

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVESITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

FACULTE D'ELECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE



MEMOIRE

Présentée pour l'obtention du diplôme de :
MAGISTER EN ELECTRONIQUE

Spécialité : Rayonnement atmosphérique

Par

M^{lle} BOUZERGUI Nabila

Thème

***ETUDE ET ANALYSE D'UN SYSTEME DE
CONVERSION EOLIEN EN VUE
D'APPLICATION EN ZONES ENCLAVEES***

Soutenue publiquement le : 25/ 01 / 2006

devant la commission d'examen :

M^r ADANE Abd-El-Hamid

M^{me} YUCEF ETTOUMI Fatiha

M^r OUSSAID Rachid

M^r TALHA Abdel Azziz

Professeur à l'U.S.T.H.B.

Maître de conférence à l'U.S.T.H.B.

Maître de conférence à l'U.S.T.H.B.

Maître de conférence à l'U.S.T.H.B.

Président

Directrice de mémoire

Examineur

Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement Mm F.YOUCCEF ETTOUMI, Maître de Conférences à l'USTHB, pour avoir accepté de proposer et de diriger ce travail. Je tiens à lui témoigner mes reconnaissances pour son aide et ses conseils judicieux.

Je tiens à témoigner ma profonde gratitude à Mr ADANE Abd-El-Hamid, Professeur à l'USTHB, pour m'avoir accueilli dans son équipe et a bien voulu présider le jury.

Je tiens également à remercier Mr R.OUSSAID, Maître de Conférences à l'USTHB pour avoir accepté de faire partie de ce jury. Je remercie Mr A.TALHA, Docteur d'état à l'USTHB, qui a bien voulu examiner ce travail. Qui il trouve ici l'expression de ma très sincère reconnaissance.

J'exprime aussi ma gratitude à Melle Raaf Ouarda, enseignante à l'USTHB, qui n'a pas hésité à m'offrir ses précieuses aides techniques ou informatiques. Je remercie aussi Melle LILA pour leur aide précieuse. Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Brazane Linda maître de conférences, Benzaoui M^{ed} lassâd maître assistant et Ikhlef rabah attaché de recherche pour ses conseils et leur soutien techniques.

Je tiens à remercier très vivement Mr K.Ameur, charge de recherche au CDER d'ALGER.

Enfin, je remercie toutes les personnes du laboratoire traitement d'image et rayonnement ainsi que mes amis (es) et toute ma famille, pour leurs encouragements et soutien moral sans oublier l'équipe l'unité d'étude et de la recherche de SNVI et plus précisément Mr K. MANEL et Mm F.Charfaoui des cadres à SNVI.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : LES ENERGIES RENOUVELABLES

I.1. Introduction	4
I.2. Définition des Energies renouvelables.....	4
I.3. Principales énergies renouvelables.....	5
I.3.1. Energie éolienne	5
I.3.1.1. Différentes applications de l'énergie éolienne.....	6
I.3.1.2. Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	7
I.3.2. Energie solaire.....	9
I.3.3. Energie hydraulique.....	10
I.3.4. L'énergie des vagues et marémotrice.....	10
I.3.5. Energie géothermique.....	11
I.3.6. La biomasse.....	11
I.4. Etude comparative des énergies renouvelables.....	12

CHAPITRE II : LA CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE

II.1. Préambule	17
II.2. Aérogénérateurs	17
II.2.1 Les différents organes d'un aérogénérateur.....	18
II.2.2 Fonctionnement d'un aérogénérateur	20
II.2.3 Différents types de systèmes éoliens.....	20
II.2.3.1 Le système autonome.....	20

II.2.3.2 Le système raccordé au réseau	21
II.2.4 Spécificités liées à la technologie des aérogénérateurs.....	22
II.2.4.1 Types des machines électriques.....	22
II.2.4.2 Nombre de pâles.....	24
II.2.4.3 Longueur et largeur des pâles.....	24
II.2.4.4 La hauteur du pylône.....	25
II.2.4.5 Transmission mécanique et multiplicateur de vitesse.....	26
II.2.4.6 Types de régulation de puissance de l'aérogénérateur.....	27
II.2.4.7 La courbe de puissance d'une éolienne.....	28
II.2.4.8 Le coefficient de puissance.....	29
II.3. Le système de stockage d'énergie électrique.....	30
II.4. Potentiel éolien.....	31
II.4.1 La quantification de l'énergie éolienne.....	31
II.4.2 Courbe de Rayleigh.....	31
II.4.3 La limite de Betz.....	32

CHAPITRE III : MESURE DU VENT

III.1. Introduction.....	37
III.2. Sites d'implantation d'aérogénérateurs.....	37
III.2.1 Les appareils de mesure	38
III.2.2 La rose du vent.....	39
III.3. Distribution de Weibull.....	40
III.4. Les différentes méthodes pour déterminer les paramètres de Weibull.....	41
III.4.1 La première méthode.....	41
III.4.2 La deuxième méthode.....	43

CHAPITRE IV : LA BASE DE DONNEE

IV.1. Préambule.....	46
IV.2. La base de données.....	46

IV.2.1. Système de gestion de base de données.....	47
IV.2.2. Access et les bases de données.....	47
IV.2.3. Objectif d'une base de données Access.....	47
IV.3. L'Application (La base de donnée construite).....	49
IV.3.1. Schématisation de la base de donnée.....	49
IV.3.2. Les différents aérogénérateurs utilisés.....	50
IV.3.2.1. Les aérogénérateurs de marque INCLIN.....	50
IV.3.2.2. Aérogénérateur de marque FORTIS.....	54
IV.3.2.3. Aérogénérateur de marque VERGNET.....	56
IV.3.2.4. Aérogénérateur de marque Bergey.....	57
IV.3.2.5. Aérogénérateur Southwest Windpower Whisper 175.....	60
IV.4. Le Visual Basic et l'interface graphique.....	60

CHAPITRE V : OPTIMISATION D'UN SYSTEME DE POMPAGE PAR UN AEROGENERATEUR

V.1. Introduction.....	63
V.2. Les organes de transformation de l'énergie électrique en énergie hydraulique.....	64
V.2.1 La pompe.....	64
V.2.1.1. Les pompes centrifuges.....	64
V.2.1.2. Les pompes volumétriques.....	64
V.2.1.3. Les pompes de surface ou immergées.....	65
V.2.2. Les moteurs.....	65
V.3. Eoliennes de pompage et aérogénérateur.....	66
V.3.1. Éoliennes de pompages mécaniques.....	66
V.3.2. Système éolien électrique.....	66
V.4. Calcul de la hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe.....	69
V.5. Application.....	70
V.6. Estimation du débit pour différentes régions.....	73
V.7. Conclusion.....	88

CHAPITRE VI : ESTIMATION DE LA PUISSANCE FOURNIE PAR LES DIFFERENTS AEROGENERATEURS

VI.1. Introduction.....	90
VI.2. Dimensionnement de l'aérogénérateur.....	90
VI.3. Application.....	92
VI.3.1. L'interface graphique.....	92
VI.3.2. L'organigramme.....	96
VI.3.3. L'évaluation du besoin énergétique.....	98
VI.3.4. Estimation de la puissance fournie par les différents aérogénérateurs.....	99
VI.4. Stockage de l'énergie produit.....	102
VI.5. Conclