

décision à partir des cas de la base de cas. Ces algorithmes d'induction, divisent les cas en grappes. Chaque cluster contient des cas similaires. Les techniques d'induction sont utilisées majoritairement comme des classificateurs pour regrouper des cas similaires. Ils déterminent quels descripteurs sont à même de mieux distinguer les cas, et de générer une structure de l'arbre de décision pour organiser le cas de la base de cas.

III.6.4.4. Adaptation

L'adaptation dans le cycle du RèPC est le processus proposant une solution à un nouveau problème à partir des solutions appartenant aux cas sources mémorisés [29].

Fuchs et al. [37] considèrent l'adaptation comme un plan dont l'état initial est la solution de départ et l'état final est la solution adaptée.

Lieber et al [38] Considèrent que la phase d'adaptation consiste à effectuer un raisonnement par analogie : « **Sachant que la solution du cas cible est à la solution du cas source ce que le cas cible est au cas source, connaissant le cas source et sa solution ainsi que le cas cible, que vaut la solution du cas cible** ». L'adaptation détermine « l'inférence analogique » en calculant la solution possible au problème du cas cible inspirée de la solution du cas source le plus similaire. Cette phase peut se faire soit via une intervention humaine (manuelle), par copie ou automatiquement à l'aide d'algorithmes, de méthodes, de formules, de règles, etc. Concernant l'adaptation automatique, nous déterminons les principaux types d'adaptation automatique, qui sont [29] :

- **L'adaptation générative** part du fait que nous disposons de toutes les connaissances pour résoudre le problème à partir de zéro. Le cas retrouvé retrace le raisonnement ayant mené à la solution.
- **L'adaptation transformationnelle** est contraire à la précédente, c'est-à-dire qu'on ne dispose pas de toutes les connaissances pour résoudre le problème à partir de zéro.
- **L'adaptation compositionnelle** utilise deux ou plusieurs cas similaires mémorisés pour effectuer l'adaptation en composant les différentes solutions proposées.
- **L'adaptation hiérarchique** où les cas sont organisés à plusieurs niveaux dans la hiérarchie de généralisation.

Nous exploitons l'adaptation générative et hiérarchique pour manipuler les cas de diagnostic du système de RèPC.

III.6.4.5. Révision

La solution obtenue à l'issue de la phase de réutilisation doit être testée afin de vérifier si elle convient pour résoudre le problème. Les différences entre la solution proposée et la solution révisée constituent des échecs de raisonnement.

La révision permet de prendre en compte des échecs non-prévu, trahissant des connaissances manquantes ou perfectibles. Elle ouvre la voie un processus d'apprentissage permettant de compléter ou de corriger les connaissances du système ayant mené à cet échec [35].

Globalement deux parties sont nécessaires à la réalisation de cette phase : l'évaluation de la solution produite par adaptation, et la réparation de la solution en réutilisant la connaissance de domaine spécifique.

Selon Mille, l'objectif de cette phase est de faire le bilan d'un cas avant sa mémorisation et son apprentissage. Cet auteur propose trois étapes à réaliser lors de cette phase :

- Faire une introspection dans la base de cas en utilisant l'ensemble des descripteurs problème et solution pour que les cas similaires au problème cible ont bien donné satisfaction.
- Utiliser une autre méthode d'évaluation de la solution.
- Essayer la solution dans le « monde réel ».

Dans tous les cas, s'il y a divergence entre ce qu'a été construit comme solution et ce qui aurait fallu faire, il est important :

- Corriger de façon à ce que le cas puisse être mémorisé comme un cas associé à une solution correcte.
- Tracer éventuellement, l'écart et de l'expliquer sous forme d'exception (ce qui revient à particulariser une forme d'adaptation en zone plus petite pour la classe de solution).

III.6.4.6. Mémorisation et apprentissage

Lorsqu'un cas a été validé par l'utilisateur, il est important de le sauvegarder dans la base de cas pour une réutilisation ultérieure. La mémorisation est la phase de stockage et d'enrichissement de la base de cas. Il est intéressant de pouvoir sélectionner les cas à mémoriser. En effet, certains cas peuvent être très proches, et donc la mémorisation peut conduire à une duplication des informations de la base.

Selon Bénard et De Loor, il est nécessaire d'ajouter un cas lorsque [42]:

- Le contexte de ce dernier ne peut pas être complètement identifié avec celui d'un cas de la base.
- L'objectif pour un contexte identique est différent de celui qu'on connaissait dans la base.
- L'action pour atteindre un objectif est nouvelle, elle n'était pas présente dans les actions permettant d'atteindre l'objectif.

III.6.5. Composants d'un système RàPC

Un système RàPC est une combinaison de processus et de connaissances, qui permet de préserver et d'exploiter les expériences passées, Lamontagne et Lapalme [40] présentent un modèle générique d'un système de RàPC. Ce dernière met en évidence l'aspect « connaissances ».

III.6.6. Systèmes à base de connaissances

Les systèmes de RàPC sont définis comme des systèmes à base de connaissances (SBC). Ils exploitent quatre containers de connaissances distincts à savoir [27]:

- **Le container de vocabulaire**

Il contient toutes les informations sur les définitions et les structures utilisées. Lieber et al [38] définissent le container de vocabulaire comme étant l'ensemble des éléments de représentation atomiques utilisés pour représenter les cas dans la base de cas.

- **le container des mesures de similarité**

Il contient les mesures nécessaires pour la recherche des cas. Ce container fait appel à ces mesures pour le calcul de la similarité ou la dissimilarité afin de déterminer, lors de la phase de remémoration, les cas sources les plus appropriés au nouveau cas cible.

- **le container d'adaptation**

Il contient les règles de transformation de la solution et d'algorithmes décisionnels. Ce container contribue à la modification des cas sources pour s'adapter au mieux au cas cible.

- **Le container de la base de cas**

Il représente le contenu et l'organisation de la base de cas. C'est le container dans lequel sont stockées toutes les expériences (cas) [40].

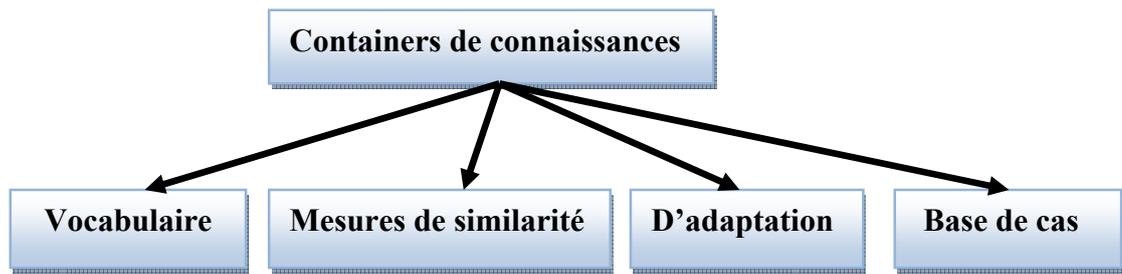


Figure III.4 : Containers de connaissances.

III.6.7. Formalisation et organisation des cas dans le système du RàPC

Après avoir vu les principes d'un système du RàPC. Nous verrons de quelle manière sont organisées les connaissances issues des cas ainsi que les différentes phases de construction de ces connaissances pour en créer un cas.

III.6.7.1. Résolution de problèmes et système interprétatif

Selon Fuchs il existe deux types de raisonnement dans le RàPC, les systèmes de résolution de problèmes et les systèmes interprétatifs (figure III.5) [30].

Dans les systèmes de résolutions de problèmes, le problème est décrit par l'énoncé d'un ensemble de données ou état initial, selon un but à satisfaire qui n'est pas formulé. Mais il s'agit de le découvrir par un mode d'évaluation des situations. Un système interprétatif élabore une justification en comparant et en établissant des relations entre les problèmes.

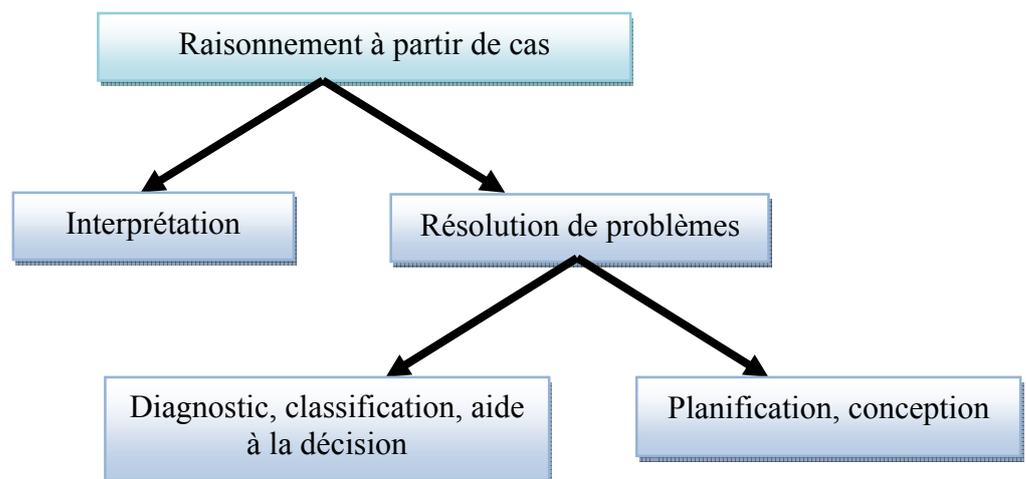


Figure III.5 : Classification des différents types de problèmes.

Nos travaux situent dans le domaine de la résolution de problèmes et plus précisément sur les systèmes liés au diagnostic de pannes et aide à la décision.

Dans notre travail, le cas du diagnostic décrit une situation de diagnostic qui est représenté par le composant défaillant. Le but est alors de résoudre un problème de panne et de trouver les causes des défaillances en proposant la bonne démarche de réparation.

III.6.8. Indexation du cas

Les cas sont organisés dans une mémoire appelée base de cas. Afin de faciliter cette organisation et ainsi la recherche du cas le plus approprié au problème posé, il faut désormais les indexer. Il est à noter que lors de la recherche des cas, c'est la partie problème qui va être sollicitée. Or, cette partie problème est décrite par un ensemble de caractéristiques pertinentes nommées « **indices** ». Ces indices vont déterminer dans quels contextes et dans quelles situations les cas vont être recherchés et retrouvés pour les proposer au problème rencontré.

Alors il faut trouver le moyen de bien manipuler ces indices pour une configuration optimale. Pour cela, la communauté de RàPC propose plusieurs lignes directrices pour le choix des index adaptés à des cas particuliers. Comme le précise Kolodner chaque indice doit être [44].

- **Prédicatifs** afin de jouer un rôle déterminant dans le choix d'une solution pour un nouveau problème.
- **Suffisamment abstraits** pour que le cas ait la possibilité d'être utilisé plusieurs fois pour la résolution de plusieurs problèmes.
- **Suffisamment concrets** pour que le cas soit reconnu le plus rapidement possible pour la résolution d'un nouveau problème.

III.6.9. Modèle d'organisation des cas dans une base de cas

Nous pouvons distinguer deux types d'organisation de la base de cas :

- **Base de cas plate** dans laquelle les cas sont organisés de manière linéaire (vecteur, tableau, graphe... etc.). Autrement dit, les cas sont stockés dans une liste séquentielle. C'est sans doute l'organisation la plus simple.
- **Base de cas hiérarchique** dans laquelle la structuration et l'organisation des cas est faite selon des niveaux hiérarchiques donnés.

Cependant, lors de la création d'une base de cas, trois points principaux doivent être Considérés :

- La structure et la représentation des cas.
- Le modèle de la mémoire utilisée pour organiser la base de cas.
- La sélection des indices qui sont utilisés pour identifier chaque cas.

En effet, lorsque nous évoquons la base de cas, qui représente le cœur du système de RàPC, nous lui associons forcément les cas (dans notre étude il s'agira des cas dédiés au diagnostic). Alors, lorsqu'une panne (défaillance) se produit, il faut localiser le problème, décrire le contexte de diagnostic et donner une stratégie de maintenance. Pour réaliser ces différentes étapes, nous devons passer par différentes phases du cycle du RàPC.

III.6.10. Domaines d'application RàPC

Le RàPC possède de nombreuses applications dans des domaines très divers permettant d'accomplir des tâches de différentes natures. Parmi les domaines dans lesquels le RàPC est plus couramment utilisé, nous pouvons citer les domaines médicaux, industriel, commercial, judiciaire, l'analyse financière, la maintenance, l'enseignement et les services de consultation.

III. 6.10.1. Type d'applications

Althof [29] introduit la notion de la hiérarchie des applications par rapport à la complexité de la résolution de problème. En effet, il propose quatre niveaux hiérarchiques parmi ces niveaux hiérarchiques, nous nous intéressons aux deux premiers niveaux à savoir :

- **La classification** se trouve au premier niveau de la hiérarchie dans laquelle la solution du problème est en relation avec la sélection d'une ou plusieurs classes.
- **Le diagnostic** vient juste après, car il est considéré comme une généralisation de la classification. Cette généralisation concerne la connaissance générale du domaine qui va rechercher les informations nécessaires (symptômes) dans un processus de diagnostic.

III.6.10.2. Conditions d'applications

L'application du RàPC est conditionnée par un certain nombre d'hypothèses par rapport au type d'application ou le domaine étudié [35] :

- **Similarité**

L'utilisation d'anciens cas pour en résoudre de nouveaux qui lui sont similaires est fondée sur l'hypothèse que des problèmes semblables peuvent être résolus par des solutions semblables.

- **Facilité d'adaptation**

Les différences entre les descriptions des problèmes des cas sont faibles et peuvent être évaluées facilement.

- **Typicalité**

Les problèmes se répètent et les expériences apprises peuvent être essentielles dans le futur.

- **Régularité**

Les mêmes actions menées (solutions proposées) dans les mêmes conditions (description d'une situation) ont des conséquences identiques ou proches.

- **Cohérence**

Les différents petits changements qui peuvent apparaître dans l'univers nécessitent seulement des petits changements dans la façon d'interprétation et engendrent que de faibles transformations dans les solutions.

Main et al. [49] estiment que l'approche du RàPC ne peut être appliquée que si un certain nombre de caractéristiques des problèmes et de leur domaine sont réunies.

- **L'importance de l'apport de l'adaptation des solutions des cas existants dans la base de cas**

Si la construction entière d'une solution n'est pas significative par rapport à l'obtention de la même solution par l'adaptation alors le système à étudier peut être conçu avec une méthode autre que le RàPC. Cet apport est jugé suivant un certain nombre de critères tels que : le traitement de l'information et le temps de résolution mis par le système.

- **La reproduction des situations**

Si les cas ne sont pas suffisamment similaires aux problèmes posés pour qu'ils soient adaptés, alors il vaut mieux utiliser un modèle qui construit complètement la solution qu'une approche qui s'appuie sur la réutilisation des solutions.

- **Les nouveaux cas et les exceptions**

Si le domaine étudié ne fait pas apparaître de nouvelles situations ou d'exceptions alors il convient de mettre en place une modélisation gérée par des règles.

Si toutes les conditions nécessaires sont réunies, alors la mise en place d'un système de RàPC est admise et l'étude du domaine d'application peut commencer.

Cette étude dépend donc de la nature de l'application, de ses caractéristiques et des objectifs à atteindre.

Les systèmes de RàPC diffèrent entre eux par la formalisation du cas, l'utilisation de modèles de connaissance, les étapes du cycle et les différents algorithmes et méthodes utilisés dans chacune des étapes. Les conditions d'applications définies ci-dessus sont réunies par la similarité, la facilité d'adaptation, la typicalité, la régularité et la cohérence, pour définir un système de diagnostic orienté connaissance.

Cependant, les principaux inconvénients du RàPC résident dans sa mise en œuvre. Il est en effet très difficile de définir et représenter un cas, d'organiser la base de cas, d'indexer les cas, de définir les bonnes mesures de similarité et de trouver une bonne stratégie d'adaptation.

III.7. Modèles de RàPC

Les systèmes utilisant le RàPC comme approche de résolution de problème peuvent disposer de plusieurs modèles. Ces modèles peuvent être regroupés en trois grandes familles à savoir : les modèles conversationnels, textuels et structurels.

a. Le modèle structurel

Dans le modèle structurel, toutes les caractéristiques importantes pour décrire un cas sont déterminées à l'avance par le concepteur de système. Ainsi, le concepteur élabore un modèle de données du domaine applicatif. A partir de ce modèle de données, les cas sont complètement structurés et représentés tels des paires <attribut, valeur>. D'un point de vue applicatif, un attribut représente une caractéristique importante du domaine d'application. Les échelles de valeurs les plus fréquemment utilisées pour structurer les attributs sont les Entiers/réels et les symboles. La représentation des cas peut être sur un seul niveau (simple) ou sur plusieurs niveaux (hiérarchiques).

La similarité entre deux cas est mesurée en fonction de la distance entre les valeurs de mêmes attributs. L'adaptation peut varier d'une simple substitution de la valeur d'un attribut jusqu'à la restructuration complète d'une solution [42].

b. Le modèle textuel

Selon Lamontagne, les travaux sur le raisonnement à partir de cas textuels portent sur la résolution de problèmes à partir d'expérience dont la description est contenue dans des

documents textuels [46]. Dans cette approche, les cas textuels soient non-structurés ou semi-structurés.

- **Les cas non-structurés** sont les cas qui disposent que d'un seul attribut dont la description est complètement en texte libre.
- **Les cas semi-structurés** sont les cas qui disposent de plusieurs attributs étiquetés contenant du texte.
- **Un cas textuel non-structuré** est un cas dont le seul attribut est textuel tandis qu'un cas textuel semi-structuré est un cas dont un sous-ensemble de ses attributs est textuel.

Il existe deux pôles dans les différents travaux en RàPC textuel :

- **La structuration de cas textuel** qui représente les textes selon un nombre limité d'index basés sur des caractéristiques du domaine (concepts, mots-clés).
- **l'extension du modèle de recherche d'information** qui travail sur l'élaboration de mécanismes de recherche plus sophistiqués tout en gardant le processus d'indexation possible le plus simple. Le choix des index de cas est déterminé à partir de la fréquence de mot-clé.

c. Le modèle conversationnel

Dans l'approche structurelle, un problème doit être écrit complètement avant de commencer la recherche dans la base de cas.

Le modèle conversationnel permet de définir progressivement le problème avec une brève description d'un problème dès le départ, ainsi qu'une série de question-réponses.

Par la suite cela permet de préciser au fur et à mesure le problème à résoudre le conversationnel est l'un des modèles de RàPC le plus répandu parmi les applications commerciales du RàPC [40].

III.8. Avantage de RàPC

L'approche du RàPC présente de nombreux atouts tels que [33]:

- La réduction des efforts dans l'acquisition de la connaissance.
- La facilité de maintenance.
- L'amélioration de la performance par association des solutions existantes.
- L'utilisation des solutions existantes, la pro-activité (amélioration avec le temps).

- L'élimination des connaissances superflues, la structuration de la connaissance (cas).
- La flexibilité et la souplesse de cas systèmes par rapport à l'acquisition des données et son pouvoir d'adaptation quant aux changements de l'environnement

III.9. Conclusion

Parmi les différents types de systèmes de diagnostic, Notre choix s'est porté sur le raisonnement à partir de cas (RàPC). Car elle permet de raisonner sur un nombre restreint des cas et permet ainsi de s'affranchir d'une longue étape de récolte de données dédiée à l'entraînement du modèle.

Ceci nous a amené à présenter les notions du diagnostic. Puis, nous avons décrit d'une manière détaillée l'approche de RàPC. Dans le chapitre suivant nous présenterons l'état de l'art des systèmes de RàPC. Afin de prendre l'un des modèles de RàPC comme référence, pour développer le système d'aide au diagnostic des pannes par RàPC, qui est dédié au système de pompage photovoltaïque.

Chapitre IV

Etat de l'art des systèmes de RàPC

IV.1. Introduction

Dans le présent chapitre nous présentons l'état de l'art des différents systèmes de RàPC dédiés au diagnostic, l'analyse de ces derniers est faite autour des principaux points suivants : la modélisation des connaissances, la représentation du cas, la phase de remémoration et la phase d'adaptation.

Cette étude a pour objectif la comparaison de ces systèmes selon les points évoqués et de situer nos travaux par rapport à l'existant afin de caractériser le système d'aide au diagnostic à mettre en place. Qui est présenté par le système orienté connaissance.

Ensuite, Nous présentons ce type de système, inspiré d'un modèle de RàPC dans les travaux de *Lamontagne* et *Lapalme*. En effet, ce système prend appui sur des modèles de connaissance, que nous pouvons aisément définir à partir de la modélisation de notre équipement. Dans ce cas nous développons une formalisation du cas à partir de la définition de référence du diagnostic, une phase d'élaboration spécifique et d'une phase de remémoration et d'adaptation dans le cycle de RàPC.

IV.2. Présentation des différents systèmes de RàPC dédiés au diagnostic Industriel

Dans la littérature, il existe plusieurs types de systèmes de RàPC. Le tableau (IV.1) représente les principaux de ce dernier qui sont dédié au diagnostic industriel, ainsi que leurs caractéristiques [25]. A partir de tableau (IV.1), nous pouvons constater qu'il y a deux types de systèmes : les systèmes orientés mining et les systèmes orientés connaissance.

Les systèmes orientés connaissance tels que Gas Turbine, Creek, Cassiopee, Pad'im, Nodal_{CBR}, Patdex, utilisent des modèles de connaissance différents les uns des autres. Contrairement aux systèmes orientés mining tels que Iracus et FormTool qui n'en utilisent pas. Toutefois, le système Gas Turbine est implémenté grâce à un outil de développement nommé TrollCreek. KEE est un outil de développement système expert hybride implémentant le système Nodal_{CBR}.

Enfin, Cassiopee est construit à l'aide d'un outil de développement de RàPC commercial Kate. Creek, Patdex et Pad'im sont des systèmes académiques et sont donc créés à l'aide de systèmes de représentation des connaissances. Quant à la structure de la

base de cas, elle est pour la plupart des Systèmes de nature plate, sauf pour Gas Turbine, Iracus et Pad'im dans lesquels elle est hiérarchique.

Système de RàPC	Domaine d'application	Type de système de RàPC	Outil de développement	Modèle de connaissance	Structure de la base de cas
Gas Turbine	Turbines à gaz dans General Electric Energy	Connaissance	TrollCreek	Modèle probabiliste par réseaux bayésiens	hiérarchique
Creek	Voitures	Connaissance	/	Modèle général du domaine	plate
Cassiopee	Moteurs d'avions Boeig 737	Connaissance	Kate (Kaidara)	Conversationnel + poids	Plate
Iracus	Locomotives	Mining	/	Pas de modèle	hiérarchique
Form Tool	Plastic (couleurs)	Mining	/	Pas de modèle	Plate
Pad'im	Supervision industrielle	Connaissance	/	Objets de supervision, Modèle hiérarchique, modèle de contexte général	hiérarchique
Nodal _{CBR}	Energie de mode de commutation (SMPS)	Connaissance	KEE	Modèle de classification sous forme d'arbre	Plate
Patdex	Machines complexes	Connaissance	/	Graphe d'expérience + un modèle de contexte (règles causales)	Plate

Tableau IV.1 : Tableau des principaux systèmes de diagnostic industriel des machines complexes par rapport à la nature de l'application et l'environnement de connaissance.

On s'intéresse dans le Tableau (IV.2) à la représentation du cas ainsi qu'aux trois phases du cycle de RàPC à savoir : la remémoration, l'adaptation et la maintenance de la base de cas. La représentation du cas le plus utilisé est une liste de descripteurs représentée par des attributs-valeurs. Ces descripteurs peuvent être de différents types : symboliques, numériques, ...etc.

Concernant les systèmes orientés connaissance, ils disposent de diverses natures de représentation allant des représentations complexes telles que les nœuds contenant l'état des composants pour « *Gas Turbine* », l'ensemble de concepts pour « *Creek* » et la liste des descripteurs hiérarchisés pour « *Cassiopee* » jusqu'à la simple représentation sous forme de liste de descripteurs.

Dans la phase de remémoration, l'algorithme des k plus proches voisins (KPPV) est le plus utilisé (Iracus, FormTool, Pad'im et Padtex). Il est associé à des mesures de similarité spécifiques au domaine d'application et à des méthodes inductives exploitant la base de cas.

Le système orienté mining « *FormTool* » utilise une mesure de similarité orientée adaptabilité. Cependant, elle n'est pas assez développée. Quant aux systèmes orientés connaissance, seul le système « *Creek* » emploie une remémoration guidée par l'adaptation. Toutefois, ce dernier ne détaille pas la façon de procéder au cours de cette remémoration guidée.

En ce qui concerne la phase d'adaptation, elle se révèle d'être une phase sensible car soit que les systèmes ne présentent pas d'adaptation (Gas Turbine, Iracus et NodalCBR) soit qu'ils proposent de simples règles d'adaptation (FormTool) ou des graphes d'expériences (Padtex) ou encore ils utilisent une structure hiérarchique de la base de cas. Afin de réaliser une adaptation substitutionnelle au niveau des descripteurs de cas (Pad'im). Le système *Creek* combine l'adaptation générative, en se basant sur la structure hiérarchique, avec la trace de raisonnement. Cette technique essaie de palier au manque d'une éventuelle évolution du système en gardant une trace du raisonnement.

Cependant, l'exploitation de la relation entre les phases de remémoration et d'adaptation est peu utilisée. En effet, contrairement aux systèmes orientés mining, les systèmes orientés connaissance approfondissent le développement de ces phases, mais il n'y a que le système *Creek* qui propose une liaison entre ces deux phases mais sans vraiment l'expliquer.

Quant à la phase de maintenance de la base de cas, nous constatons que la plupart des systèmes n'en disposent pas, à savoir cinq systèmes sur huit. Cette phase est mise en place quand le système de diagnostic arrive à maturité. Les systèmes exploitant cette phase, notamment *Creek* et *Cassiopee*, restent au niveau de la connaissance ou du raffinement de la base de cas, sinon ils impliquent un module extérieur du système tel que *Moltke* pour le système *Cassiopee*. Les systèmes orientés *mining* (Iracus et *FormTool*) n'en possèdent pas.

Système de RàPC	Représentation du cas	Remémoration	Adaptation	Maintenance de la base de cas
GasTurbine	Nœuds contenant l'état de composants	Calcul probabiliste des valeurs de signaux discrétisés	Pas d'adaptation	Pas de maintenance
Creek	Ensemble de concepts formant une liste descripteurs	Orientée adaptabilité, mesure de similarité sémantique	Trace de raisonnements + généralisation d'attributs	Connaissances dans la base
Cassionpee	Liste des descripteurs hiérarchisés	Similarité locale (les attributs du cas + similarité globale (les classes d'objets))	transformationnelle	Raffinement de la base de cas
Iracus	Liste des descripteurs	Algorithme des KPPV+ mesure de similarité pondérée en fonction du code de réparation	Pas d'adaptation	Pas de maintenance
Form Tool	Liste des descripteurs	Orientée adaptabilité, algorithme des KPPV+ similarité par terme linguistique floue	Fonction spécifique relative aux Caractéristique des couleurs	Pas de maintenance
Pad'im	Ensemble d'objets de supervision et de connaissances	algorithme des KPPV+ mesure de similarité conceptuelle	Substitutionnelle	Pas de maintenance
Nodal _{CBR}	Liste des descripteurs	Sélection de caractéristiques discriminantes à partir d'un arbre de décision	Pas d'adaptation	Pas de maintenance
Patdex	Liste des descripteurs	algorithme des KPPV+ arbres de décision mise à jour des mesures de similarité par apprentissage	Graphes d'expériences	Dansmoltke

Tableau IV. 2 : Tableau récapitulatif des principaux systèmes de diagnostic industriel des machines complexes par rapport aux phases du cycle de RàPC.

Cette étude comparative nous permet de situer notre travail et de faire des choix quant à la création d'un système de diagnostic par RàPC. Nous développons un système orienté connaissance d'aide au diagnostic par RàPC qui sera dédiés aux systèmes de pompage photovoltaïque.

Néanmoins. Pour la base de cas, nous utilisons une structure plate pour notre système de pompage photovoltaïque. La représentation du cas est sous forme de liste d'attributs-valeurs, pour le système étudié, Les valeurs sont de type modal et numérique. Le cas représente l'expertise du domaine qui est basée sur l'utilisation des outils de sûreté de fonctionnement et des modèles de connaissance.

Nous traduisons sous forme de cas l'analyse de dysfonctionnement de l'équipement issu d'un retour d'expérience terrain.

Dans la phase de remémoration et d'adaptation, nous présentons un état de l'art ainsi qu'une proposition d'une phase de remémoration guidée par l'adaptation et un algorithme d'adaptation.

IV.3. Méthodologie proposée pour un système d'aide au diagnostic

Un des buts recherchés lors de la conception du système d'aide au diagnostic et à la réparation est de capitaliser la connaissance experte d'un opérateur lors d'un dépannage et de la partager entre opérateurs afin d'améliorer la performance et l'efficacité des interventions du service de maintenance [25].

Nous proposons une méthodologie pour pallier au manque d'expertise en appliquant des méthodes d'analyse relative à la sûreté de fonctionnement, à savoir : l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance de leurs effets et de leur Criticité) et les arbres de défaillances, qui identifient les défaillances possibles d'un équipement donné. Ce qui permet d'élaborer un cas de diagnostic et l'analyse fonctionnelle qui a pour but la modélisation hiérarchique d'équipement (figure IV.1).

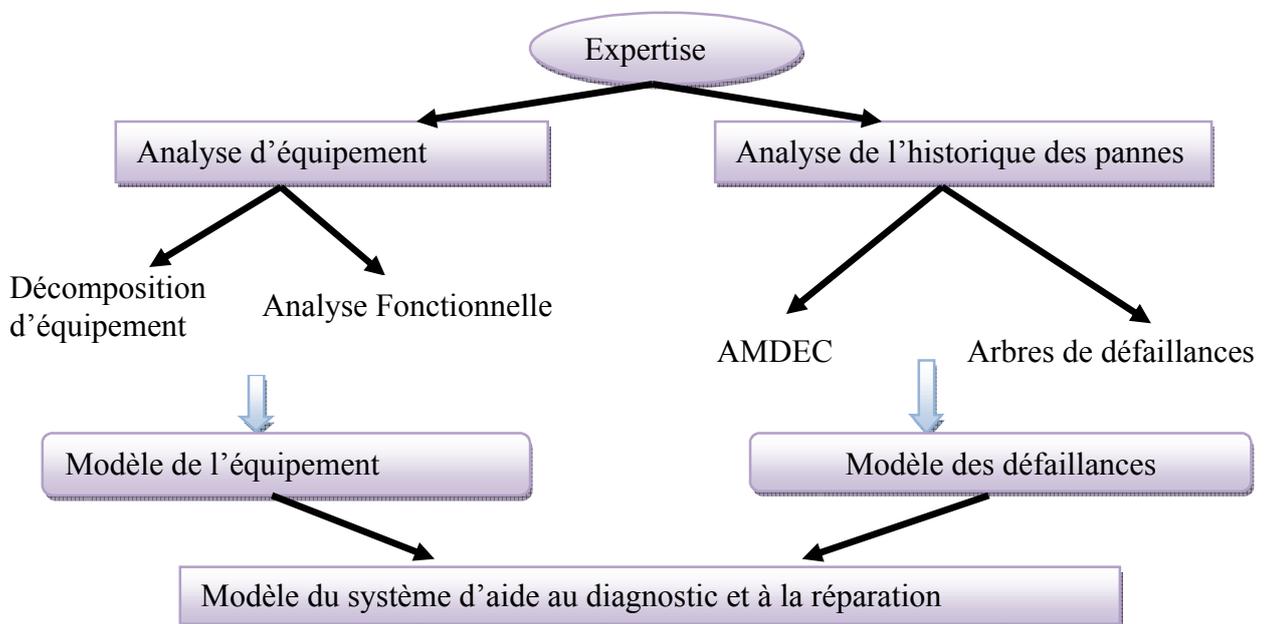


Figure IV.1 : Expertise de l'équipement.

IV.4. Description générale d'un modèle de système de RàPC

Nous partons d'une description générale d'un modèle de système de RàPC que nous déclinons suivant le type de système traité. En effet, nous nous inspirons du modèle initié par Lamontagne et Lapalme [40].

Nous exploitons le modèle de système de RàPC. En effet, dans le processus on-line, nous lui rajoutons la phase « d'élaboration du cas cible » (figure IV. 2).

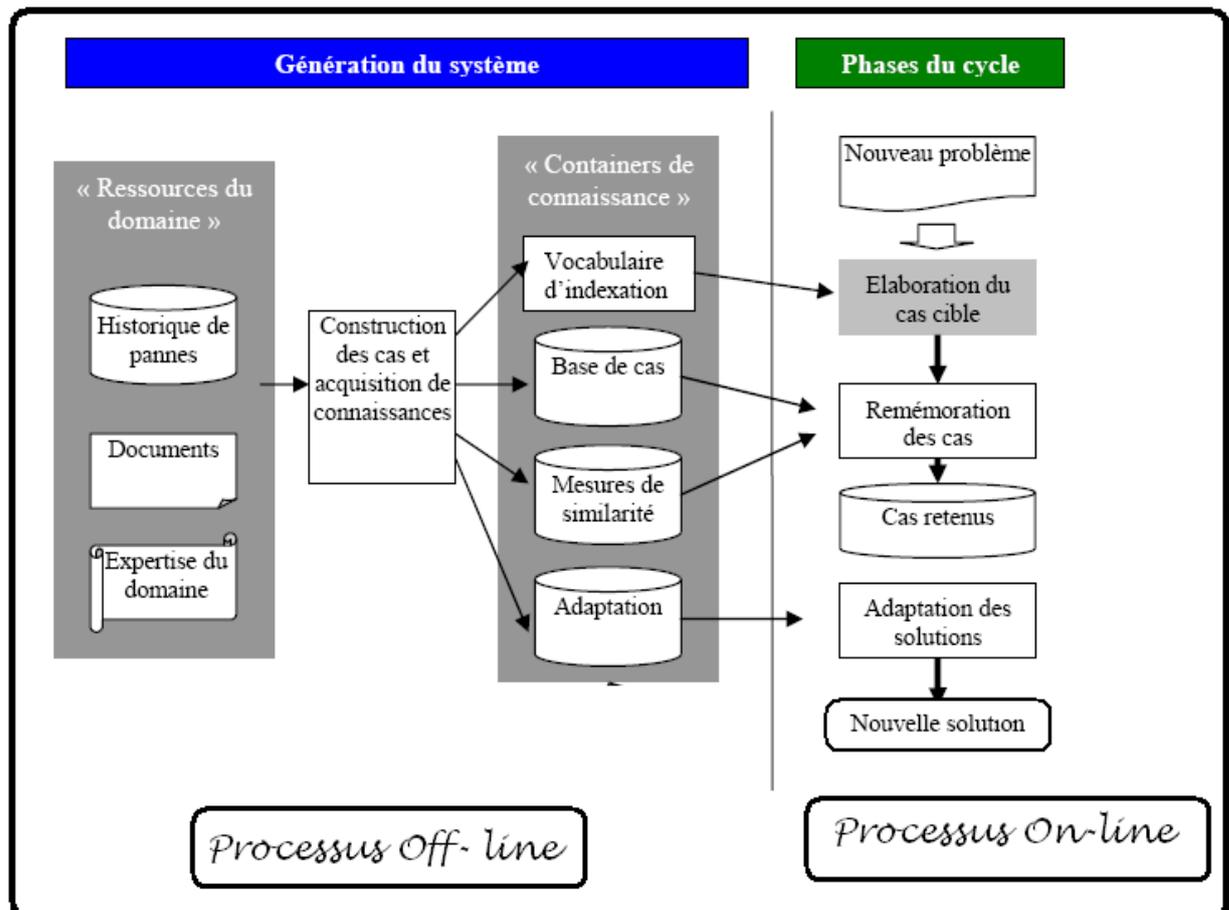


Figure IV.2 : Modèle de base d'un système de diagnostic par RàPC.

Ce modèle de base met en évidence les quatre containers de connaissance qui sont créés dans le processus off-line, ainsi que le cycle du RàPC exploité dans le processus on-line. Ce dernier processus débute à partir de la génération d'un nouveau problème jusqu'à la nouvelle solution donnée au problème qui est prête à être stockée dans la base de cas.

IV.4.1. Systèmes orientés connaissances (knowledge)

Ce type de système dispose de cas qui ont une formalisation spécifique et qui sont associées à des modèles de connaissance du domaine et de phases de remémoration et d'adaptation sont plus élaborés. Ce système à l'avantage de réduire le nombre de cas dans la base de cas et de raisonner sur un nombre limité en prenant appui sur des modèles de connaissances liées à notre équipement [32].

Le système à étudier, notamment le banc d'essais des systèmes de pompage photovoltaïque dispose des composants pouvant être caractérisés par leur valeurs, leur états et leur modes de fonctionnement (normal, anormal), ainsi que le contexte dans lequel les composants se trouvent grâce à l'étude de L'AMDEC et des arbres de défaillances.

Nous prenons appui sur le modèle de base d'un système de RàPC (figure IV.2). Nous associons à ce modèle de base les modèles de connaissance. Ces modèles sont liés à l'expertise qui reflète l'analyse de dysfonctionnelle des composants de l'équipement sous forme de base de cas. La création des modèles de connaissances est réalisée grâce à l'analyse de l'équipement et sa décomposition. De plus, nous mettons en place un cas adapté au diagnostic pour la création de notre système. Nous présentons les modèles de connaissance sous-jacents à la base de cas du système à diagnostiquer ainsi que la manière de construction du cas prenant appui sur la définition de référence du diagnostic.

IV.4.1.1. Ressources du domaine

Dans les systèmes orientés connaissance, l'expertise terrain est exploitée grâce aux outils de sûreté de fonctionnement tels que l'AMDEC, l'historique de pannes et les arbres de défaillances. Les ressources du domaine englobent tous ces outils en plus de la documentation du système à diagnostiquer telles que la documentation technique, la documentation liée aux outils nécessaires au fonctionnement du système, la documentation concernant les pièces de rechange, etc.

De ce fait, nous pallions le manque d'expertise en exploitant tous ces outils d'expertise pour construire un cas de diagnostic.

IV.4.1.2. Containers de connaissances

La mise en œuvre d'un système de RàPC passe tout d'abord par l'acquisition et la représentation des données et des connaissances en présence lors de la construction du cas.

Cette partie concerne la mise en place des modèles de connaissance du système de RàPC.

IV.4.1.3. Modèle de gestion des connaissances du système de RàPC

La représentation des connaissances de notre système de RàPC dédié au diagnostic est décrite par le schéma de la (figure IV.3). Elle est composée de deux modèles : le modèle de l'équipement et le modèle de taxonomie des composants, complétant la partie dysfonctionnelle de notre système qui est la base de cas, et par des règles de décision déterminant le mode de fonctionnement des composants du système de pompage photovoltaïque.

Le modèle de l'équipement est issu d'une décomposition de l'équipement du système étudié qui détermine les fonctions assurées par l'équipement et ses composants. Le modèle de taxonomie des composants est déterminé à partir de leur analyse fonctionnelle. Le contenu de la base de cas est constitué de l'ensemble des cas de diagnostic [51].

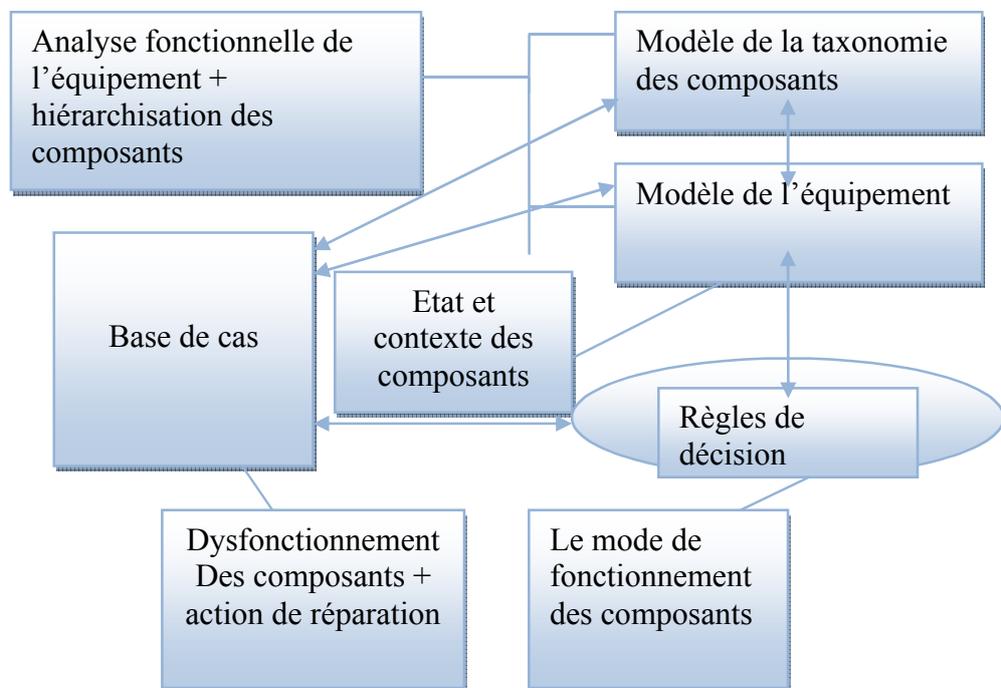


Figure IV.3 : Schéma représentant le modèle de gestion des connaissances d'un Système de RàPC orienté connaissance dédié au diagnostic technique.

IV.5. Construction du cas de la base de cas

Pour construire un cas de la base de cas, nous prenons appui sur la définition de référence du diagnostic : « Ce sont les actions menées pour la **détection** de la panne, sa **localisation** et l'**identification** de la cause ». Le diagnostic est composé de trois parties : la partie de détection de la panne, la partie concernant la localisation de la zone dans laquelle la panne s'est produite et la partie d'identification du composant défaillant.

La conception du cas prend en compte ces trois parties et s'appuie sur les modèles de connaissances de l'équipement à diagnostiquer abordés précédemment.

Les trois parties du cas sont :

- **Détection**

Nous déterminons sur l'équipement la classe de défaillance en prenant appui sur l'AMDEC. Cette classe fait partie de la solution de notre cas.

- **Localisation**

Cette partie est décrite dans la première partie du problème du cas. Elle permet de déterminer grâce à un modèle d'équipement la zone de la panne.

- **Identification**

Cette identification concerne d'une part, la deuxième partie problème du cas que l'on nomme « **partie fonctionnelle** » et d'autre part, la partie solution en permettant d'identifier le composant défaillant. La partie fonctionnelle s'appuie sur un modèle hiérarchique des composants dans lequel les classes de ce modèle se retrouvent dans les descripteurs fonctionnels afin d'obtenir un cas générique.

Nous représentons le problème de diagnostic technique de manière la plus générale possible sous forme de cas.

Un cas a une représentation objet et permet de définir une hiérarchie de descripteurs contenant aussi bien les descripteurs de problèmes que les descripteurs de solution.

Les descripteurs sont représentés par trois attributs. Nous associons à chaque attribut des valeurs modales formant une partition attenante à l'attribut considéré. Une des spécificités de notre cas d'étude est de déterminer un état et un mode de fonctionnement, à chaque composant à diagnostiquer [48].

Nous affectons par conséquent à un descripteur donné :

- Un attribut relatif à sa valeur proprement dite (le descripteur est un composant électrique ou un composant mécanique par exemple) ds_i^{valeur} .
- Un attribut relatif à l'état de celui-ci $ds_i^{état}$.
- Ainsi qu'un attribut relatif au mode de fonctionnement qui reflétera l'état normal et/ou anormal des composants de l'équipement ds_i^{MF} .

Les descripteurs de problème de la partie fonctionnelle auront par conséquent trois attributs relatifs à la valeur du composant, son état et son mode de fonctionnement :

$ds_i = (ds_i^{valeur}, ds_i^{état}, ds_i^{MF})$. En tenant compte de toutes ces spécificités, nous pouvons schématiser la structure du cas comme indiqué sur le tableau (IV. 3).

Partie problème							Partie solution		
Localisation	Fonctionnelle						classe	Composant défaillant	
$ds_1 \dots \dots \dots ds_i$	ds_i^{valeur}	$ds_i^{état}$	ds_i^{MF}	...	$ds_i^{valeur}_i$	$ds_i^{état}_i$	$ds_i^{MF_i}$	Ds_1	Ds_2

Tableau IV. 3 : Structure du cas.

Nous identifions les descripteurs pertinents pour la représentation des cas dans le domaine étudié et définissons une structure appropriée des cas associées aux modèles de connaissances générales. Cette identification nous permet la mise en place de la phase de remémoration, d'adaptation et l'exploitation de la mise en relation entre ces deux phases à travers la création des mesures appropriées.

IV.6. Cycle du système de RàPC

Le système de RàPC met en œuvre les deux modèles de représentation des connaissances et la base de cas qui sont tous dépendants les uns les autres. La base de cas nous permet de représenter les différents modes de dysfonctionnements des composants ainsi que leur localisation. Le cas dans la base de cas est générique, et représente un ensemble de cas réels, qu'on retrouvera aisément à l'aide des modèles. Il se compose classiquement d'une paire (problème, solution).

La partie problème est définie d'une part par les descripteurs reflétant la localisation de la panne, et d'autre part par descripteurs indiquant les différents modes de fonctionnements. Le cas source permet de définir les composants défaillants en se basant sur les règles de décision ainsi que sur les modèles d'équipements et de taxonomie des composants.

Cas source = {Partie problème (localisation de la panne + modes de fonctionnement des composants du système), Partie solution}.

Nous allons maintenant aborder les différentes phases du cycle du système de RàPC.

IV 6.1. Elaboration du cas cible

Lorsqu'une panne est détectée, l'utilisateur sollicite notre système d'aide au diagnostic qui procède en quatre phases :

- **Une phase de consultation du superviseur :** qui se fait grâce à un module de contrôle des données d'acquisition. Ce module met en œuvre des règles de décision indiquant la zone de la défaillance par un signal d'alerte.
- **Une phase de localisation de la panne :** qui est faite grâce au signal d'alerte et un modèle d'équipement, ce modèle nous fournit la zone du composant défaillant. La phase d'élaboration s'initialisera donc par le remplissage des descripteurs associés à la « localisation de la panne ».
- **une phase de contrôle du technicien :** consiste à fournir un rapport de l'état réel de certains composants associé à la zone de panne.
- **une phase de construction de cas :** consiste à remplir les descripteurs de la partie fonctionnelle du cas par l'état actuel et mode de fonctionnement des composants impliqués, but d'identifier le composant défaillant.

IV.6.2. Proposition d'une méthode de remémoration guidée par l'adaptation

Nous allons expliquer dans ce qui suit les deux phases de remémoration et d'adaptation, ainsi que les mesures appliquées permettant d'unifier ces deux phases.

IV.6.2.1. Phase de Remémoration des cas similaires

Nous allons exploiter dans la phase de remémoration l'algorithme des k plus proches voisins en l'associant à une mesure de similarité globale, qui est composée par un ensemble de mesures de similarité locales.

Pour remémorer un cas similaire le plus favorable à l'adaptation, nous devons évaluer dans un premier temps la ressemblance entre les descripteurs et entre les attributs de chaque descripteur. En effet, pour la partie localisation, les descripteurs de problème du cas cible et des cas sources vont être comparés. Ensuite, concernant la partie fonctionnelle, ça sera les attributs des descripteurs qui vont être comparés. Les descripteurs du cas ayant des valeurs qualitatives, la mesure de similarité obtenue pour un descripteur donné dépendra des trois attributs $dsi = (dsi^{valeur}, dsi^{Etat}, dsi^{MF})$. Le décrivant qu'on nommera: « mesure de remémoration ».

IV.6.2.1.1. Mesure de Remémoration (MR)

Pour remémorer un cas similaire le plus favorable à l'adaptation, On doit évaluer la ressemblance entre les descripteurs et entre les attributs des composants. Ces descripteurs ayant des valeurs modales, on associera pour l'état du descripteur et son mode de fonctionnement une mesure égale à 1 si les valeurs d'attributs sont égales et 0 différentes [49].

- l'état du descripteur défini par une mesure de similarité locale peut avoir deux valeurs

$\varphi^{état}$ possibles :

$$\varphi^{état} = 1 \quad \text{quand} \quad ds_i^{état} = dc_i^{état}$$

$$\varphi^{état} = 0 \quad \text{quand} \quad ds_i^{état} \neq dc_i^{état}$$

- l'état du mode de fonctionnement dans le cas de diagnostic défini par une mesure de similarité locale φ^{MF}

$$\varphi^{MF} = 1 \quad \text{quand} \quad ds_i^{MF} = dc_i^{MF}$$

$$\varphi^{MF} = 0 \quad \text{quand} \quad ds_i^{MF} \neq dc_i^{MF}$$

- La classe d'appartenance des valeurs des descripteurs définis par une mesure de similarité locale φ^{valeur}

La classe d'appartenance est définie dans la hiérarchie des descripteurs. En effet, les valeurs que peuvent prendre les descripteurs, suivent une hiérarchie de descripteur et permet ainsi de rapprocher les descripteurs appartenant à la même classe. Nous définissons

ainsi une mesure dépendante de cette hiérarchie, ce qui permettra de travailler sur des classes et de généraliser ainsi le cas à retrouver.

$$\varphi^{valeur} = 1 \quad \text{quand} \quad ds_i^{valeur} = dc_i^{valeur}$$

$$\varphi^{valeur} = 0,8 \quad ds_i^{valeur} \in Clase(Niveau1) \quad dc_i^{valeur}$$

$$\varphi^{valeur} = 0,6 \quad ds_i^{valeur} \in Clase(Niveau2) \quad dc_i^{valeur}$$

➤ La présence des descripteurs définie par une mesure de similarité locale $\varphi^{présence}$

Les descripteurs n'étant pas renseignés obligatoirement dans chaque cas, on leur affectera un attribut relatif à leur présence dans le cas à savoir : $dsi^{présence}$

La base de cas contient des cas dans lesquels des descripteurs ne sont pas renseignés. Il est important de ne pas tenir compte, pour chaque cas des descripteurs non renseignés.

$$\varphi^{présence} = 1 \quad \text{Le descripteur est renseigné dans le cas source}$$

$$\varphi^{présence} = 0 \quad \text{Le descripteur n'apparaît pas dans le cas source}$$

Nous définissons une mesure de similarité globale qui est l'agrégation de ces différentes mesures et se traduit par la formule suivante :

$$M_R = \frac{\sum_{i=1}^m \varphi_i^{valeur} \times \varphi_i^{état} \times \varphi_i^{présence} \times \varphi_i^{M.F}}{\sum_{i=1}^m \varphi_i^{présence}} \quad (IV.1)$$

Où :

m : est le nombre de descripteurs de problème.

A partir de cette mesure, un ensemble de cas peut être choisi. Afin de sélectionner le cas source remémoré le plus adaptable, nous avons mis en place une mesure que nous appellerons « **Mesure d'Adaptation** » qui privilégiera les valeurs du mode de fonctionnement des descripteurs.

IV.6.2.1.2. Mesure d'Adaptation (MA)

La Mesure d'Adaptation (M_A) a pour objectif de choisir parmi les cas remémorés le cas le plus facilement adaptable lors de la phase d'adaptation. Cette mesure

tient compte du mode de fonctionnement des composants en mettant l'accent sur les modes de fonctionnement anormaux dans le cas source et le cas cible en leur affectant un poids plus important. Cette importance sera caractérisée par le poids λ_i . Ce poids est important dans la détermination du composant défaillant.

La présence de la valeur du descripteur est prise en compte ce qui permet de faciliter l'adaptation. Enfin, la valeur du descripteur est également prise en compte, car plus la valeur du descripteur cible est proche de la classe de la valeur du descripteur source et plus ce descripteur est facilement adaptable.

De ce fait, la Mesure d'adaptation (M_A) est défini comme suit :

$$M_A = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \times \varphi_i^{valeur} \times \varphi_i^{présence}}{\sum_{i=1}^m \varphi_i^{présence}} \quad (IV.2)$$

Où

λ_i : représente le poids associé en fonction du mode de fonctionnement.

Si MF(ds_i, dc_i) = {normal/normal} $\implies \lambda_i = 2^0$

Si MF(ds_i, dc_i) = {anormal/normal ou normal/anormal} $\implies \lambda_i = 2^1$

Si MF(ds_i, dc_i) = {anormal/anormal} $\implies \lambda_i = 2^2$

Nous précisons entre autre, que la mesure d'adaptation (M_A) n'est calculée que par rapport aux descripteurs de la partie fonctionnelle du cas car c'est dans cette partie que le mode de fonctionnement des composants est exprimé.

IV.6.3. Etape d'adaptation

Nous allons aborder la méthode ainsi que l'algorithme concernant la phase d'adaptation qui prend appui sur le modèle d'équipement, sur le modèle hiérarchique des descripteurs et sur les relations de dépendance entre les différents descripteurs de problème et de solution.

IV.6.3.1. Relations de dépendance

L'influence d'un ou de plusieurs descripteurs de problème sur un descripteur de solution est exprimé par les relations de dépendance. Une relation de dépendance est un triplet (ds_i, D_{sj}, RD_{ij}) .

RD_{ij} donne le type de relation entre l'espace problème et l'espace solution pour un cas donné. RD_{ij} peut prendre trois valeurs possibles qui sont déterminées à partir d'un modèle de l'équipement : $RD_{ij} \subset \{\text{Forte, Faible, Pas de relation}\}$.

Par ailleurs, la signification de chaque valeur de RD_{ij} est comme suit :

$RD_{ij} = \text{Forte}$: Ce type de relation existe lorsqu'un descripteur ds_i est fortement pertinent par rapport au descripteur D_{sj}

$RD_{ij} = \text{Faible}$: Cette relation de dépendance est exprimée par la relation de cause à effet potentielle qui peut y avoir entre le descripteur de problème et les descripteurs de solution impliquant un ensemble de cas donné. Dans le cas du diagnostic technique, un modèle de cause à effet (ou modèle de contexte) permettra de définir un sous ensemble de cas et la valeur des descripteurs de la relation.

$RD_{ij} = \text{Pas de relation}$: Il y a une parfaite indépendance entre ds_i et D_{sj} .

IV.6.4. Algorithme d'adaptation

L'algorithme d'adaptation adapte descripteur par descripteur (voir annexe B). Il s'appuie sur le modèle de l'équipement à diagnostiquer, sur le modèle d'hierarchie des composants et sur les relations de dépendance [48].

On identifiera un cas type d'adaptation dans notre application à savoir :

- **RD forte** impliquant au moins un descripteur de solution avec un descripteur de problème appartenant à la **même** classe de fonctionnement.

IV.7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les principaux systèmes de RàPC dédié au diagnostic. Cette analyse bibliographique est réalisée à partir de critères en relation avec la modélisation des connaissances utilisées dans la représentation du cas, les phases de remémoration et d'adaptation. Ceci nous a permis de comparer les différents systèmes de diagnostic par RàPC. En effet, nous avons constaté qu'il ya deux types de systèmes à savoir : le système orienté mining et le système orienté connaissance.

Pour cela, nous nous sommes intéressés à l'exploitation du système orienté connaissance en développant les différentes phases décrites dans ce système.

Dans ce cas, nous avons proposé d'utiliser la méthode de remémoration guidée par l'adaptation à travers une mesure de remémoration (M_R). Cette dernière est associée à une mesure d'adaptation (M_A) afin de sélectionner parmi les cas source remémoré celui qui est plus facilement adaptable.

Les deux mesures M_R et M_A prennent appuis sur les différentes caractéristiques du cas de diagnostic. Enfin, nous avons proposé d'utiliser un algorithme qui se base sur les relations de dépendances entre l'espace problème et l'espace de solution du cas.

Nous développons dans le chapitre suivant l'application du système précédent sur un banc d'essais concernant le système de pompage photovoltaïque.

Chapitre V

Application sur le système de pompage photovoltaïque

V.1. Introduction

Nous désirons mettre en place notre système de diagnostic sur un banc d'essais concernant les systèmes de pompage photovoltaïque se trouvant au niveau du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER).

Ce système sera développé par une méthode orientée connaissance, qui nous a permis de mettre en place notre système de diagnostic par le raisonnement à partir de cas (RàPC). Cette contribution est déjà étudiée dans le chapitre IV.

Pour cela la première partie de ce chapitre sera consacrée à la présentation de banc d'essais en détaillant ses différents composants. Ensuite nous nous intéressons plus particulièrement dans la deuxième partie à l'analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle de notre équipement.

La troisième partie est consacrée à la mise en place de système de diagnostic par RàPC sur le système de pompage photovoltaïque. En effet, nous présentons la construction de la base de cas, qui est élaboré par la technique empruntée à la sûreté de fonctionnement ainsi que les modèles de connaissance à savoir : modèle hiérarchique et d'équipement des composants du système.

Enfin, nous expliquons comment nous allons exploiter les différentes phases de cycle de RàPC en commençant par l'élaboration du cas cible, la phase de remémoration guidée par l'adaptation et l'algorithme d'adaptation.

V.2. Présentation du banc d'essais

Nous allons présenter dans ce paragraphe le banc d'essais du système de pompage photovoltaïque en détaillant sa description générale et son rôle au sein de centre de recherche (CDER) dans lequel nous avons effectué nos travaux de recherches.

En effet, notre recherche se focalise au niveau du diagnostic de pannes sur une plateforme d'e-maintenance.

V.2.1. Description du banc d'essais

Le banc d'essais est construit en acier inoxydable et est facilement démontable. On distingue les parties suivantes [13] :

- Un puits.
- Un réservoir d'eau-air.
- Une branche de refoulement entre le puits et le réservoir.

- Une branche de décharge qui comporte le retour du réservoir au puits.
- Un compresseur d'air.
- Des capteurs et transducteurs de débit, niveaux et pressions.
- Armoire de contrôle et visualisation.
- Armoire de connexion pour des mesures avec instrumentation additionnelle externe.
- Un générateur photovoltaïque de 2,2 kW.
- Un wattmètre pour des mesures de puissance AC.
- Une source d'alimentation DC programmable de 3 kW.
- Un Datalogger pour l'acquisition de données.
- Un ordinateur personnel avec carte GPIB pour les mesures et du contrôle de données.

Les intervalles de mesures sont respectivement de 0 à 2,2 kW pour la puissance du générateur PV, de 0 à 120 m pour la hauteur de pompage et de 0 à 30 m³/h pour le débit d'eau pompée.

V.2.2. Composition du banc d'essais

Les différents paramètres du système de pompage sont obtenus à partir des différents éléments représentés dans la (figure V.1).

V.2.2.1. Capteurs

Les différents capteurs utilisés dans le banc d'essais sont les suivants :

- ◆ Capteur de pression différentielle pour la mesure du niveau d'eau du puits à 1 bar (C1).
- ◆ Capteur de pression manométrique de sortie de la pompe à tester à 1 bar (C2).
- ◆ Capteur de pression manométrique de sortie de la pompe à tester à 12bar (C3).
- ◆ Capteur de pression d'air du réservoir à 120m (C7).
- ◆ Débitmètre pour la branche de 32mm de diamètre (C4).
- ◆ Le débitmètre situé sur la deuxième branche du circuit d'impulsion est utilisé pour les faibles débits de 1 à 10 m³/h.
- ◆ Débitmètre pour la branche de 50 mm de diamètre (C5).
- ◆ Le débitmètre situé à La première branche du circuit d'impulsion est utilisé pour les grands débits de 1 à 30 m³/h.
- ◆ Capteur du niveau d'eau du réservoir (C6).

La chambre de lecture montée latéralement sur le réservoir à mesurer, forme un système de «vases communicants ». Les variations du niveau du réservoir déplacent le flotteur

à l'intérieur de la chambre de niveau. Le flotteur équipé d'un champ magnétique, transmet à l'indicateur extérieur (T) la position du niveau. Un indicateur extérieur, (monté dans un tube en verre rempli d'une huile spéciale) indique le niveau sur une échelle graduée en cm.

V.2.2.2. Eléments de régulation et de fermeture

- Valve anti-retour de la conduite d'aspiration (V1).
- Vanne pneumatique de diamètre de 32 mm de la branche de refoulement de 32 mm (V2).
- Vanne pneumatique de diamètre de 50 mm de la branche de refoulement de 50 mm (V3).
- Vanne manuelle millimétrique de régulation fine du débit de la branche de refoulement (V4).
- Clé manuelle pour sortie auxiliaire (V5).
- Vanne anti-retour de 50 mm de diamètre (V6).
- Valve pneumatique de sortie d'air du réservoir (V7).
- Valve pneumatique d'entrée d'air dans le réservoir (V8) et amortisseur d'air (A) de la branche de décharge.
- Vanne pneumatique de 50 mm de diamètre de la branche de décharge (V9).
- Vanne manuelle millimétrique de régulation fine du débit d'eau (V10).
 - ❖ Pompe immergée pour vider le puits
 - Débit : 6 m³/h
 - Hauteurs : 8m
 - ❖ Puits d'eau
 - Hauteur : 200 cm
 - Diamètre : 100 cm
 - ❖ Réservoir
 - Hauteur : 200 cm
 - Diamètre : 100 cm
 - Pression : 15 Kg/cm²
 - ❖ Compresseur d'air
 - Pression de travail jusqu'à : 15 Kg/c m²

V.2.2.3. Eléments de contrôle manuelle et visualisation

L'armoire de contrôle et visualisation centralise et connexionne tous les contrôles des vannes pneumatiques, l'alimentation et les sorties analogiques.

V.2.2.4. Éléments de connexion

L'armoire permet la connexion du générateur photovoltaïque, du convertisseur DC/DC, ou de l'onduleur DC/AC et de l'ensemble moteur-pompe.

La face frontale présente des bornes d'essais pour la mesure directe du courant, de la tension et de la puissance pour les différents sous-systèmes à l'aide d'une instrumentation additionnelle externe (multimètre, wattmètre,...etc.).

V.2.2.5. Alimentation du système de pompage

L'alimentation du système à tester peut être réalisée à l'aide du générateur photovoltaïque ou à l'aide de l'alimentation DC.

V.2.2.6. Instrumentation de mesure

Tous les signaux des capteurs, débitmètres sont connectés à l'instrumentation de mesure.

❖ Wattmètre

Le wattmètre permet les mesures de puissance triphasique ou monophasique.

V.2.2.7. Acquisition de données et contrôle

Le Datalogger Hewlett-Packard, modèle HP34970 permet l'acquisition des données et le contrôle du système [50].

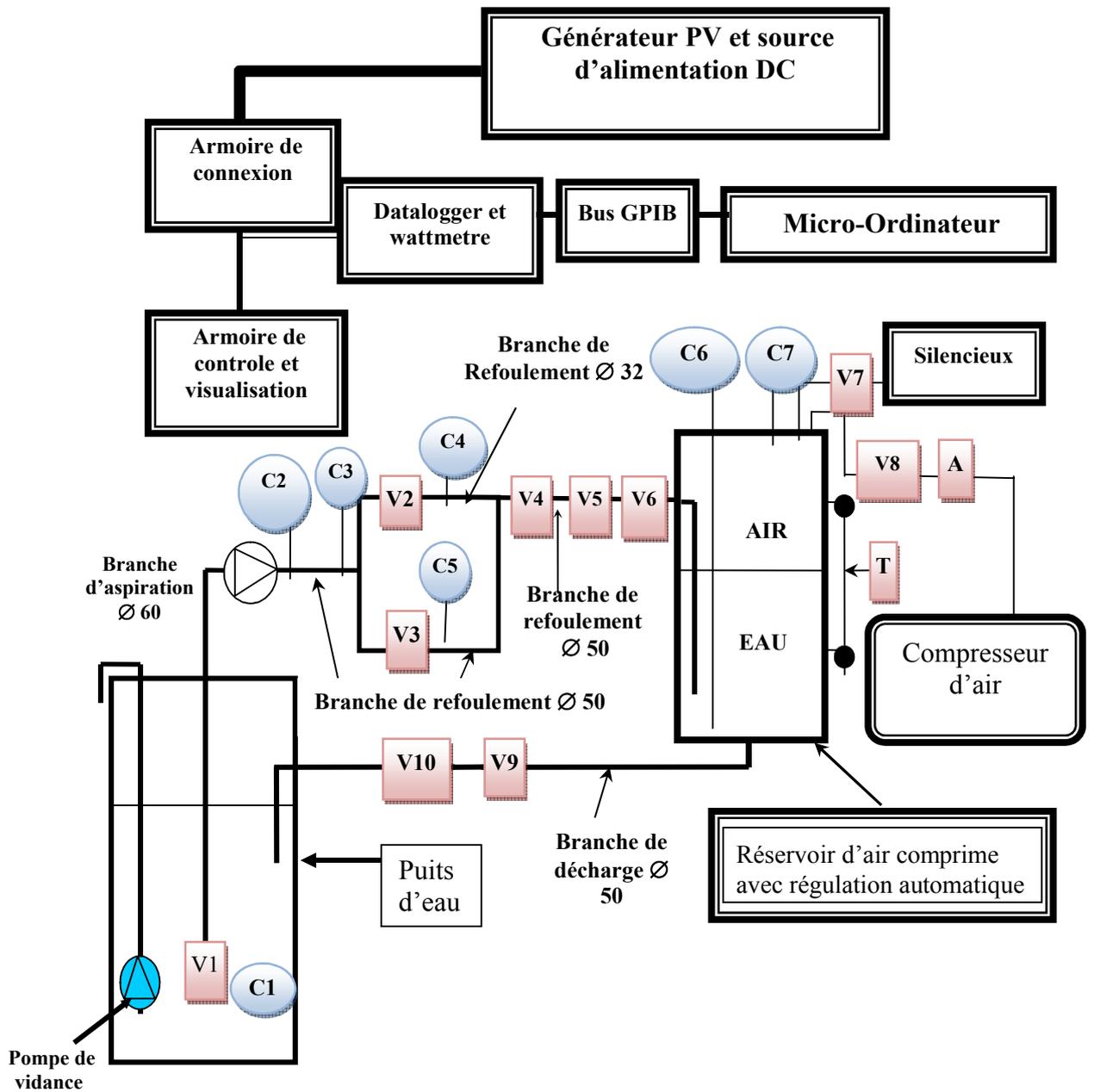


Figure V.1: Schéma général du banc d'essais des systèmes de pompage photovoltaïque.



Figure V.2 : Générateur photovoltaïque.

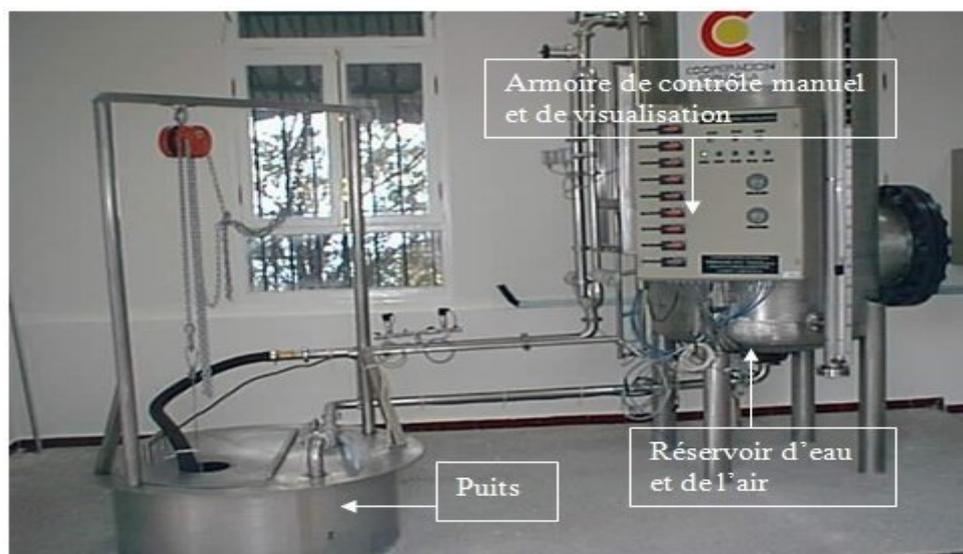


Figure V.3 : Vue générale du banc d'essais de système de pompage photovoltaïque.

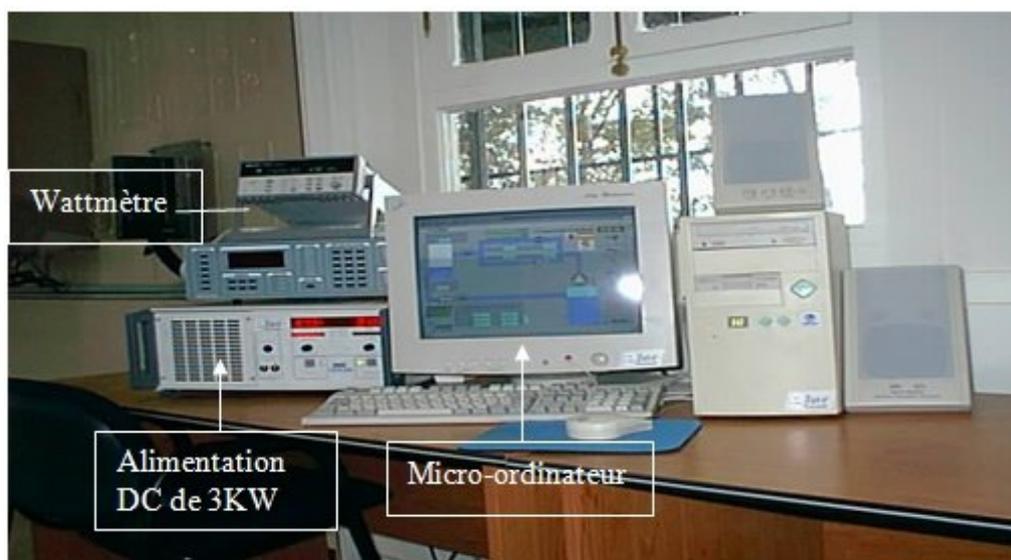


Figure V.4 : Equipement de mesures et de contrôles du banc d'essais de systèmes de



Figure V.5 : Compresseur d'air 15 bars.

Figure V.6: Sous –système de pompage photovoltaïque
Moteur –pompe et convertisseur.

V.3. Analyse fonctionnelle du système de pompage photovoltaïque

Chacun des éléments du système de pompage photovoltaïque représenté sur la (figure V.7) assure une fonction bien déterminée :

- Champ photovoltaïque : transformation de l'énergie rayonnante en énergie électrique (courant continu).
- Convertisseur : conversion du courant continu en courant alternatif.
- Moteur : transformation de l'énergie électrique (courant alternatif) en énergie mécanique
- Pompe : conversion de l'énergie mécanique en énergie hydraulique.

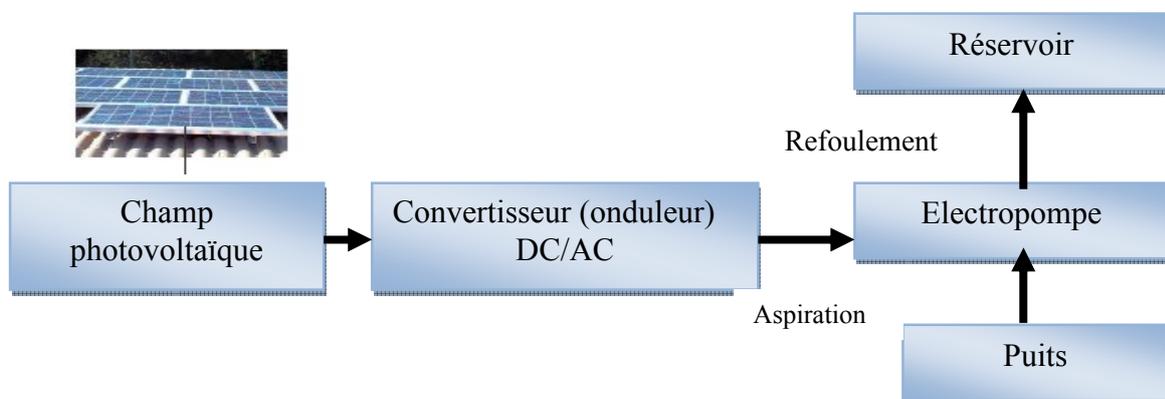


Figure V.7: Schéma synoptique d'un système de pompage photovoltaïque au fil de soleil.

V.4. Analyse dysfonctionnelle du système de pompage photovoltaïque

V.4.1. Classification des défaillances dans le système de pompage photovoltaïque

Au cours de sa durée de vie, le système de pompage photovoltaïque est bien souvent soumis à des sollicitations sévères (voir les figures V.8, V.9, V.10), qui peuvent conduire à un certain nombre de pannes. Ces pannes peuvent évidemment concerner les différents composants d'équipement à savoir : le générateurs photovoltaïque, la pompe, le convertisseur ...etc. Dans cette partie, nous présentons les états et modes de fonctionnement (défaillances), ainsi que les états de contexte de chaque composant grâce à l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance de leur Effet et de leur Criticité) et les arbres de défaillances [51].

V.4.1.1. Analyse des Modes de Défaillance de leur Effet et de leur Criticité (AMDEC)

Composants	défaillances	Causes possibles	Effets sur le système	Observable	criticité	Solution
Générateur photovoltaïque (GPV)	$(V_{m_{gpv}}) < V_{ref_{gpv}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Diode by pass court circuit - Module défectueux en série 	-diminution de tension	-Tension	20	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacer la diode - Vérifier et remplacer le module défectueux.
	$P_{m_{gpv}} < P_{ref_{gpv}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Défaut de conception lié à l'ombre - Saleté des panneaux 	-Débit d'eau faible	<ul style="list-style-type: none"> - Tension - Courant 	100	<ul style="list-style-type: none"> - Dégager les objets provoquant l'ombre - Nettoyer les modules
	$P_{m_{gpv}}=0$	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosion ou desserrement des bornes de connexion. - Fusible défectueux. 	Pas de puissance	<ul style="list-style-type: none"> - Tension - Courant 	250	<ul style="list-style-type: none"> - Resserrer ou changer les bornes de connexion - Changer le fusible
	$I_{m_{gpv}} < I_{ref_{gpv}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Fils de connexion coupé dans un rangé en parallèle - Diodes anti retour défectueuses 	- diminution de courant et de débit	-Courant	20	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier et remplacer le fils de connexion - Remplacer la diode défectueuse
Onduleur	$P_{on}=0$	<ul style="list-style-type: none"> - Panne d'onduleur - Câbles d'alimentation défectueux ou détacher à l'entrée d'onduleur 	-Pas débit d'eau	<ul style="list-style-type: none"> -Puissance d'entrée -Puissance de sortie 	250	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacer l'onduleur -Remonter ou remplacer le câble d'alimentation.
Pompe	Pas de fonction (Arrêt de pompage) [$Q_m=0$]	<ul style="list-style-type: none"> - Crépine bouchée - Roues défectueuses - Baise de niveau d'eau dans le puits 	-Pas de débit d'eau	-Débit	250	<ul style="list-style-type: none"> - Déboucher la crépine - Changer les roues - Contrôler le niveau d'eau soit au minimum 1m au dessus du corps d'aspiration de la pompe lors de son fonctionnement.
Moteur	Pas de démarrage [$Q_m=0$]	<ul style="list-style-type: none"> - Phases défectueux - Garniture mécanique défectueux 	-Pas de débit d'eau	<ul style="list-style-type: none"> -Tension -Courant 	250	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacer les phases - Changer les joints étanchés

Tableau V. 1: Classification des défaillances et leurs solutions d'un système de pompage photovoltaïque.

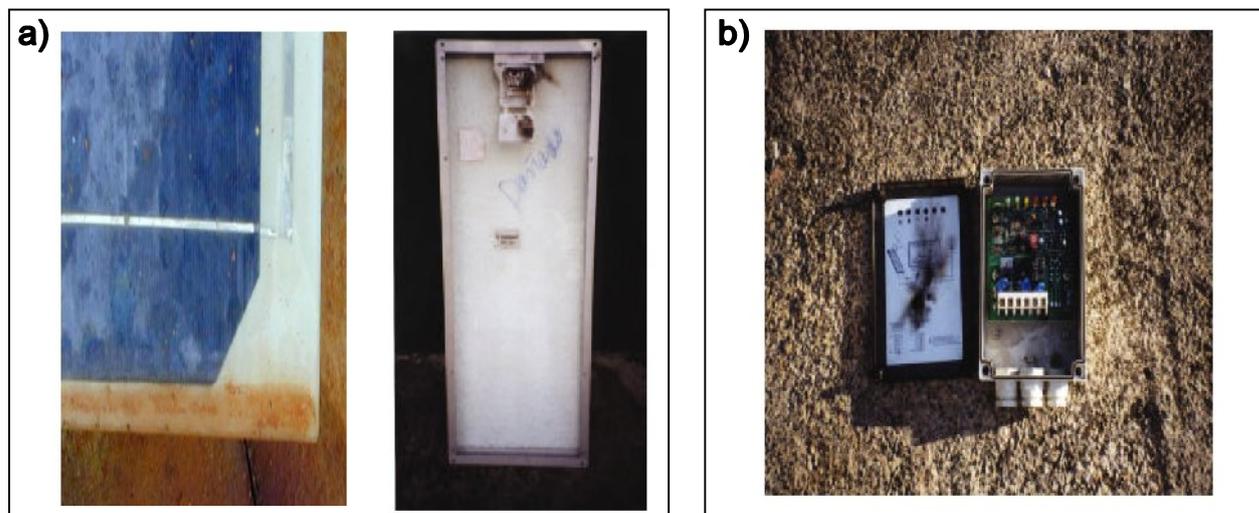


Figure V.8 : Défaillances a) Destruction et saleté du module b) Surtension dans un onduleur

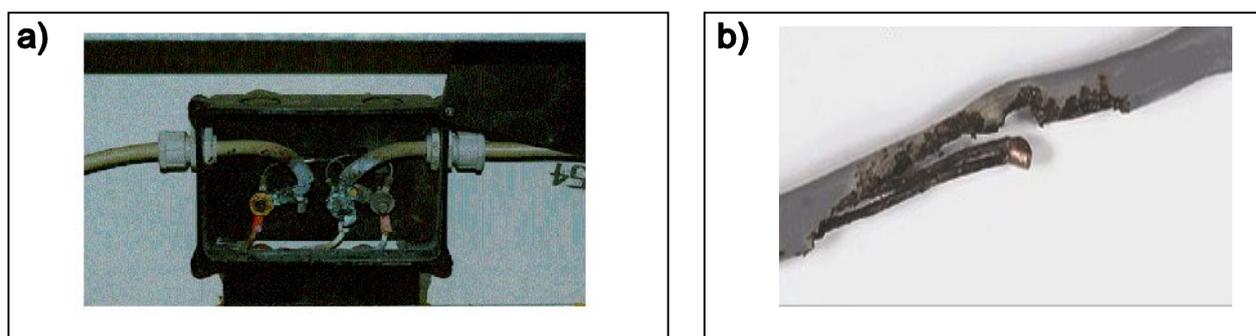


Figure V.9 : Défaillances a) Câble défectueux b) Connexion défectueuse

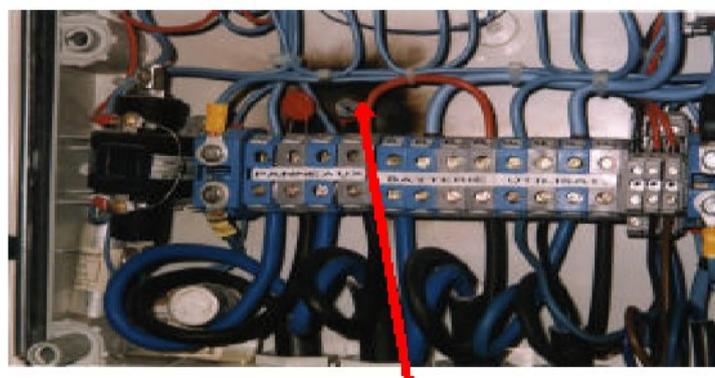


Figure V.10: Connexion défectueuse en niveau de la boîte de jonction

V.4.1.2. Arbre de défaillance

Dans cette partie nous établissons un lien entre les éléments causes des pannes et les problèmes rencontrés sous forme d'un arbre de défaillance. En effet, cet arbre des défaillances représente le mode de défaillance du système en fonction des modes de défaillances de ses sous-systèmes et composants. Elle est très utilisée dans les domaines de la sécurité et de la fiabilité des systèmes [36].

La figure V.11 représente l'arbre de défaillance du système de pompage photovoltaïque, que nous avons réalisé pour déterminer les causes possible des pannes.

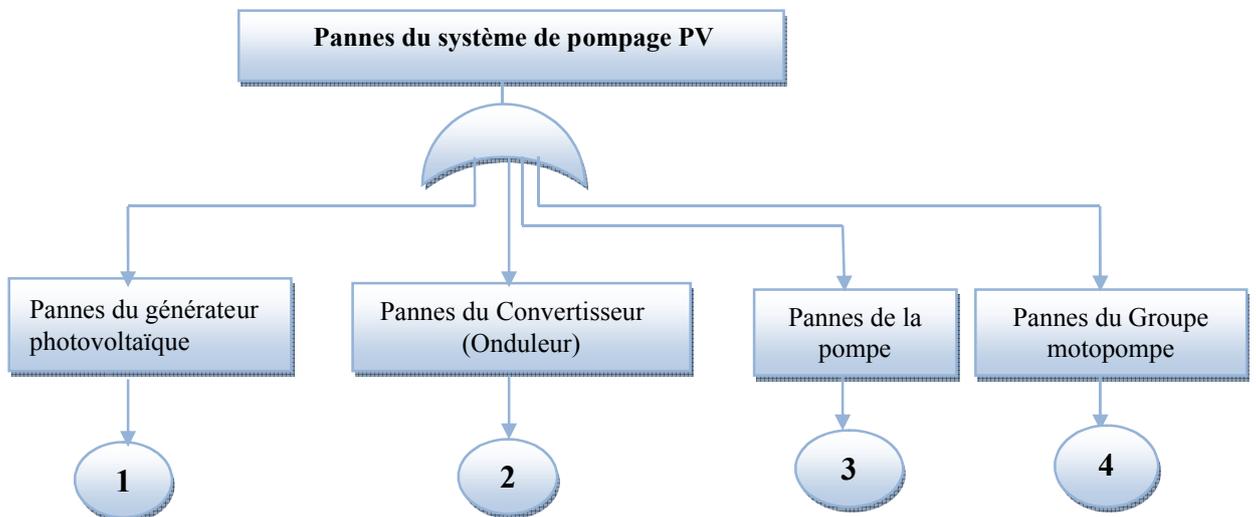


Figure V.11: L'arbre de défaillance du système de pompage photovoltaïque.

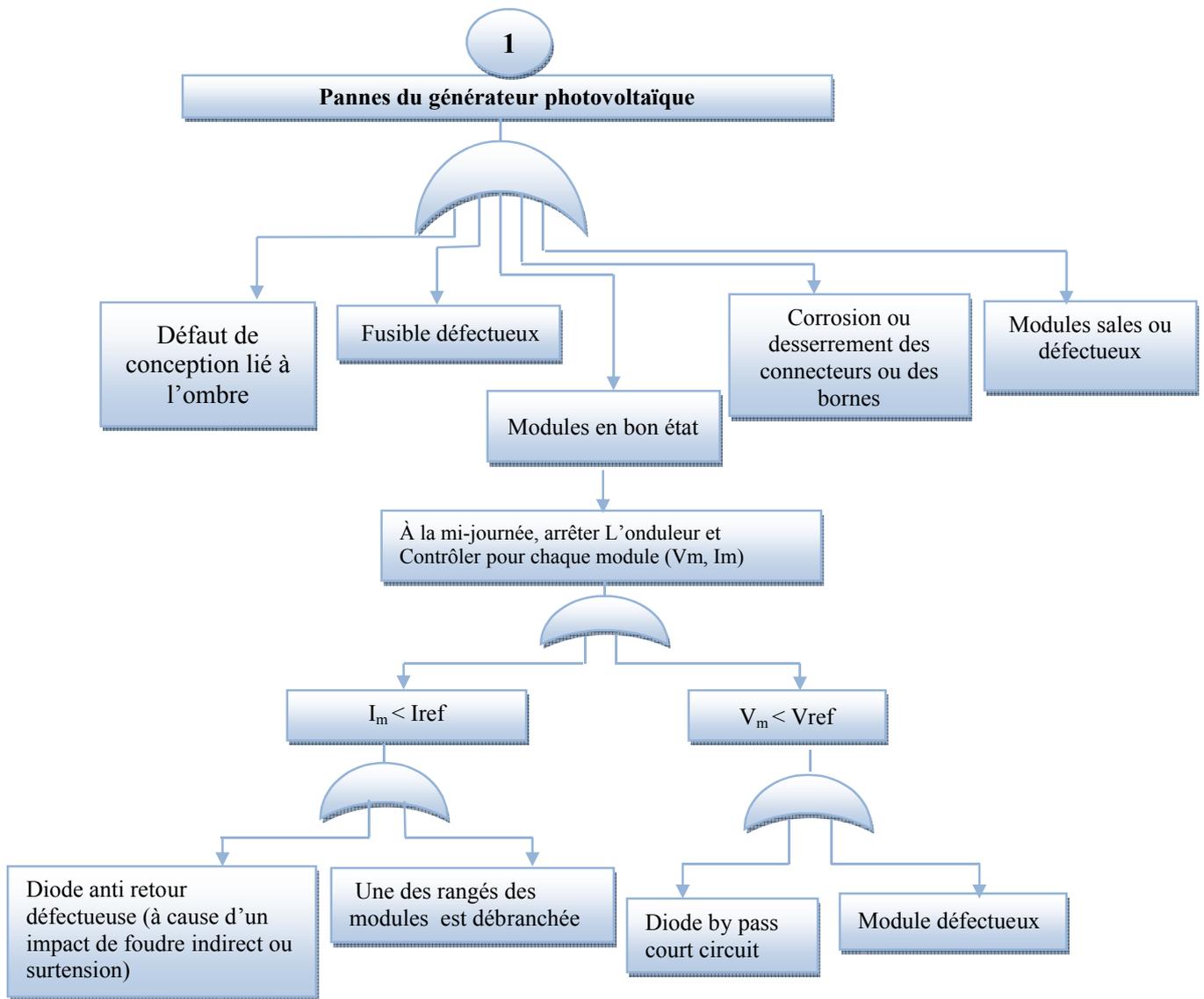


Figure V.11.1: L'arbre de défaillance du générateur photovoltaïque.

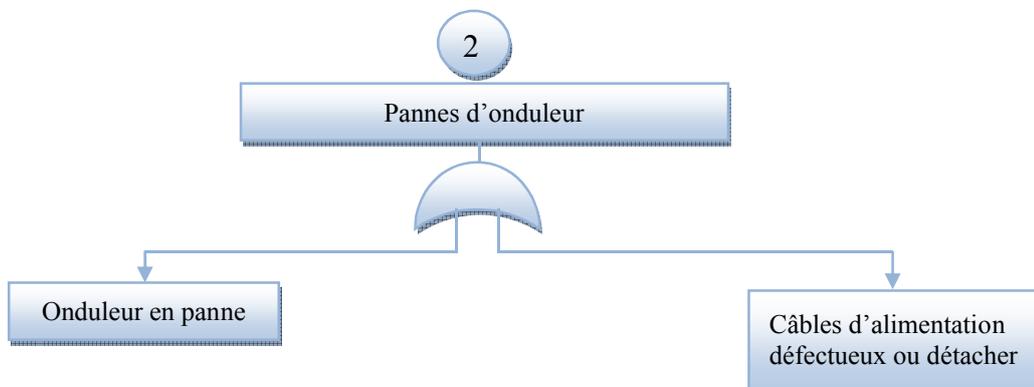


Figure V.11.2: L'arbre de défaillance d'onduleur.

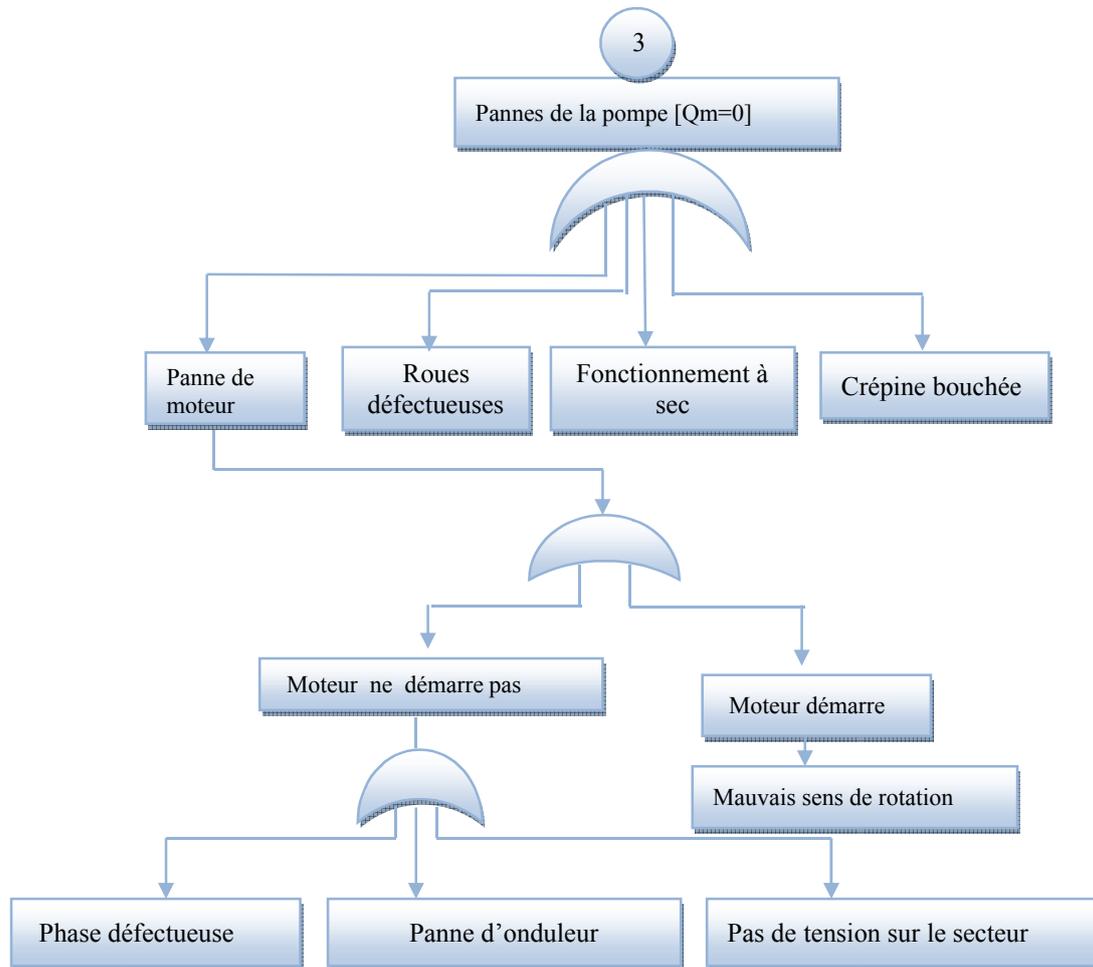


Figure V.11.3: L'arbre de défaillance de la pompe.

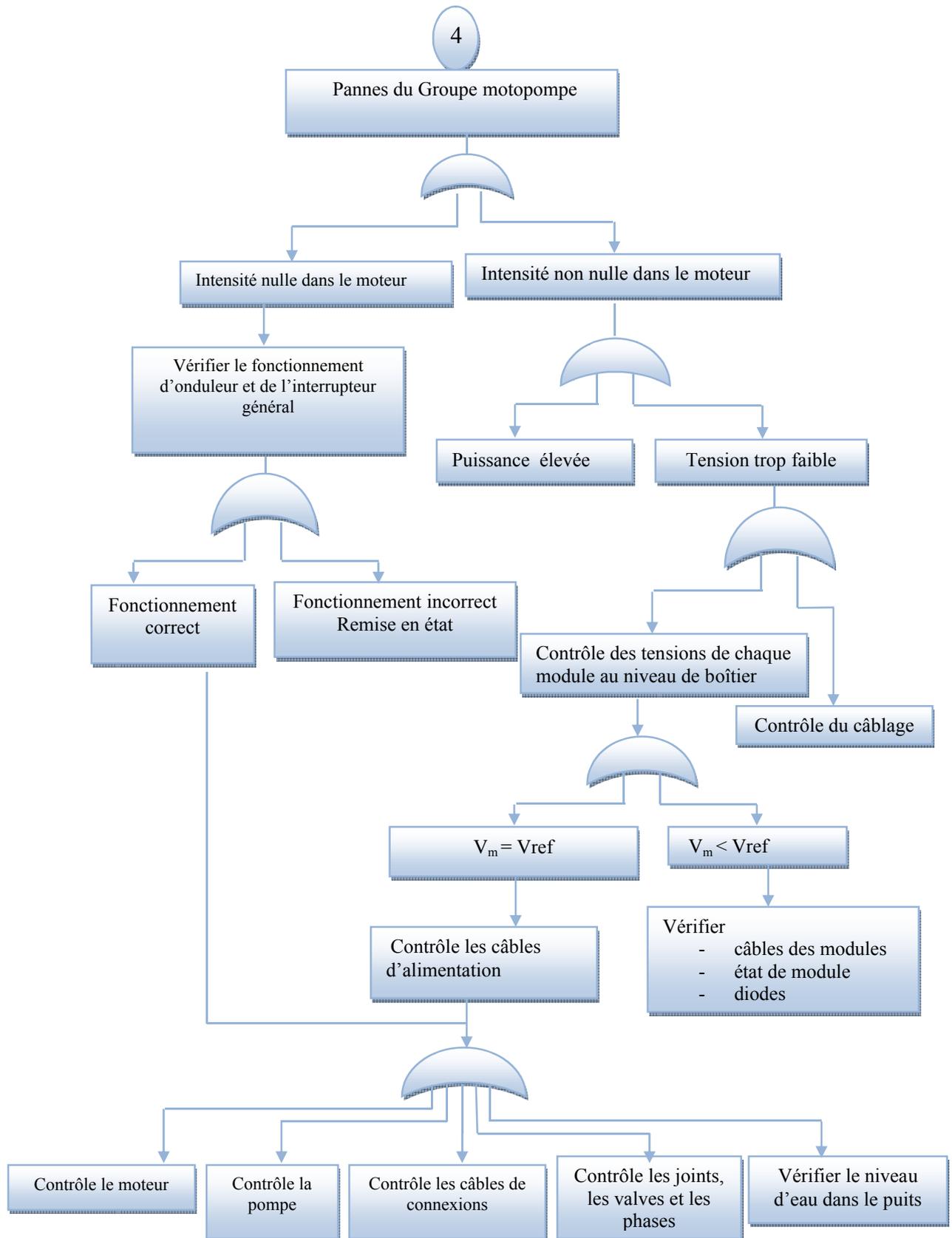


Figure V.11.4: L'arbre de défaillance du groupe motopompe.

Nous nous intéressons dans ce que suit à proposer une méthode de détection de pannes, basé sur la représentation des différents paramètres d'acquisitions mesurées et calculées par des modèles mathématiques. Pour contrôler l'état de bon fonctionnement et dysfonctionnement de notre système de pompage photovoltaïque. En effet, chaque paramètre de mesure est en relation avec les autres paramètres.

V.5. Modélisation des différentes parties du système de pompage

La modélisation des différents éléments d'un système de pompage photovoltaïque est une étape indispensable pour la simulation des pannes.

Dans la simulation des pannes de notre système nous avons utilisé l'environnement « SIMULINK » de MATLAB. Ce dernier est utilisé pour la simulation des pannes des différents paramètres de chaque élément du système de pompage photovoltaïque (GPV, onduleur, motopompe).

V.5.1. Modèle de l'éclairement

Une approche simplifiée a été élaborée selon [58], servira comme une première approximation pour la quantification de l'éclairement incident. Ce modèle quantifie le flux lumineux pour une journée claire.

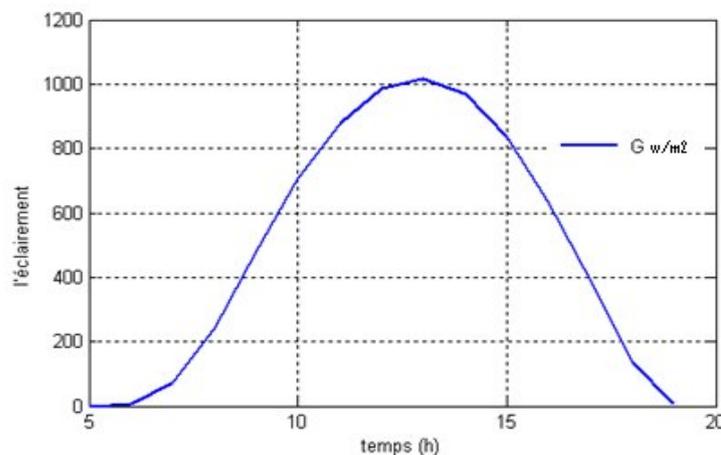


Figure V.12: Modèle de l'éclairement durant une journée.

V.5.2. Modélisation du générateur photovoltaïque

L'objectif de la modélisation du générateur photovoltaïque est de calculer les valeurs de courant et de la tension au point de puissance maximale (I_{mmp} , V_{mmp}), en se basant sur des

mesures prise aux conditions réelles en utilisant les équations de translation de model Bendel et al [54] données ci-dessous :

$$I_{m m p} = I_{m m p_0} \frac{G}{G_{ref}} \quad [V.1]$$

$$V_{m m p} = V_{m m p_0} + b (T - T_{ref}) \quad [V.2]$$

$$P_{m m p} = V_{m m p} I_{m m p} \quad [V.3]$$

Où :

β : est le coefficient de température pour la tension exprimé en $V/^{\circ}C$ et qui dans notre cas prend la valeur -0,76.

I_{mmp} , I_{mmp_0} : sont respectivement le courant au point de puissance maximale aux conditions réelles d'éclairement et de température et aux conditions de références.

V_{mmp} , V_{mmp_0} : Sont respectivement la tension au point de puissance maximale aux conditions réelles d'éclairement et de température et aux conditions de références.

P_{mmp} , P_{mmp_0} : sont respectivement la puissance au point de puissance maximale aux conditions réelles d'éclairement et de température et aux conditions de références.

G , G_{ref} : sont respectivement l'éclairement mesuré et l'éclairement de référence respectivement en Watt/mètre carré (W/m^2).

T , T_{ref} : température mesurée et température de référence respectivement en en degré Celsius ($^{\circ}C$).

- Le courant, la tension et la puissance calculés par les modèles mathématiques donnés par (équations V.1, V.2, V.3) seront comparés avec le courant, la tension et la puissance obtenus des relevés expérimentaux.
- Dans notre travail le MPPT est inclus dans l'onduleur, c'est-à-dire à l'entrée de l'onduleur, il existe un MPPT qui assure la maximisation de la puissance fournie par le générateur PV.

Les figures ci-dessous illustrent les résultats des paramètres de caractérisation du générateur photovoltaïque calculées par des modèles mathématiques et mesurées, pendant une journée de bon fonctionnement du notre système.

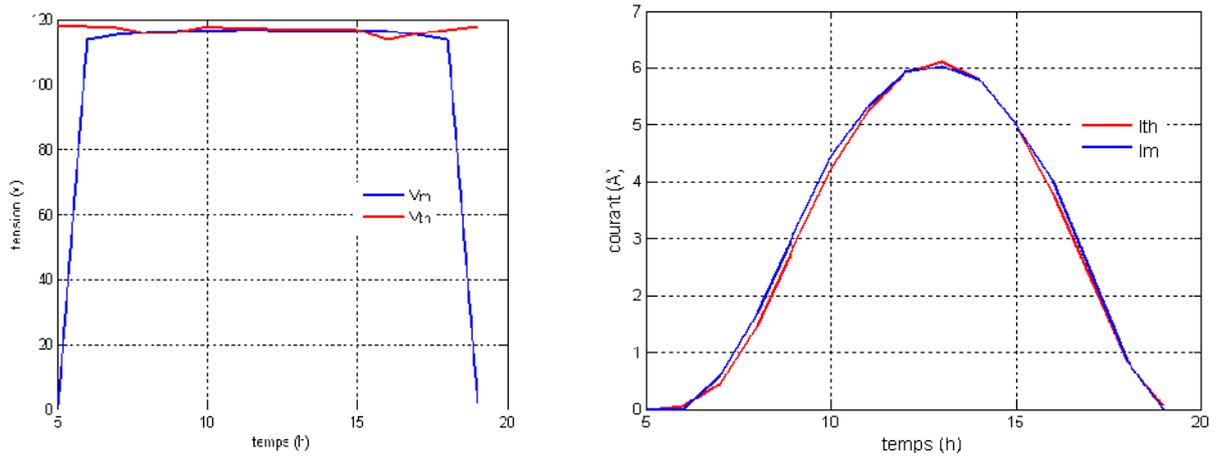


Figure V.13: Evolution de la tension et du courant du GPV calculés et mesurés durant une journée.

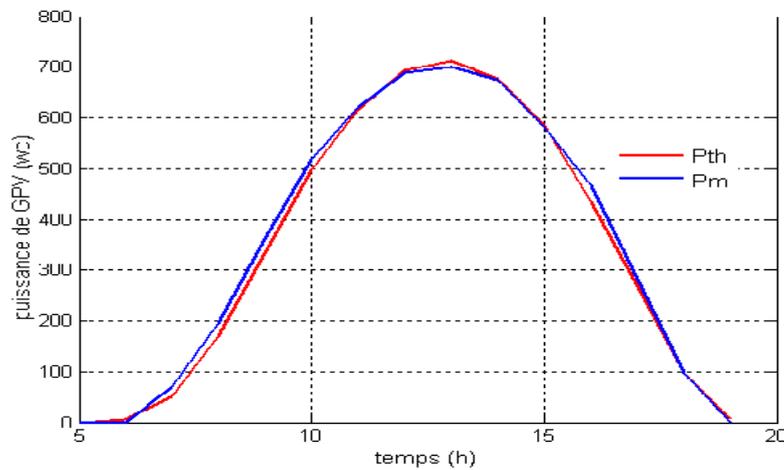


Figure V.14: Evolution de la puissance du GPV calculée et mesurée durant une journée.

V.5.3. Modélisation de l'onduleur

Le rôle primordial d'un onduleur est de transformer une puissance contenue d'entrée P_{in} délivrée par le générateur PV à une puissance alternative de sortie P_{out} à l'entrée du sous système de pompage photovoltaïque avec un rendement de conversion très grand [54].

Le rendement de l'onduleur est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad [V.4]$$

P_{in} : C'est la puissance continue fournie par le générateur PV.

P_{out} : C'est la puissance convertie par l'onduleur en puissance alternative.

Par manque de donnée, pour une meilleure modélisation de l'onduleur, on se contente dans ce travail de modéliser l'onduleur par un rendement fixe et qui est exprimé par son rendement à la puissance nominale généralement donné par le constructeur.

On supposant que le convertisseur est idéal, son rendement à la puissance nominale est : $h = 0,90$

La figure ci-dessous illustre la puissance d'onduleur mesurée et calculée prise pendant une journée du bon fonctionnement du system de pompage.

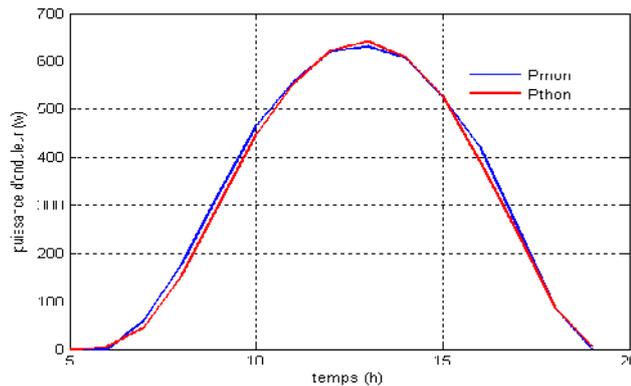


Figure V.15: Evolution de la puissance d'onduleur calculée et mesurée durant une journée.

V.5.4. Modélisation de débit de la pompe

Le débit donné par la pompe en fonction de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque peut être exprimée dans la figure suivante :

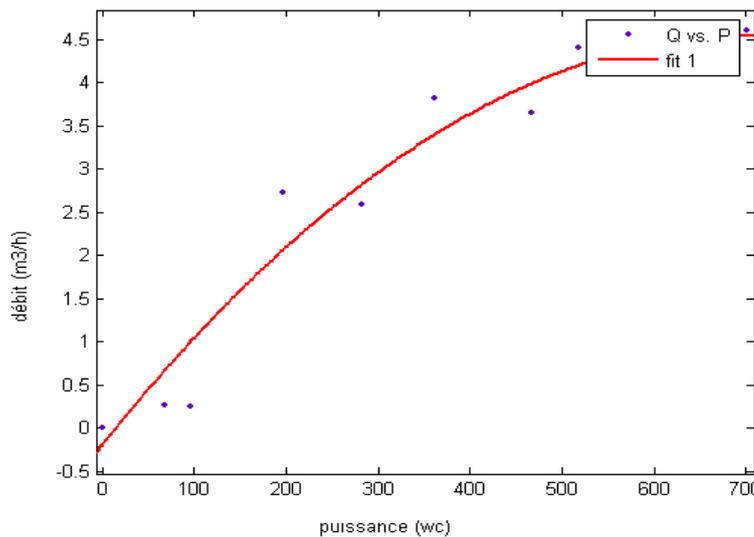


Figure V.16: Evolution du débit en fonction de la puissance du GPV.

D'après la figure ci-dessus, le débit fourni par la pompe dépend de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque, Pour cela une fonction est établie de la forme suivante :

$$Q = f(P_{gpv}) \quad [V.5]$$

Qui est représenté par l'expression suivante :

$$Q = c_0 + c_1 P_{gpv} + c_2 P_{gpv}^2 \quad [V.6]$$

Les paramètres c_0 , c_1 , c_2 sont extraits d'après les données expérimentales par la méthode des moindres carrés dans un fitting (CFtool Toolbox) (ref fitting) en MATLAB.

Les valeurs des paramètres obtenues sont données dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	c_0	c_1	c_2
Valeurs	-0,1904	0,01295	-8,788 e-6

Tableau V.2 : Paramètres de modèle du débit en fonction de la puissance.

La caractéristique $Q = f(P_{GPV})$ est obtenue et comparée avec celle de la mesure expérimentale indiquée par la figure suivante :

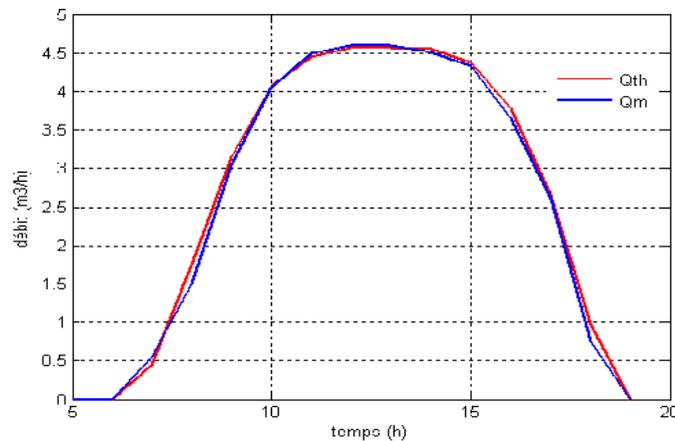


Figure V.17: Evaluation du débit d'eau calculé et mesuré durant une journée.

V.6. Simulation de pannes au niveau de banc d'essais de système de pompage PV

Les données expérimentales de la simulation de pannes sont prises pour différentes conditions d'éclairage et de température.

Dans ce qui suit nous donnons sous forme de courbes et figures les résultats de la simulation des pannes.

V.6.1. Simulation de pannes au niveau de générateur photovoltaïque

L'état 1 :

Cas 1 : Module photovoltaïque défectueux en série

Cas 2: Court circuit d'une diode by passe

Les résultats de la simulation de ces deux cas de pannes sont représentés dans les figures suivantes :

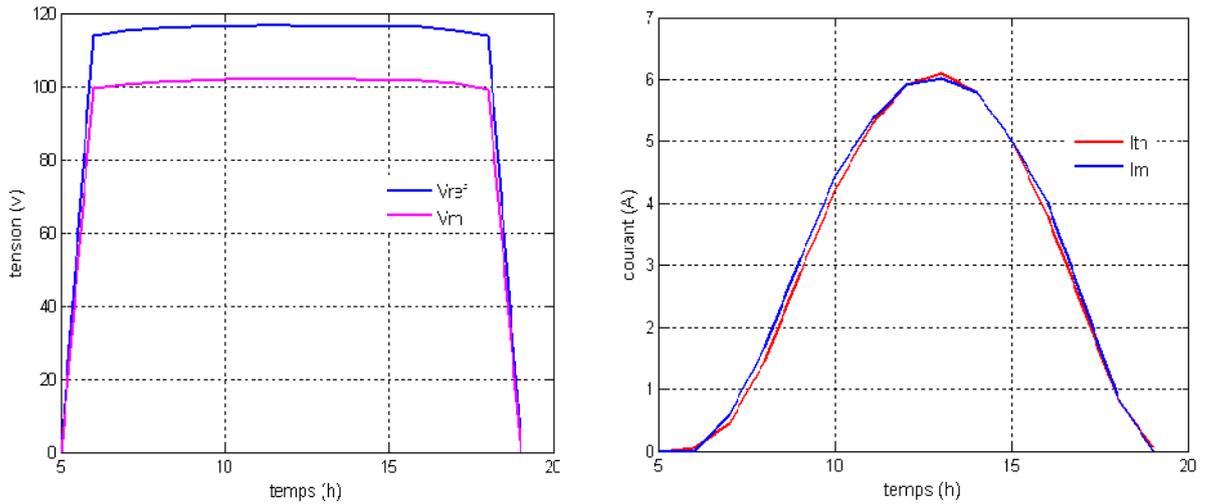


Figure V.18: Evaluation de la tension et du courant de générateur PV calculés et mesurés à l'état 1.

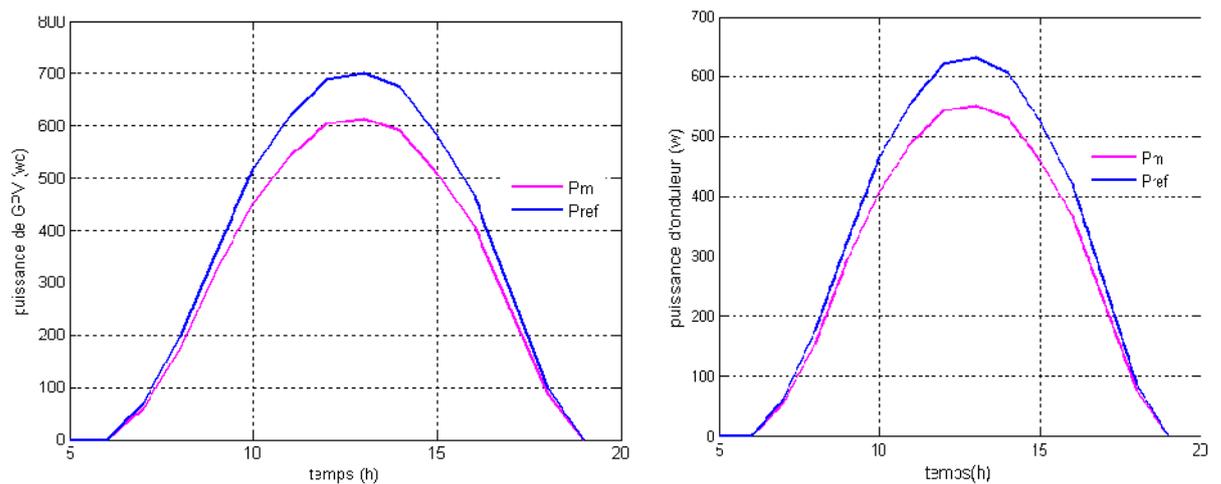


Figure V.19: Evaluation de la puissance de générateur PV et d'onduleur calculées et mesurées à l'état 1.

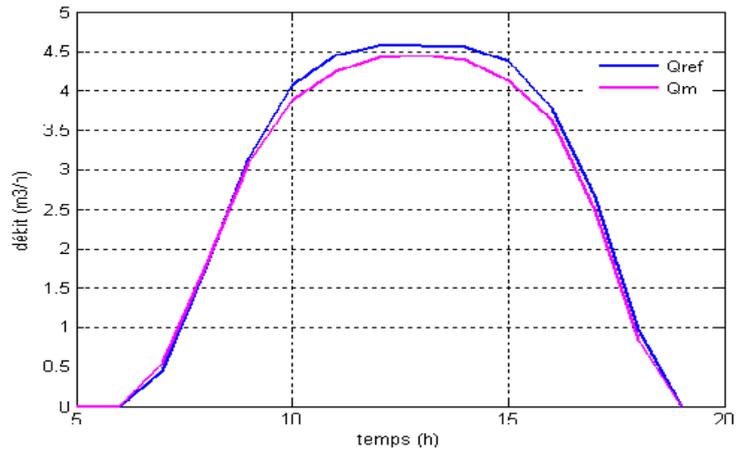


Figure V.20 : Evaluation du débit d'eau calculé et mesuré à l'état 1.

L'état 2 : Contient les cas suivants :

Cas3 : Saleté des modules

Cas4: L'ombrage des modules

Les résultats de la simulation des ces deux cas de pannes sont représentés dans les figures suivantes :

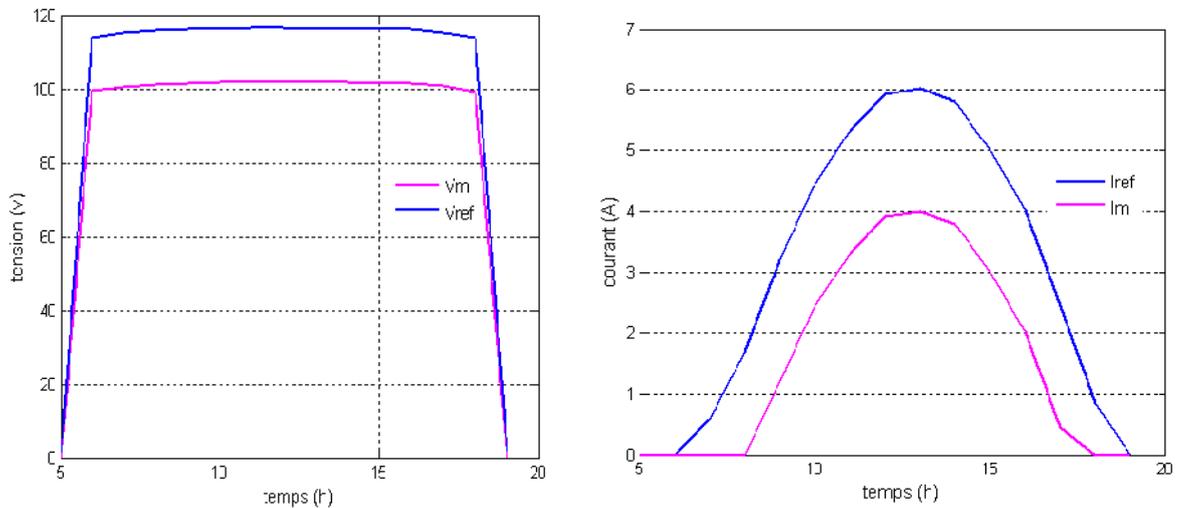


Figure V.21: Evaluation de la tension et du courant de générateur PV calculés et mesurés à l'état 2.

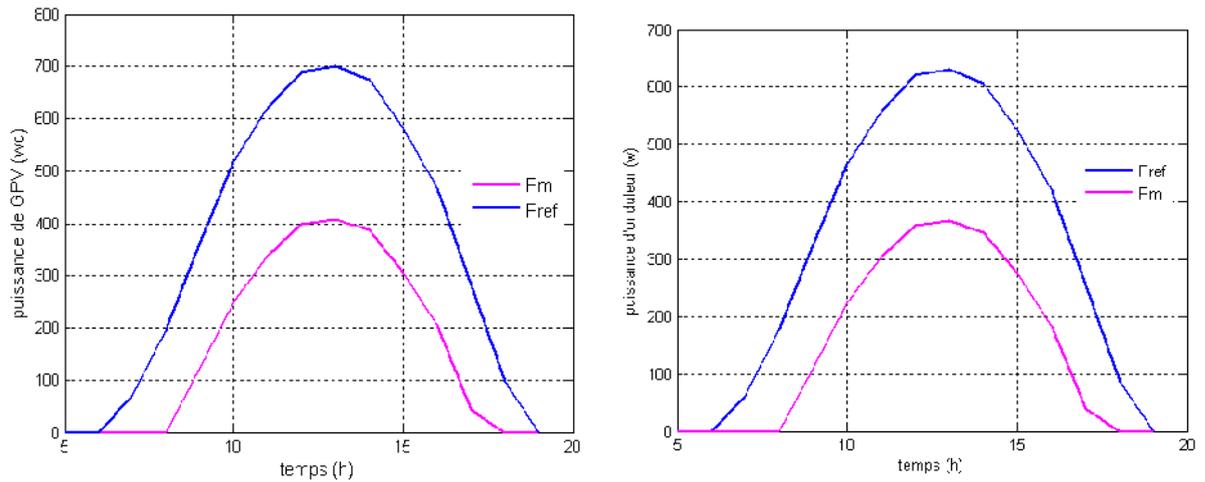


Figure V.22: Evaluation de la puissance de GPV et d'onduleur calculées et mesurées à l'état 2.

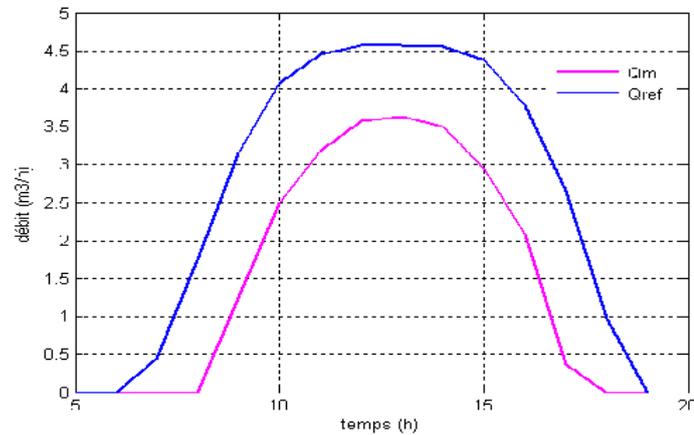


Figure V.23: Evaluation du débit d'eau calculé et mesuré à l'état 2.

L'état 3 : Contient les cas suivants :

Cas 5 : Corrosion ou desserrement des bornes de connexion.

Cas 6 : Fusible défectueux.

Le système de pompage ne fonction pas dans cet état.

Les résultats de la simulation des ces deux cas de pannes sont représentés dans les figures suivantes :

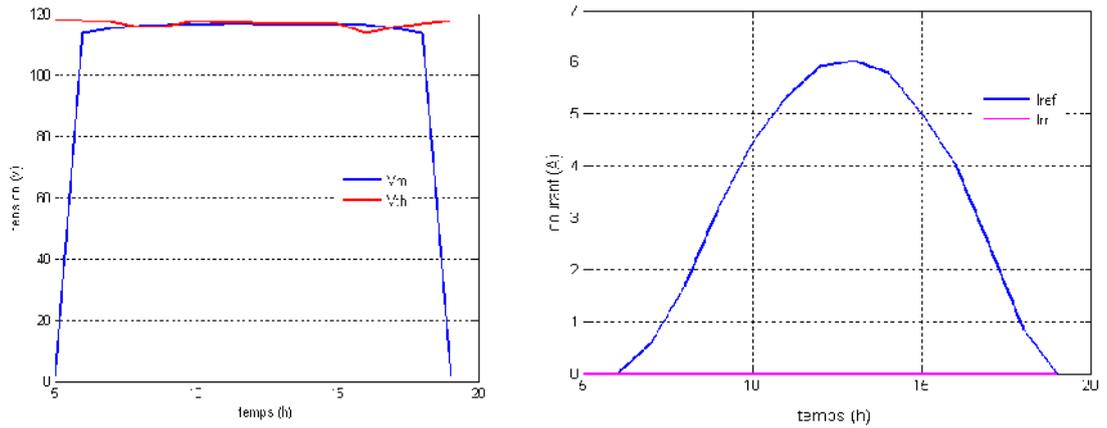


Figure V.24: Evaluation de la tension et du courant de générateur PV calculés et mesurés à l'état 3.

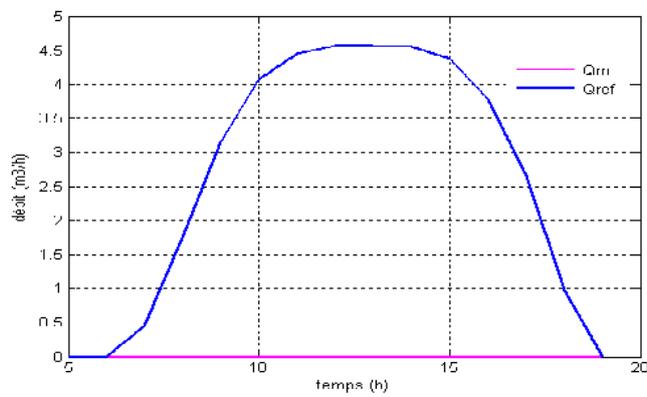


Figure V.25: Evaluation du débit d'eau calculé et mesuré à l'état 3.

L'état 4 : Contient les cas suivants :

Cas7 : Fils de connexion coupés dans une rangé en parallèle

Cas8: Diode anti retour défectueuse

Les résultats de la simulation des ces deux cas de pannes sont représentés dans les figures suivantes :

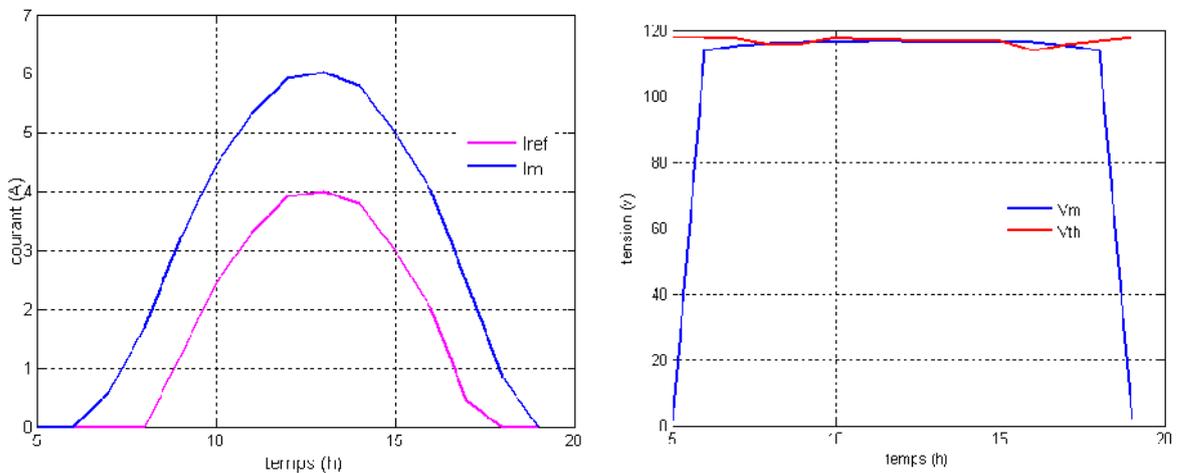


Figure V. 26: Evaluation du courant et de la tension de GPV calculés et mesurés à l'état 4.

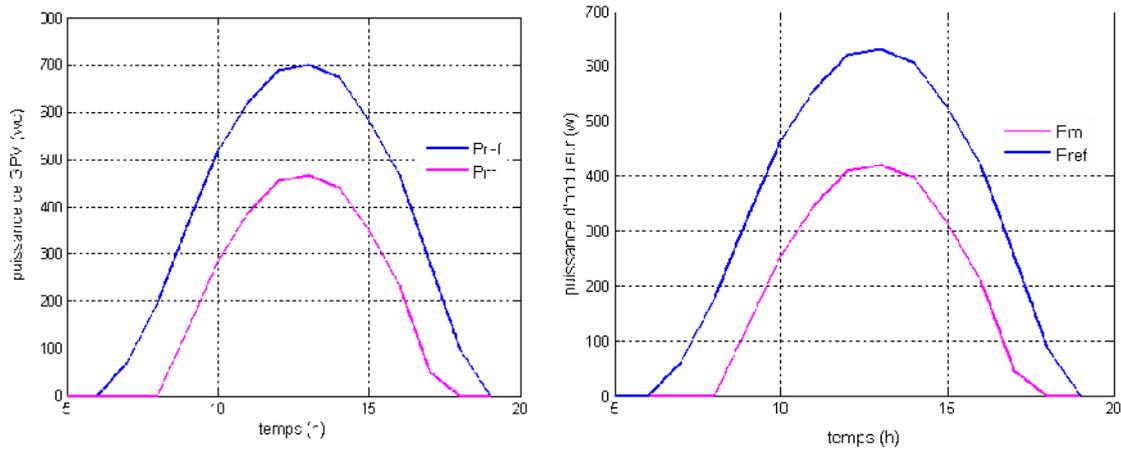


Figure V.27: Evaluation de la puissance GPV et d'onduleur calculées et mesurées à l'état 4.

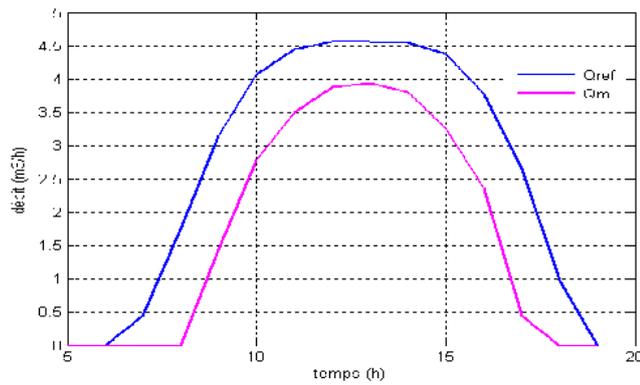


Figure V.28: Evaluation du débit d'eau calculé et mesuré à l'état 4.

V.6.2. Simulation de pannes au niveau d'onduleur

L'état 5 : Contient les cas suivants :

Cas 9 : Onduleur défectueux

Cas 10 : Câble d'alimentation coupé

Les résultats de la simulation de ces deux cas de pannes dans l'état 5 sont représentés dans les figures suivantes :

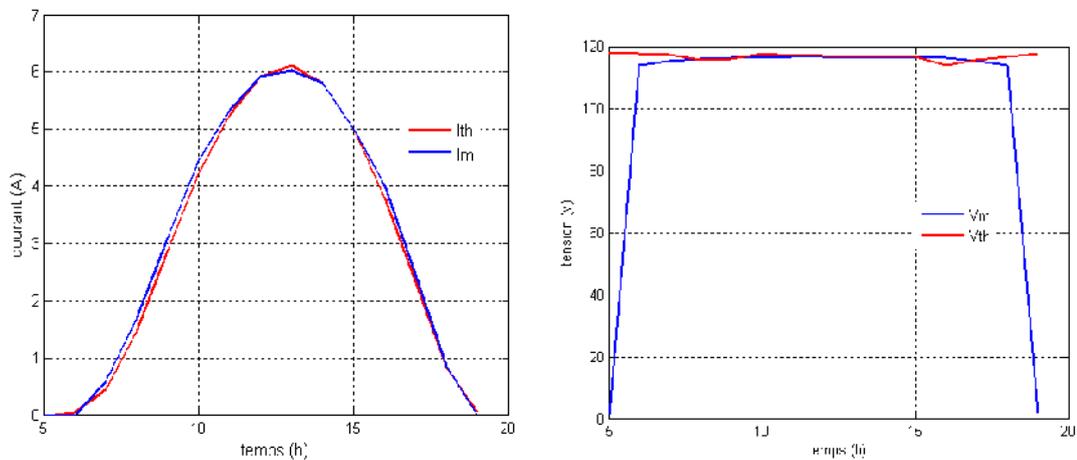


Figure V.29: Evaluation du courant et de la tension de GPV calculés et mesurés à l'état 5.

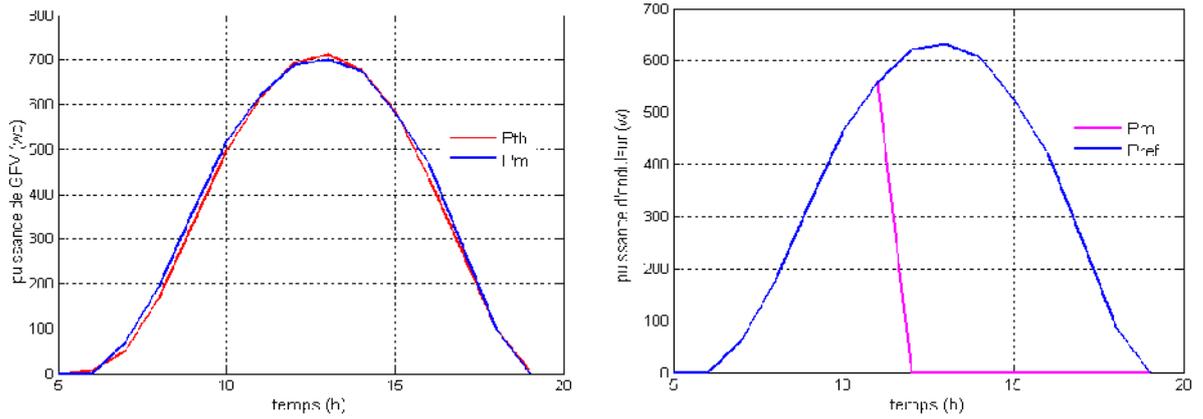


Figure V.30: Evaluation de la puissance de GPV et d'onduleur calculées et mesurées à l'état 5.

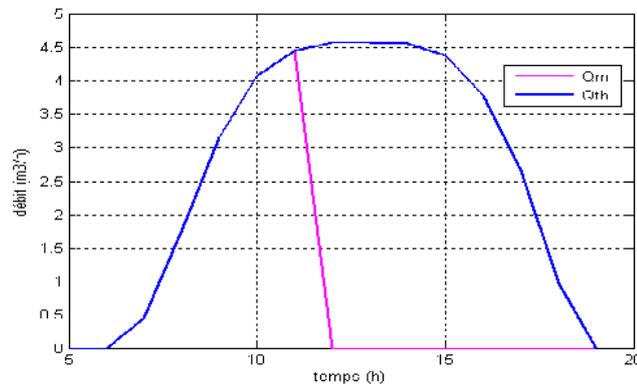


Figure V.31 : Evaluation du débit de GPV calculé et mesuré à l'état 5.

V.6.3. Simulation de pannes au niveau de la motopompe

L'état 6 : Contient les pannes suivantes :

a) En niveau de la pompe

Cas11: Crépine bouchée

Cas12 : Roues défectueuses de la pompe

Les résultats de la simulation de ces deux cas de pannes sont représentés dans les figures suivantes :

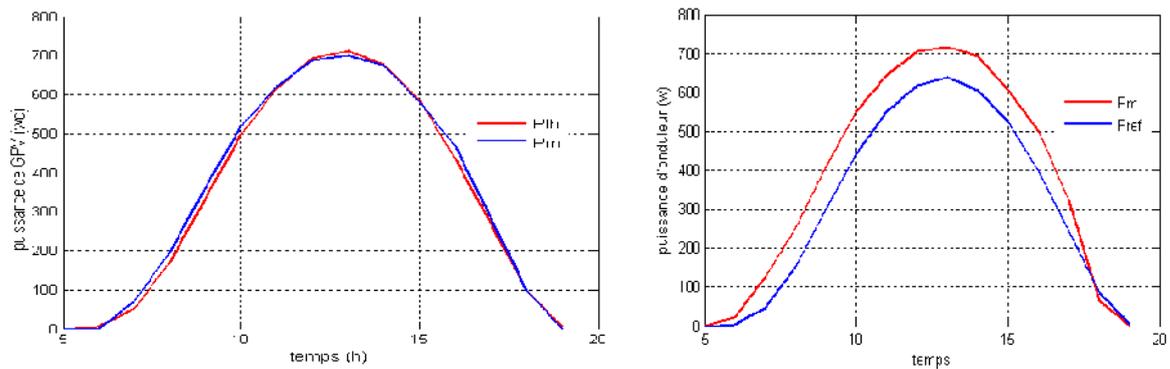


Figure V.32: Evaluation de la puissance de GPV et d'onduleur calculées et mesurées à l'état 6

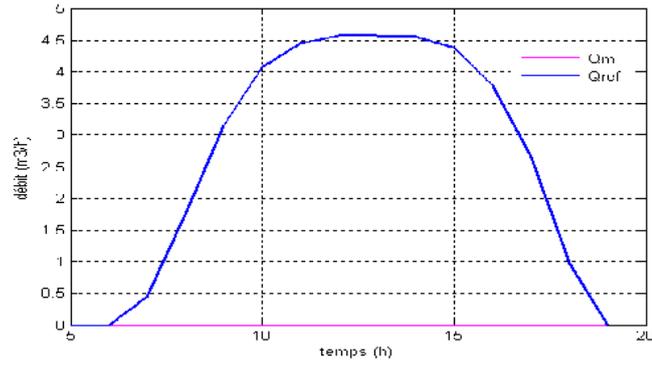


Figure V.33 : Evaluation du débit calculé et mesuré à l'état 6 [a].

b) Niveau de moteur

Cas13: phases de moteur débranchées

Cas14 : garnitures mécaniques défectueuses

Les résultats de la simulation de ces deux cas de pannes dans l'état 6[b] sont représentés dans les figures suivantes :

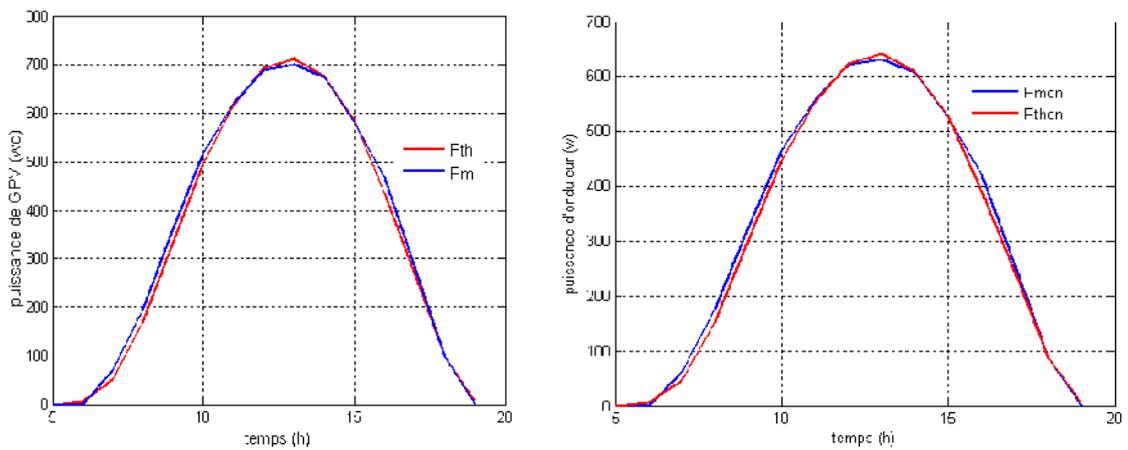


Figure V.34: Evaluation de la puissance de GPV et d'onduleur calculées et mesurées à l'état 6

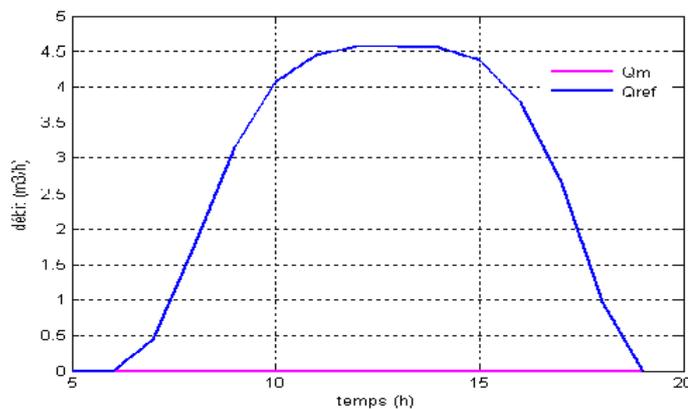


Figure V.35: Evaluation du débit calculé et mesuré à l'état 6 [b].

V.6.4. Analyse de résultats

D'après l'analyse de différents résultats obtenus de la simulation des pannes au niveau des composants du système de pompage photovoltaïque, Nous avons mis en place des règles de décision qui déterminent le mode de fonctionnement des composants sélectionnés dans la zone de défaillance. Ces règles sont implémentées en langage C++. Dans ce cas Nous disposons de sept ensembles de règles de décision relatifs aux composants se trouvant dans les différentes zones de défaillance (voir annexe A).

V.7. Mise en place du système de diagnostic par RàPC sur le banc d'essais

Après avoir présenté le banc d'essais, nous allons maintenant étudier la faisabilité de notre méthode de mise en place d'un système de diagnostic par le RàPC sur notre équipement. En effet, nous allons débiter par la mise en place de la base de cas et deux modèles de connaissance sous-jacents. Ensuite, nous verrons comment nous allons exploiter les différentes phases du cycle de RàPC en commençant par l'élaboration du cas cible, la phase de remémoration guidée par l'adaptation et l'algorithme d'adaptation. Nous exploiterons un cas types de diagnostic.

V.7.1. Réalisation de la base de cas

La réalisation de la base de cas s'appuie sur une analyse de l'historique de pannes, basées sur l'étude de l'AMDEC et sur les arbres de défaillances permettant d'identifier les pannes possibles de l'équipement et ses composants. En effet, nous avons construit une base contenant 14 cas (tableau V.4). La partie problème de cette base est divisée en deux : la partie localisation et la partie fonctionnelle.

La partie localisation reflète l'endroit géographique de la défaillance, elle comporte deux descripteurs : « $ds_1 = \text{zone}$ » et « $ds_2 = \text{sous-zone}$ ».

Cette partie implique un certain nombre de composants potentiellement défaillants. Ces composants sont représentés par la partie fonctionnelle qui comporte onze descripteurs restants : $[ds_3, \dots, ds_{13}]$.

Les descripteurs de cette partie sont caractérisés par trois attributs relatifs à la valeur de composant, son état et son mode de fonctionnement (MF) : $ds_i = (ds_i^{\text{valeur}}, ds_i^{\text{Etat}}, ds_i^{\text{MF}})$.

Concernant la partie solution de la base de cas, nous trouvons la classe de défaillance du composant concerné par les symptômes détecté, bien évidemment le composant défaillant, les

actions à mener pour remédier à cette panne (ou défaillance) et l'endroit dans lequel il faut intervenir. Par conséquent, cette partie solution est composée de quatre de descripteurs, à savoir :

- Ds₁** : classe de défaillance, ce descripteur correspond aux classes de fonctionnement correspondant à la taxonomie des composants.
- Ds₂** : identification du composant défaillant, ce descripteur détermine l'origine de la panne en précisant de quel composant, il s'agit.
- Ds₃** : action de réparation associée, ce descripteur comprend les actions et les stratégies de maintenance à appliquer au composant défaillant.
- Ds₄** : zone de défaillance, ce descripteur détermine le lieu dans lequel la défaillance s'est produite.

		Problème																																		
		localisation		Fonctionnelle																																
N° cas	zone	sous-zone	ds ₃			ds ₄			ds ₅			ds ₆			ds ₇			ds ₈			ds ₉			ds ₁₀			ds ₁₁			ds ₁₂			ds ₁₃			
			cellules	état	MF	diode	état	MF	L'encapsulation	état	M	borne de con	état	MF	fusible	état	MF	fil de con	état	MF	câble d'alim	état	MF	crépine	état	MF	roues	état	MF	phases	état	MF	garniture mécanique	état	MF	
1	GPV	module	cellules	déf	A	diode	bon	N	L'encapsulation	bon	N								fil de con	bon	N	câble d'alim	bon	N												
2	GPV	module	cellules	bon	N	by pass	déf	A	L'encapsulation	bon	N	borne de con	bon	N	fusible	bon	N	fil de con	bon	N	câble d'alim	bon	N													
3	GPV	module	cellules	bon	N				L'encapsulation	saleté	A	borne de con	bon	N	fusible	bon	N				câble d'alim	bon	N													
4	GPV	module	cellules	bon	N				L'encapsulation	l'ombrage	A																									
5	GPV	boîte de conne							L'encapsulation	bon	N	borne de con	desserré	A																						
6	GPV	boîte de jonction	cellules	bon	N				L'encapsulation	bon	N	borne de con	bon	N	fusible	déf	A	fil de con	bon	N																
7	GPV	boîte de conne	cellules	bon	N	diode	bon	N							fusible	bon	N	fil de con	débranché	A																
8	GPV	boîte de jonction	cellules	bon	N	anti retour	déf	A	L'encapsulation	bon	N				fusible	bon	N	fil de con	bon	N																
9	onduleur		cellules	bon	N	diode	bon	N	L'encapsulation	bon	N	borne de con	bon	N	fusible	bon	N	fil de con	bon	N	câble d'alim	bon	N	crépine	bon	N	roues	bon	N	phases	bon	N				
10	onduleur		cellules	bon	N	diode	bon	N	L'encapsulation	bon	N	borne de con	bon	N	fusible	bon	N				câble d'alim	coupé	A													
11	motopompe	pompe	cellules	bon	N													fil de con	bon	N	câble d'alim	bon	N	crépine	bouchée	A	roues	bon	N	phases	bon	N	garniture mécanique	bon	N	
12	motopompe	pompe	cellules	bon	N				L'encapsulation	bon	N	borne de con	bon	N				fil de con	bon	N						roues	Déf	A	phases	bon	N	garniture mécanique	bon	N		
13	motopompe	moteur	cellules	bon	N	diode	bon	N	L'encapsulation	bon	N				fusible	bon	N	fil de con	bon	N	câble d'alim	bon	N	crépine	bon	N	roues	bon	N	phases	débranchées	A				
14	motopompe	moteur	cellules	bon	N	diode	bon	N	L'encapsulation	bon	N	borne de con	bon	N	fusible	bon	N	fil de con	bon	N				crépine	bon	N	roues	bon	N	phases	bon	N	garniture mécanique	déf	A	

Tableau V.4 : Aperçu de la partie problème de la base de cas d'un système de pompage photovoltaïque.

N° cas (RD fort)	solution			
	Ds ₁	Ds ₂	Ds ₃	Ds ₄
	Classe de défaillance	Identification de composant défaillant	Action de réparation	Zone de défaillance
1	GPV	Cellules	Changer le module	Module de GPV
2	GPV	Diode by passe	Changer la diode	En niveau d'un module de GPV
3	GPV	L'encapsulation	Nettoyer le GPV	En dessus de GPV
4	GPV	L'encapsulation	Dégager l'ombrage	En dessus de GPV
5	GPV	Borne de connexion	Resserrer les bornes	Boite de connexion de GPV
6	GPV	Fusible	Changer le fusible	Boite de jonction de GPV
7	GPV	Fils de connexion	Changer les fils de connexion	Boite de connexion de GPV
8	GPV	Diode anti retour	Changer la diode	Boite de jonction de GPV
9	Onduleur	Onduleur	Changer l'onduleur	L'onduleur
10	Onduleur	Câble d'alimentation	Changer le câble	L'onduleur
11	Motopompe	Crépine	Nettoyer la crépine	Pompe de groupe motopompe
12	Motopompe	Roues	Changer les roues	Pompe de groupe motopompe
13	Motopompe	Phases	Changer les phases	Moteur de groupe motopompe
14	Motopompe	Garniture mécanique	Remplacer les garnitures mécaniques	Moteur de groupe motopompe

Tableau V.5 : Aperçu de la partie solution de la base de cas d'un système de pompage Photovoltaïque.

Le cas 11 est un cas qui reflète une défaillance au niveau de la « crépine ». La partie localisation détermine le lieu de la panne « la pompe », qui définit par le graphe d'équipement. D'après les deux premiers descripteurs, la pompe ne débite pas d'eau.

Ensuite la partie fonctionnelle de cas indique l'état des composants dans la zone spécifiée. Le descripteur « ds₁₀ » qui reflète le composant « crépine » est dans un état « bouchée » engendrant un mode de défaillance « anormal », Les autres descripteurs reflètent l'état de quelques composants, qui sont dans un état de fonctionnement « normal »

Quant à la partie solution, le descripteur « Ds₁ » indique que la classe de défaillance du composant concerné est « motopompe ». « Ds₂ » précise que le composant défaillant est « la Crépine » ainsi, l'action de réparation associée qu'est décrite par le descripteur « Ds₃ » préconise le nettoyage de la crépine.

Enfin, le descripteur « DS_4 » indique que la défaillance s'est produite au niveau du groupe motopompe.

V.7.2. Modèle hiérarchique des composants

L'analyse fonctionnelle des composants du système de pompage photovoltaïque nous a permis de regrouper ces composants en famille fonctionnelle, donnant naissance à un modèle taxonomique des composants. Etant donné que le système dispose d'une multitude de composants, nous montrons sur la (figure V.36) une partie du modèle hiérarchique des composants.

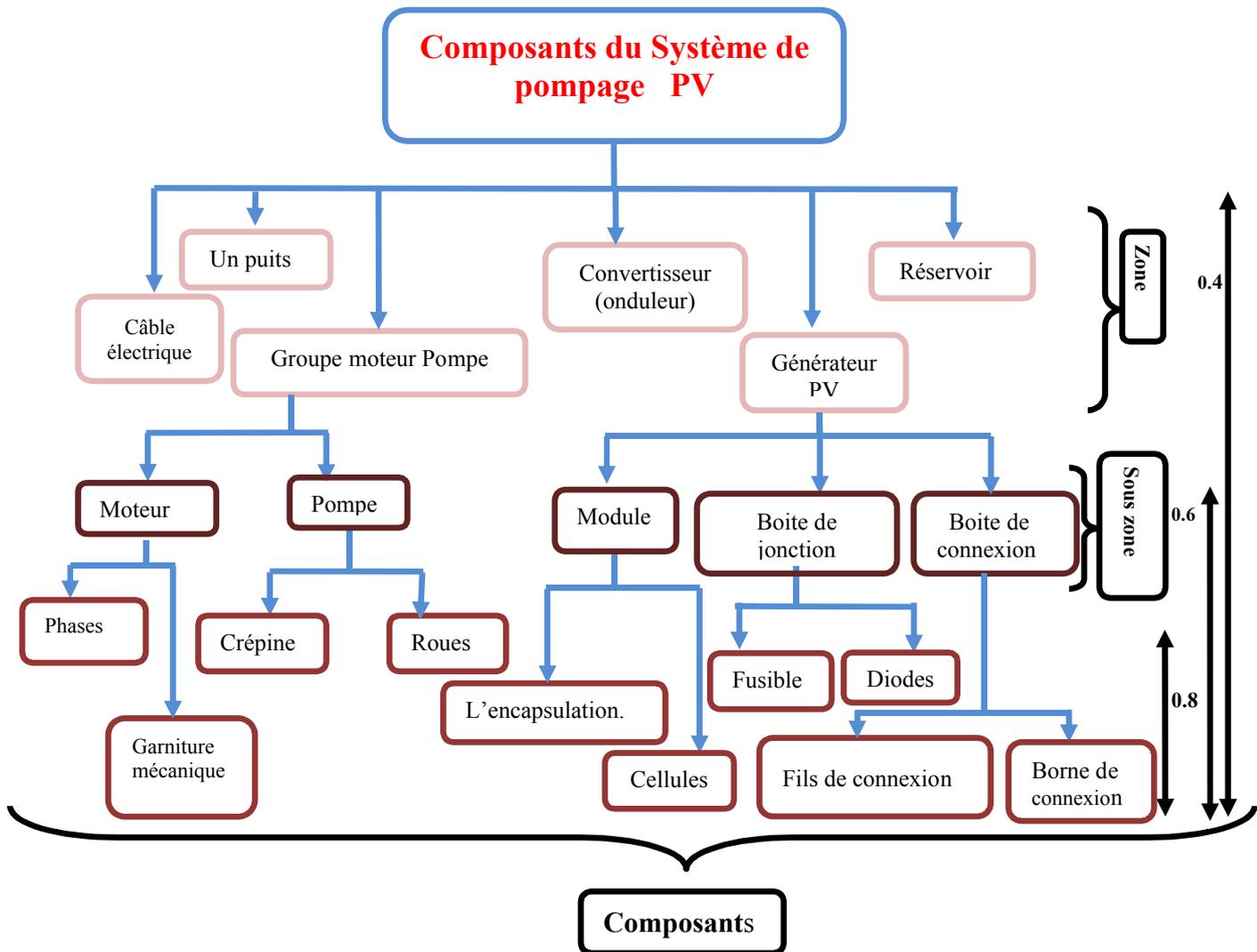


Figure V.36: Aperçu du modèle hiérarchique des composants de système de pompage PV.

- Cette modélisation des composants servira également aux autres phases de raisonnement à partir de cas telles que la remémoration et l'adaptation.

V.7.3. Modèle de contexte général de l'équipement

V.7.3.1. Graphe d'équipement

Le modèle de l'équipement reflète le découpage spatial de notre système de pompage photovoltaïque, qui est partitionné en zone et sous zone, auxquelles sont associés les composants présents dans l'endroit précis. Les ensembles des composants à chaque zone ou sous zone constituent un contexte dans lequel le composant défaillant est identifié. Un aperçu du graphe contextuel de ce modèle est montré à la (figure V.37).

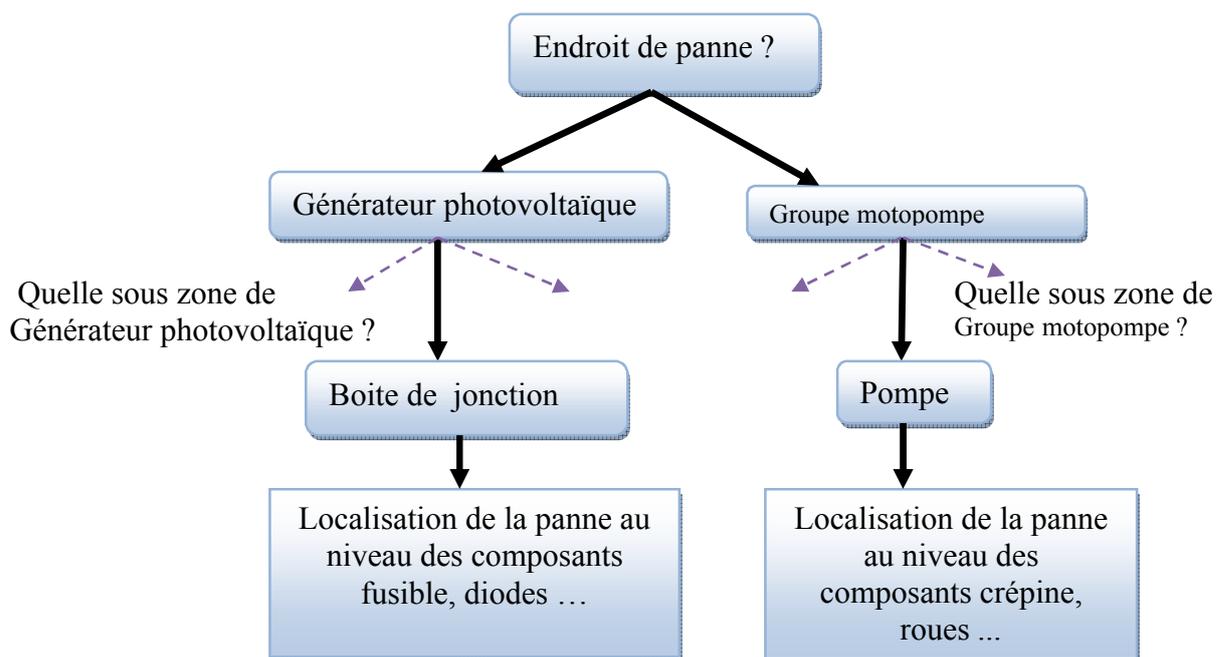


Figure V.37: Aperçu d'une partie de graphe contextuel du modèle de l'équipement.

V.8. Cycle du RàPC

V.8.1. Elaboration du cas cible

Soit une panne produite au niveau motopompe, notre système est alors sollicité et le processus du diagnostic s'enclenche.

Etape 1 : On détecte le symptôme et la zone de composant défaillant grâce à l'utilisation du module de contrôle des données d'acquisition, qui indique la zone « motopompe » par un signal d'alerte.

Etape 2 : on parcourt le graphe contextuel du modèle de l'équipement (figure V.38). La panne est localisée au niveau de la sous-zone « pompe » impliquant les composants potentiellement

défaillants suivant : « Crépine, roues... » Dans ce cas, la phase d'élaboration s'initialisera par le remplissage des descripteurs associés à la partie localisation.

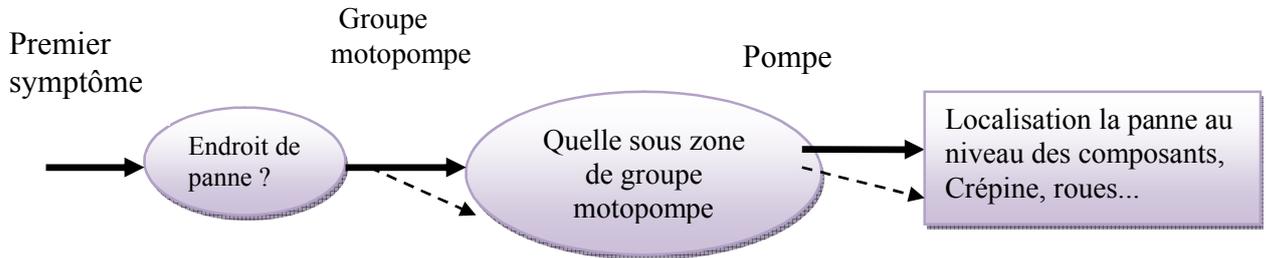


Figure V.38: Exemple de la localisation des composants potentiellement défaillants via le graphe contextuel du modèle de l'équipement.

Etap3 : on propose un formulaire composé de questions au technicien, qui va effectuer quelque testes de contrôle sur l'état actuel des composant associé à la zone de la panne.

Etape 4: on récupère le rapport du technicien. Ensuite on remplit les descripteurs de la partie fonctionnelle de problème du cas par l'état réel et mode de fonctionnement des composants concerné dans la zone impliqué.

De ce fait, le cas cible obtenu sera le suivant :

ds_1		ds_2		ds_3		ds_5				ds_6				ds_8				ds_9				ds_{10}				ds_{12}			
zone	Sous -zone	Cell	Etat	M	F	encapsulation	Etat	M	F	Borne de con	état	M	F	fils de con	Etat	M	F	câble d'alim	état	M	F	crépine	état	M	F	roues	état	M	F
Moto pompe	pompe	Cell	bon	N		encapsulation	bon	N		Borne de con	bon	N		fils de con	bon	N		câble d'alim	bon	N		crépine	bouchée	A		roues	bon	N	

Tableau V.6: Formalisation de du cas cible.

V.8.2. Application de la méthode de remémoration guidée par l'adaptation

Pour appliquer la méthode de remémoration guidée par l'adaptation proposée. Tout d'abord, nous commençons par la mise en place des relations de dépendance et ensuite nous traitons les deux phases de remémoration et d'adaptation via un exemple d'un cas type d'adaptation.

V.8.3. Mise en place de la relation de dépendance (RD)

❖ **RD = Forte & même classe de fonctionnement**

Soit une défaillance qui est apparue au niveau de la crépine est représentée par le cas cible1 (tableau V.7). Les cas sources les plus similaires au cas cible1 sont les cas source (11,12).

	ds_1	ds_2	ds_3			ds_5			ds_6			ds_8			ds_9			ds_{10}			ds_{12}			
Cible 1	Moto pompe					L'encap			Borne de con			fil de con			câble d'alim			crépine	bouchée	A	roues	bon	N	
		pompe	Cell	bon	N	sulation	bon	N	con	bon	N	con	bon	N	bon	bon	N	crépine	bouchée	A	roues	bon	N	
Cas11	Moto pompe											fil de con			câble d'alim									
		pompe	Cell	bon	N							con	bon	N	bon	bon	N							
Cas12	Moto pompe					L'encap			Borne de con			fil de con										roues	déf	A
		pompe	Cell	bon	N	sulation	bon	N	con	bon	N	con	bon	N										

Tableau V.7 : Identification les cas source les plus similaires au cas cibles 1.

➤ **Mesure de la remémoration**

$$M_R(srce_{11}, cible_1) = \frac{(1 \times 1) + (1 \times 1) + (1 \times 1 \times 1 \times 1)}{8} = 1$$

$$M_R(srce_{12}, cible_1) = \frac{(1 \times 1) + (1 \times 1) + (1 \times 1 \times 1 \times 0)}{6} = 0,85$$

➤ **Mesure d'adaptation**

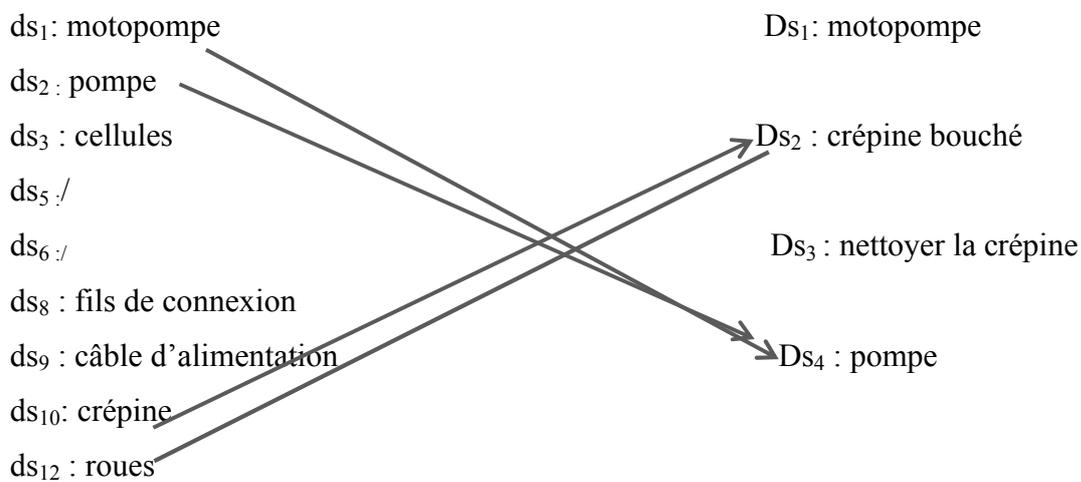
Maintenant, nous procédons au calcul de la mesure d'adaptation (M_A) des cas sources les plus similaires au cas cible1. Nous rappelons que la mesure M_A est calculée seulement par rapport aux descripteurs de la partie fonctionnelle du cas en l'occurrence du descripteur ds_3 jusqu'au descripteur ds_{12} .

$$M_A(srce_{11}, cible_1) = \frac{(1 \times 1 \times 1) + (1 \times 1 \times 1) + (1 \times 1 \times 1) + (4 \times 1 \times 1) + (1 \times 1 \times 1)}{5} = 1,6$$

$$M_A(srce_{12}, cible_1) = \frac{(1 \times 1 \times 1) + (1 \times 1 \times 1) + (1 \times 1 \times 1) + (1 \times 1 \times 1) + (2 \times 1 \times 1)}{5} = 1,2$$

D'après les résultats de la mesure d'adaptation, nous constatons que $M_A(srce_{11}, cible_1) > M_A(srce_{12}, cible_1)$. De ce fait, le cas source 11 est le cas qui va être sélectionné pour la phase d'adaptation.

La représentation des relations de dépendance (RD) entre les descripteurs de problème et les descripteurs de solution du cas source 11 est la suivante :



Nous regardons les relations de dépendance (RD) du cas source 11. A noter que les flèches représentent les « RD = forte », les segments « RD = faible » et lorsqu'il n'y a pas de relation « RD = pas de relation ».

Nous constatons dans un premier temps, que la valeur de RD du couple (Ds₂, ds₁₀) est « RD = Forte ». Dans un deuxième temps, les deux descripteurs Ds₂, ds₁₀ représentent le même composante « crépine » et donc ils ont la même appartenance de classe. De ce fait, nous sommes dans le cas de « RD = forte et même classe de fonctionnement ».

Désormais, nous pouvons appliquer l'algorithme d'adaptation :

Les deux valeurs ds₁₀ remémoré et dc₁₀ sont égales alors nous affectons directement la solution de Ds₂ à la solution Dc₂.

La solution est donc la suivante : nettoyer la crépine bouchée appartenant à la classe « pompe » au niveau de groupe motopompe.

V.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le banc d'essais de système de pompage photovoltaïque ainsi que ces différents composants. Ensuite, nous nous sommes intéressés beaucoup plus à répertorier les principales pannes se produisant sur les différents éléments du système ainsi que les causes et leurs solutions. Pour ce la, nous avons envisagé de modéliser les différentes parties du système de pompage, pour mettre en œuvre une méthode de contrôle des données d'acquisition, but de confirmer le bon fonctionnement et dysfonctionnement de notre système de pompage photovoltaïque.

Pour la mise en place complète de notre système de diagnostic par RàPC et la vérification de la faisabilité des résultats obtenus, nous avons fait construire la base de cas et le modèle hiérarchique ainsi que le contexte général des composants.

Ensuite, nous avons appliqué la méthode de remémoration guidée par l'adaptation ainsi que l'algorithme d'adaptation. En effet, nous avons exploité deux mesures à savoir : la remémoration et l'adaptation. Une fois que le cas est choisi, nous avons appliqué l'algorithme d'adaptation dans le cas ou la RD forte et même classe de fonctionnement.

Enfin, Nous avons validé l'algorithme sur un nombre de cas limité afin de prouver la faisabilité de notre méthode.

Conclusion générale

Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire à la maintenance corrective qui est exécutée après la détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. Les actions de la maintenance corrective ne sont exécutées qu'après la réalisation d'un diagnostic. Ce diagnostic identifiera la cause de la défaillance pour donner la nature des actions de réparation à accomplir.

Par conséquent, nos travaux ont porté sur l'étude de la mise en place d'un système d'aide au diagnostic industriel basé sur l'approche du raisonnement à partir de cas (RàPC).

Pour comprendre le fonctionnement des systèmes de pompage photovoltaïque, nous avons introduit les aspects nécessaires des différents éléments constituant ce système.

Pour maintenir ce système, nous avons défini ce que sont la fonction et la tâche de maintenance. Ensuite, nous avons expliqué les différents types de maintenance afin de comprendre les niveaux d'applications et de trouver un outil d'aide à la décision qui peut être agencé en modules intelligents concourant à la maintenance d'équipements et à la gestion des stratégies de maintenance.

Vu l'importance de trouver un outil de diagnostic, nous avons donné les notions de bases du diagnostic ainsi que les principes fondamentaux de l'approche du RàPC.

Ensuite, nous avons présenté un état de l'art sur des systèmes de diagnostic par RàPC afin de présenter nos choix et nos démarches concernant la construction d'un système d'aide au diagnostic par RàPC qui est représenté par le système Orientés Connaissances.

Ce système manipule des cas qui ont une représentation générique, plus complexe et orientée objet. Cette représentation prend appui sur la définition du diagnostic qui comporte trois parties : la première partie concerne la localisation de la zone de la défaillance. La deuxième partie « fonctionnelle » est caractérisée par la valeur du composant associé à une classe fonctionnelle dans le modèle hiérarchique, son état et son mode de fonctionnement. Les modes de fonctionnement sont définis par des règles de décisions. Ces deux parties forment la partie problème du cas. La troisième partie forme la partie solution du cas, concerne l'identification du composant défaillant et sa classe fonctionnelle. Les cas sont associés à deux modèles de connaissances de l'équipement à diagnostiquer, à savoir : le modèle de contexte et le modèle de taxonomie des composants. En effet, l'analyse de l'équipement

détermine des ensembles de ses composants. Chaque ensemble regroupe des composants qui assurent les mêmes fonctions. Cette analyse fonctionnelle permet donc d'avoir une modélisation hiérarchique de l'équipement. Le modèle de contexte général d'équipement se base sur les flux des entités de l'équipement étudié et sur l'analyse de sa décomposition. Cette décomposition détermine les fonctions assurées par l'équipement et ses composants. Nous associons ces deux modèles à la base de cas qui reflète l'étude dysfonctionnelle des composants. Nous mettons un soin particulier à l'étude des deux phases de remémoration et d'adaptation. Pour se faire, nous avons établi un état de l'art de ces deux phases. Dans cette mouvance, nous avons proposé d'utiliser une méthode de remémoration guidée par l'adaptation en mettant en place deux mesures : la mesure de remémoration (M_R) et la mesure d'adaptation (M_A). La mesure de remémoration est définie par quatre mesures de similarité locales, associées à chaque type de descripteurs, relatives à l'état du composant, à sa classe d'appartenance, à son mode de fonctionnement et à sa présence. La mesure d'adaptation a pour objectif de choisir, parmi les cas remémorés, le cas le plus facilement adaptable. Cette mesure tient compte du mode de fonctionnement des composants en mettant un poids λ_i . Ce poids est important dans la détermination du composant défaillant.

Ainsi, nous avons proposé un algorithme d'adaptation dédié aux systèmes de diagnostic par RàPC. Cet algorithme s'appuie sur les relations de dépendance des descripteurs de problèmes et de solutions. Ces relations de dépendance sont primordiales dans la détermination des étapes d'adaptation.

Enfin, nous avons présenté le banc d'essais des systèmes de pompage photovoltaïque au niveau du centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzaréah (CDER). En effet, nous avons proposé d'utiliser une méthode de la détection de pannes, qui est basée sur la comparaison des paramètres mesurés des données d'acquisition par apport aux paramètres calculés par les modèles mathématiques. Cela nous a permis de simuler les différentes pannes ainsi que la réalisation de la base de cas. Ensuite nous avons mis en place le système orienté connaissances, où nous avons appliqué la méthode de remémoration guidée par l'adaptation ainsi que l'algorithme d'adaptation sur un cas type d'adaptation, en fonction de la nature des relations des dépendances.

Notons que dans notre travail, nous avons procédé à l'implémentation de notre système de diagnostic par un langage C++ Builder assurant le diagnostic du système de pompage photovoltaïque.

Perspectives

Plusieurs perspectives se dégagent suite au travail réalisé. Des extensions sont envisageables. Nous pensons particulièrement aux points suivants :

- ✓ L'évolution des modèles de connaissances est également un point important à développer car les équipements peuvent évoluer à n'importe quel moment en rajoutant d'autres composants.
- ✓ Maintenance de la base de cas.
- ✓ La recherche des nouvelles solutions pour les nouvelles pannes.
- ✓ Un autre point à considérer concerne l'utilisation d'une méthode d'analyse profonde du système de manière à avoir les connaissances suffisantes à l'expression de ces relations de cause à effet (les graphes contextuels, la logique floue...etc.).
- ✓ Nous souhaiterons intégrer notre système d'aide au diagnostic par RàPC dans une Plate forme d'E_ maintenance sous forme d'un module. Ce module sera en liaison avec d'autres modules représentant des bases de connaissances, des systèmes d'acquisition de données et une interface homme-machine.

Références bibliographiques

- [1] J.Royer, Th. Djiako, E. Schiller & B. Sada Sy, Le Pompage photovoltaïque, Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, (2002).
- [2] Z. Bendjellouli, Contribution à la modélisation d'une cellule solaire, Mémoire de Magister, Université de Bechar (2009).
- [3] N.Seddaoui, Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur photovoltaïque connectée au réseau électrique, Mémoire de Magister, Université de Sétif UFAS, (2009).
- [4] W. Achim, Design issues of photovoltaic systems and their grid integration, PhD, U.K. leuven, (2003).
- [5] S.Alem-Boudjmline, Réalisation et Caractérisation Des Cellules Photovoltaïques Plastiques , Thèse de Doctorat, Université d'Angers, (2004).
- [6] N. Oleksiy, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigués , Thèse de Doctorat, Université de Lyon,(2005).
- [7] S.Issaadi, Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones , Mémoire de Magister, Laboratoire LDCCP, ENP (2006).
- [8] R. A. Messenger, J. Ventre, Photovoltaic systems engineering, Second édition, CRC Press LLC, (2004).
- [9] B. Flèche, D. Delagnes, Energie Solaire Photovoltaïque , STI ELT Electrotechnique, (2007)
- [10] O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur , Thèse de Doctorat, de l'école normale supérieure de CACHAN, (2002).
- [11] A. Benmosbah & CH. Mecheroui, Implémentation sur FPGA des méthodes MPPT : "P&O" et "floue optimisée par les Algorithmes Génétiques, Mémoire d'Ingénieur, Ecole Nationale Polythèque, (2006).
- [12] P. Angel Cid, Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques ,Thèse de Doctorat, GEET, Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAAS-CNRS), Toulouse, (2006).
- [13] A. Hadj Arab, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque de faible puissance , Mémoire de Magister, HCR, (1989).
- [14] M. Benghanem, Etude de la performance des systèmes photovoltaïque autonomes Travaillant à poste fixe, Thèse de Doctorat, U.S.T.H.B, (1999).

- [15] B. Mohammed, Modélisation d'un Système de Captage Photovoltaïque Autonome , Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar, Institut des Sciences Exactes, (2008).
- [16] M.L. Louazene, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla , Mémoire de Magister, Université El Hadj Lakhdar Batna, (2008).
- [17] T.F. El Shatter & M.T. El Hagry, Sensitivity Analysis of the Photovoltaic Model Parameters, IEEE, Cir. and Syst., Vol. 2, pp. 914 – 917, (1999).
- [18] N. Kamel, Aide à la mise au point d'un banc de test photovoltaïque , Thèse d'Ingénieur, E.N.P, (2008).
- [19] M. Alonso & F. Chenlo, Evaluation des équipements de pompage pour des applications agricoles alimentés avec de l'énergie solaire photovoltaïque , CIEMAT, Espagne, (1994).
- [20] E. Lorenzo et F.Chenlo, Evaluation des équipements de pompage pour des applications agricoles alimentés avec de l'énergie solaire photovoltaïque, CIEMAT, Espagne, (1994).
- [21] www.grundfos.com
- [22] A. Djoudi, Dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque , Mémoire de Magister, Université Saad Dahleb Blida, (2003).
- [23] R. Maouedj, Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzaréah , Thèse de Magister, Université de Tlemcen (2005).
- [24] AFNOR Norme X60-319/NF EN 13306, Terminologie de la maintenance, AFNOR, Paris (2001).
- [25] I. Rasovska, Contribution à une méthodologie de capitalisation des connaissances basée sur le raisonnement à partir de cas : Application au diagnostic dans une plateforme d'e-maintenance , Thèse de Doctorat, L'UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté, (2006).
- [26] G. Zwingelstein, Diagnostic de défaillance théorie et pratique pour les systèmes industriels, Hermes ,Paris, (1995).
- [27] W. Bussenault & M. Pretet, Economie et gestion de l'entreprise, Vulbert, 3^e édition, (2002).
- [28] R.Fellouah, Contribution au Diagnostic de Pannes pour les Systèmes Différentiellement Plats , Thèse de Docteur, Université de Toulouse, délivré par l'INSA de Toulouse, (2007).
- [29] M.K.Haouchine, Remémoration guidée par l'adaptation et maintenance des systèmes de diagnostic industriel par l'approche du raisonnement à partir de cas , Thèse de Doctorat, de département Automatique et systèmes Micro-Mécatronique (UMR CNRS6596), Université de France –Comté, (2009).

- [30] B. Dubuisson, E. Boutleux, P. Dague, T. Denoeux, E. Didelet, Y. Gandvalet et M. Masson, intelligence artificielle et reconnaissance de forme, Diagnostic , Hermès, (2001).
- [31] R. Toscano, Commande et diagnostic des systèmes dynamiques : Modélisation, Analyse, Commande par PID et par retour d'état , Diagnostic. Ellipses, (2005).
- [32] N.Palluat, Méthodologie de surveillance dynamique à l'aide des réseaux neuro-flous temporels , Thèse de Doctorat, Université de France-Comté, (2004).
- [33] N. Armaghan, , Contribution à un système de retour d'expérience basé sur le raisonnement à partir de cas conversationnel , Thèse de Doctorat, application à la gestion des pannes de machines industrielles, Nancy Université, Institut National Polytechnique de Lorraine, (2009).
- [34] A. Mille, B. Fuchs & O. Herbeaux, A unifying Framework for Adaptation in Case-Based Reasoning Workshop on Adaptation in Case-Based Reasoning, vol.96, pp.22-28, Budapest, Hungary, August, (1996).
- [35] A. Aamodt, E. Plaza, Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches AI Communications , vol.7, n°1, pp.39-59, (1994).
- [36] J.R. Quinlan, Induction of decision trees , Machine Learning, (1986).
- [37] B. Fuchs, J. Lieber, A. Mille, et A. Napoli, Towards a unified theory of adaptation in case-based reasoning. In Case Based Reasoning Research and Development, the 3rd International Conference on Case-Based Reasoning (ICCBR'99), vol.1650 de LNAI, pp.104–117, Seon Monastery, Germany, August 25-27, Springer Verlag, (1999).
- [38] J. Lieber, M. d'Aquin, S. Brachais et A. Napoli., Une étude comparative de quelques travaux sur l'acquisition des connaissances d'adaptation pour le raisonnement à partir de cas , In 12ème Atelier de Raisonnement à Partir de Cas (RàPC'04), pp.53–60, Villetaneuse, France, (2004).
- [39] B.Fuchs, J.Bonjour, E.Chabel, B.Morello & N.Matta, Retour et capitalisation d'expérience, outils et démarche , In Renaud, raisonnement à partir de cas, La plainte Saint-Denis, AFNOR, p. 184, (2008).
- [40] L.Lamontagne, G.Lapalme, Raisonnement à base de cas textuel état de l'art et perspectives futures , Université de Montréal, Revue de l'intelligence artificielle. Vol 16, n°3 Lavoisier, paris, pp.339-366, (2002).

- [41] R.weber& D.wu , Knowledge Management for Computational Intelligence systems, In Proceeding of the Eighth IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE'04),Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE),1530-2059,pp.116-125.(2004).
- [42] R.Bénard, P. De Loor, La révision et l'apprentissage de cas pour les simulations temps-réel en réalité virtuelle , 16^e Atelier du raisonnement à partir de cas, Nancy, France, (2008).
- [43] M.M. Richter, The Knowledge Contained in Similarity Measures. Invited talk, First International Conference on Case-Based Reasoning (ICCB'95), Sesimbra, Portugal, (1995).
- [44] J. Kolodner, Making the implicit explicit: Clarifying the principles of case-based reasoning . In Case-Based Reasoning: Experiences, Lessons and Future Directions, pp. 349–370, press, Mit Press, (1996).
- [45] J. Main, Dillon T.S. and Shiu S.C.K., A tutorial on case-based reasoning. Soft Computing in Case Based Reasoning, pp. 1-28, (2000).
- [46] L. Lamontagne, Une approche CBR textuel de réponse au courrier électronique , Thèse de Doctorat, Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal, (2004).
- [47] M.K. Haouchine, B. Chebel-Morello et N. Zerhouni, Evolution d'un Système de Raisonnement à Partir de Cas dédié au Diagnostic Industriel , Actes du 15ème Atelier de Raisonnement à Partir de Cas, RàPC, Grenoble, France, (2007).
- [48] M.K. Haouchine, B. Chebel-Morello et N. Zerhouni, Algorithme d'Adaptation pour le Diagnostic Technique , Actes du 16ème Atelier de Raisonnement à Partir de Cas, RàPC, Nancy, France, (2008).
- [49] M.K. Haouchine, B. Chebel-Morello et N. Zerhouni, Case-base maintenance approach ,International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM'07). Beijing, (2007).
- [50] A.Hamidat, Simulation des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation , Thèse de Doctorat, Université Tlemcen (2004).
- [51] <http://erwan.neau.free.fr/Toolbox/AMDEC.htm>

- [52] N.Limnios , Arbres de défaillances , 2^e édition revue et augmenté, Lavoisier, Hermes science, 221 pages, ISBN 2-7462-1067-3, (2007).
- [53] K. Khousem and L. Khousem, Optimum matching of direct-coupled electromechanical loads to a photovoltaic generator , IEEE trans. on energy conversion, Vol8, N° 3, (1993).
- [54] W. De Soto, Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, Thesis Doctoral, Sdar Energy laboratory, University of Wisconsin, Modison, (2004).

Annexes

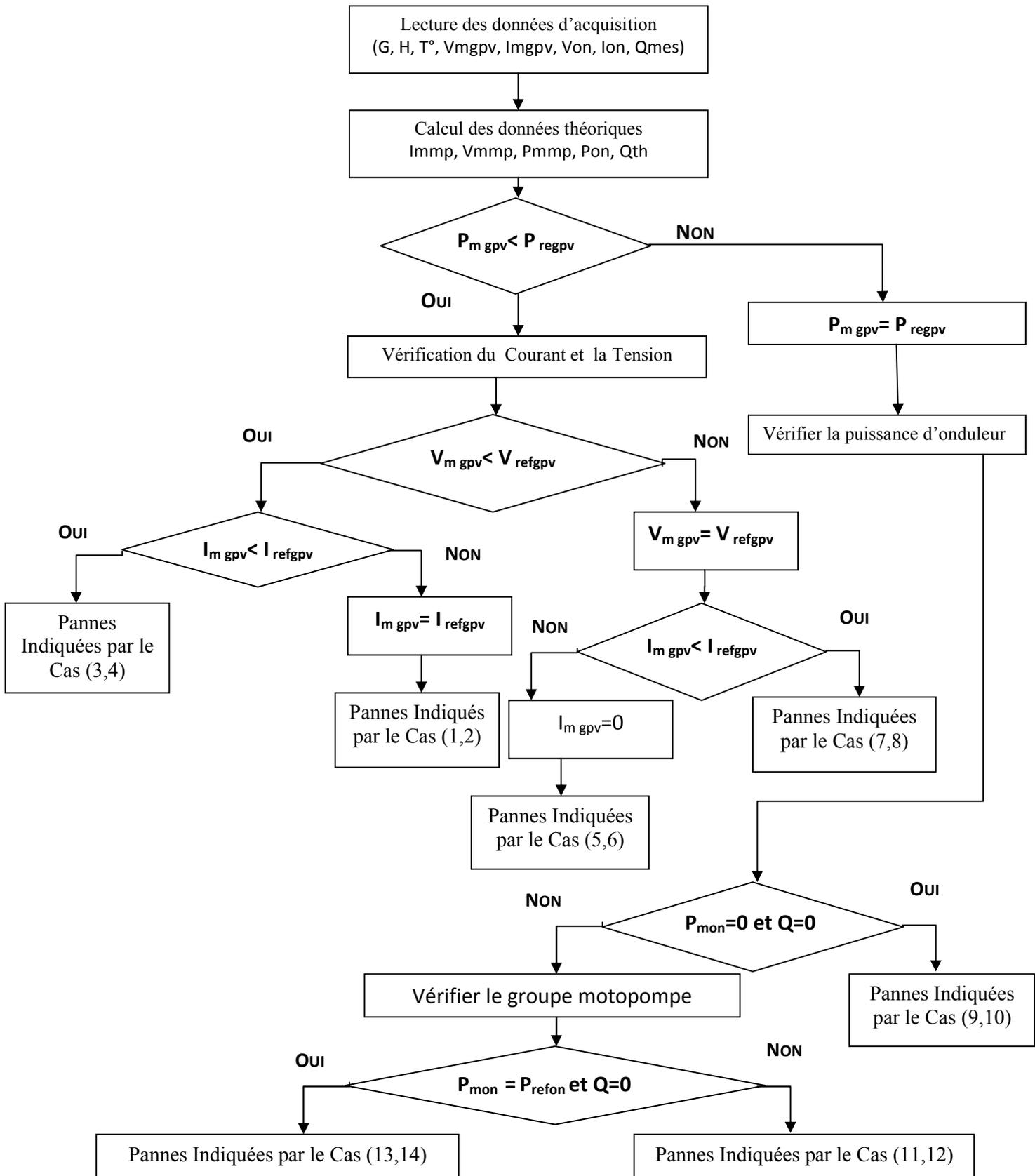


Figure A : Organigramme des règles de décision des problèmes du système de pompage photovoltaïque

Algorithme d'adaptation

L'algorithme d'adaptation décrit ci-dessous adapte descripteur par descripteur

Entrée : cas remémoré (ds_i^{rem} , Ds_j^{rem})

Sortie : descripteurs solution du cas adapté Dc_j

Pour chaque « Ds_j^{rem} » faire // $j = 1 \dots m$.

Créer une liste contenant les valeurs de RD_{ji} qui sont en relation avec les descripteurs de problème source « ds_i »  Sélection du couple (RD_{ji} , ds_i^{rem})

Fin Pour

Pour l'ensemble des couples (RD_{ji} , ds_i^{rem}) faire

Si ($RD = forte$) alors

Si (Ds_j^{rem} est de la même classe que ds_i^{rem}) alors

Dc_j  ds_i^{rem} (Mettre la valeur de ds_i^{rem} dans Dc_j)

Sinon

Si ($RD = aucune$) alors // Aucune relation existante

Aucune adaptation n'est faite

Dc_j  aucune valeur

Fin Si

FinPour

Figure B : Algorithme d'adaptation.

L'algorithme traite de l'adaptation d'un descripteur. Après la remémoration lorsqu'on sélectionne un cas remémoré (ds_i^{rem} , Ds_j^{rem}) l'étape de l'adaptation s'enclenche. La première étape, l'étape d'initialisation permet de créer une liste de couples ayant une relation soit forte soit faible. Suivant l'intensité de la relation, le traitement diffère. Par conséquent la deuxième étape dépendra des valeurs de RD et des classes des descripteurs.

Si en parcourant la liste, on trouve une valeur de « $RD = forte$ » alors on sélectionne le couple en question et on regarde la classe de « Ds_j^{rem} » et de « ds_i^{rem} ». S'ils ont la même classe parent, l'influence de cette substitution va être prise en compte dans « Ds_j^{rem} » pour attribuer cette nouvelle valeur à « Dc_j ».

La base de données d'acquisition constitue le cœur du programme. Car nous manipulons les différentes tâches du programme de diagnostic grâce à cette base.

Pour l'affichage des données d'acquisition, nous cliquons sur l'icône représenté par un document ouvert. En effet, cette icône nous permet de sélectionner un fichier des données dans la liste (Figure 3).

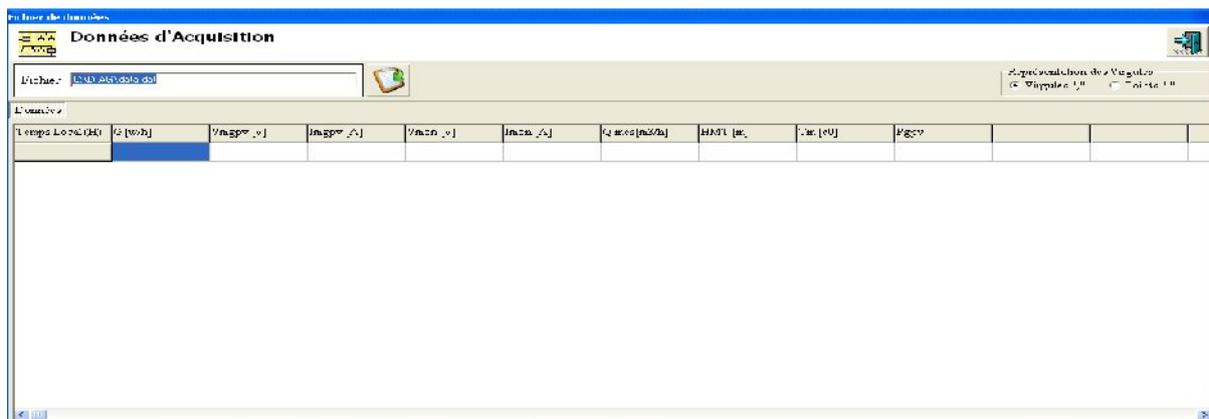


Figure 2 : Fenêtre de données d'acquisition

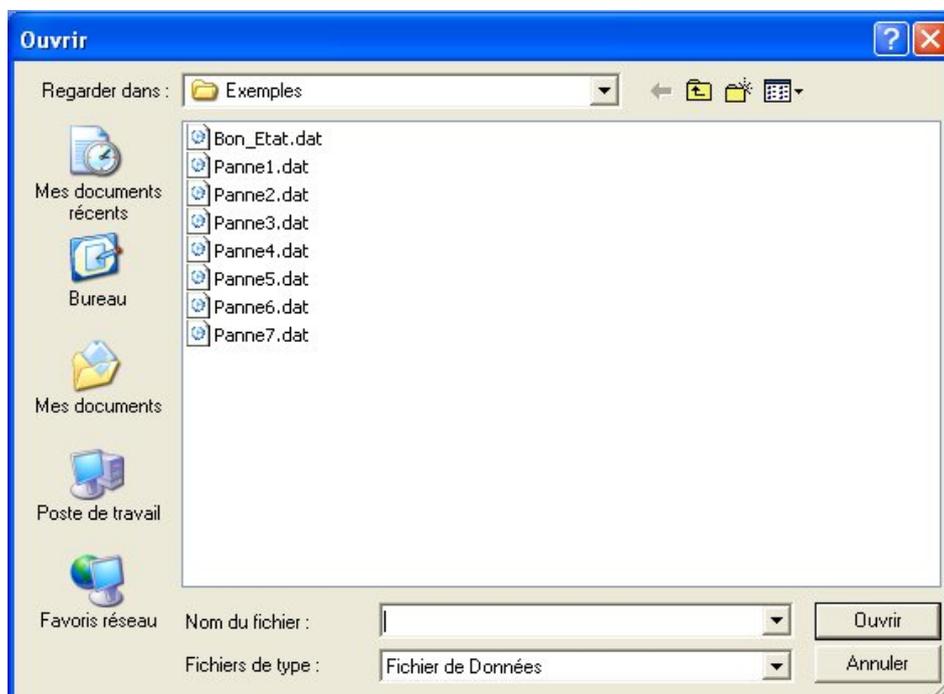


Figure 3 : Menu d'ouvrir la liste des fichiers.

Une fois un des fichiers est ouvert, les données seront affichées sur la grille (Figure 4), suivant par l'apparition de trois boutons (8,9,10) sur la barre. Le bouton (8) nous permet de lancer le premier test de détection de symptômes, dans l'état de bon fonctionnement du système, le résultat de test va être affiché par un message (figure 5) apparaît dans l'écran. Pour visualiser l'évolution des données de débit mesurés et calculés (Figure 6), nous cliquons sur le bouton (9).



Fichier de données

Données d'Acquisition

Fichier: E:\DAG\Exemples\Bm_Etat.dat

Représentation des Valeurs
 Virgule "." Pointe "."

Temps Local (H)	Q [m³/h]	Vitesse [V]	Impp [A]	Vmax [V]	Imax [A]	Caract [m³/d]	HMT [m]	Car [m]	Pgesv	Pmon [m²]	# Chang [A]	#
5	0.000	1.320	0.000	0.090	0.000	0.020	15.241	22.205	0.020	0	0	1
6	7.663	13.820	0.000	21.460	0.000	0.020	14.552	22.231	0.020	0	0.045773	1
7	7.151	13.190	0.002	24.290	0.005	0.024	14.665	22.577	0.024	0.000000	0.044016	1
8	24.180	13.850	1.090	77.130	2.285	1.523	14.575	24.595	195.927	176.2423	1.48328	1
9	480.320	16.360	3.107	82.640	3.953	3.052	14.882	24.811	361.181	324.00312	2.88172	1
10	714.943	16.480	4.450	85.340	5.465	4.080	14.705	24.595	518.247	466.3831	4.229538	1
11	876.384	16.390	5.425	85.740	6.518	4.572	14.695	24.575	631.842	581.5266	5.299914	1
12	956.262	16.700	5.920	87.440	7.265	4.654	14.597	24.535	689.650	620.7211	5.917772	1
13	1117.002	16.490	6.020	87.300	7.389	4.621	14.521	25.504	701.270	631.1547	6.122148	1
14	947.213	16.450	5.300	85.060	7.145	4.574	14.525	24.531	675.254	607.7537	5.823548	1
15	824.972	16.230	5.010	82.710	6.336	4.321	14.542	24.595	582.312	534.05056	5.029568	1
16	614.710	16.030	4.030	76.590	5.149	3.648	14.577	24.410	467.064	431.3775	3.813385	1
17	327.190	15.270	2.450	62.230	3.838	2.629	14.505	24.715	282.412	254.5074	2.37314	1
18	126.309	13.740	0.850	21.230	2.098	0.752	14.705	23.865	96.475	114.4234	0.821394	1
19	6.300	1.500	0.000	0.100	0.000	0.000	15.115	22.500	0.000	0	0.000000	1

Figure 4 : Fenêtre de données d'acquisition.

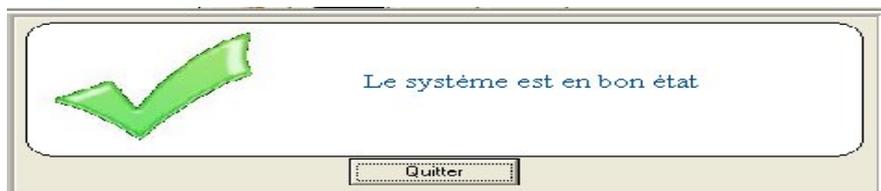


Figure 5 : Fenêtre de bon état de fonctionnement du système

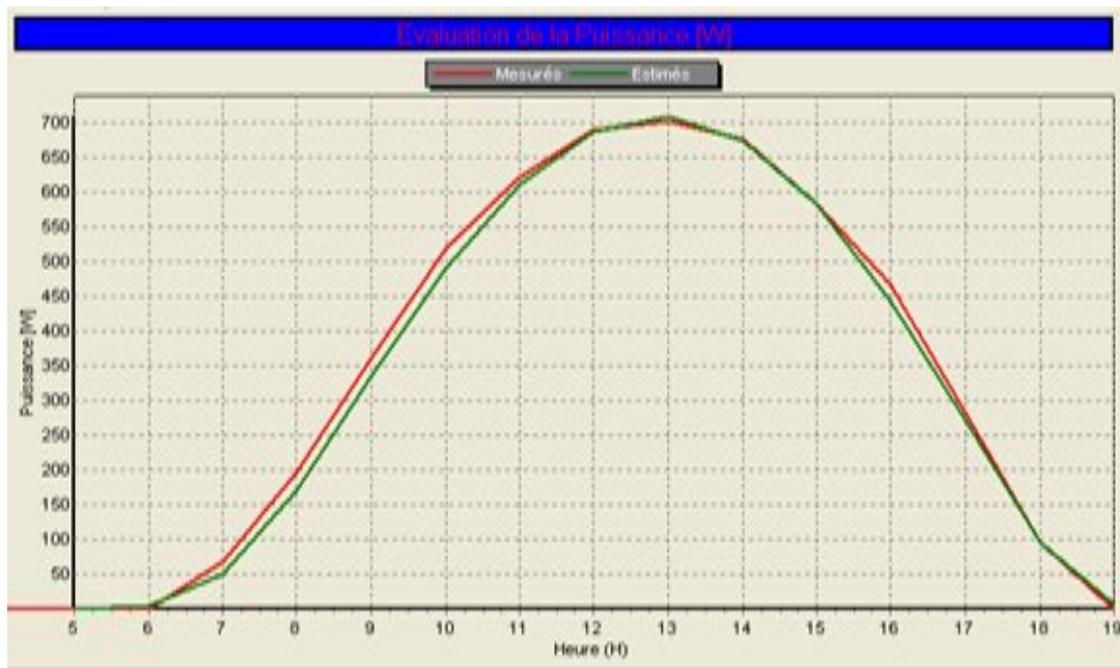


Figure 6 : Fenêtre de visualisation de l'évolution des données de débit mesurés et calculés.

Dans l'état de dysfonctionnement le résultat de test va être affiché par un message (figure 7) apparaît dans l'écran. Pour visualiser l'évolution de données de débit mesurés et calculés (Figure 8), nous cliquons sur le bouton (9).

Le bouton (10) nous permet d'enregistrer le fichier de données avec tous les paramètres théoriques calculés.

Paramètres de contrôle

Pannes Signalés au niveau :
Pompe

Symptômes :
Pas de débit d'eau

Causes possibles :
Crépine bouchée
Roux défectueuses
Baisse de niveau d'eau dans le puits

Paramètres à Vérifiés
Débit

Données

Données Mesurées

H [Heure]	12	G [w/h]	986,262	Tm (°C)	14,897
Vm _g pv [V]	116,5	Q _{ref} [m ³ /h]	0	V _m on [V]	85,44
Im _g pv [A]	5,92			Im _{on} [A]	8,265
Pm _g pv [w]	689,68			P _m on [w]	706,1616

Données Calculées

V _m mp [V]	116,11192	Q _{cal} [m ³ /h]	4,55867443	P _m mp*0,9 [w]	618,390581
Im _m mp [A]	5,917572				
P _m mp [w]	687,100646				
Err_P _m mp [w]	2,57935334	Err_V _m mp [w]	0,38808000	Err P _m on [w]	87,7710180
		Err_Im _m mp [w]	0,00242800	Err Q [m ³ /h]	4,55867443

Figure 7 : Fenêtre des paramètres de contrôle.

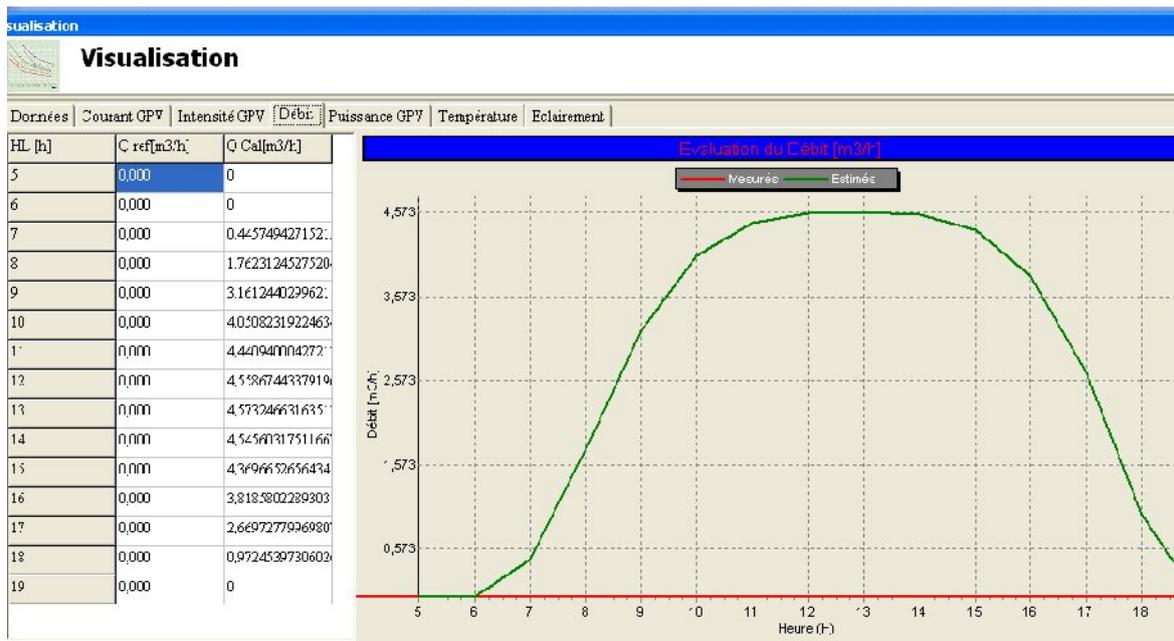


Figure 8 : Fenêtre de visualisation de l'évolution de données de débit mesurés et calculés.



11

Le bouton (11) suivant s'enclenche suite à la détection d'un symptôme, qui va nous permettre de poursuivre le diagnostic par RàPC (Figure 9).

Le bouton (12) nous permet d'élaborer le cas cible (Figure9). Le bouton (13) sert à modifier le cas en cas d'erreur signalé. Les deux boutons (14,15) suivants nous permettent respectivement d'imprimer et d'avoir un aperçu avant l'impression sur le rapport primaire (Figure 10) que le technicien doit utiliser et le rapport final qui donne le résultat final du diagnostic (Figure 11).



ontrol (2/3)

Résultats du premier Diagnostique

Défauts Signalés





Motopompe

Sous-Zone : Pompe

Composants : Crepine

Etat de Fonctionnement : Défectueux

Mode de Fonctionnement : Anormal

Def N°	Zone de Défaillance	Sous-Zone	Composant	Etat de Fonc.	Mode de Fond
1	Motopompe	Pompe	Crepine	Défectueux	Anormal

Figure 9 : Résultat du premier diagnostic et l'initialisation du cycle RàPC.


 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 Centre de Développement des Energies Renouvelables
 

Rapport de contrôle et de suivi de la station de pompage photovoltaïque

Quel est le symptôme constaté ?

.....

.....

Quel est la zone de l'apparition de symptôme ?

.....

.....

Quel est la sous zone de l'apparition de symptôme ?

.....

.....

Quel est la sous zone de l'apparition de symptôme ?

.....

.....

Quelles sont les états des composants concernés dans la sous zone ?

.....

.....

Observations :

.....

Figure 10 : Rapport primaire du programme de diagnostic.

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Centre de Développement des Energies Renouvelables			
			
Rapport de Diagnostic du système de pompage photovoltaïque			
Classe de défaillance	Composant défaillant	Zone	Action de réparation
Motopompe	Crepine	Pompe	Nettoyer la crepine

Figure 10 : Rapport final du programme de diagnostic.

Les boutons suivants nous permettent de sauvegarder, d'imprimer notre document et d'avoir un aperçu de ce document avant l'impression.

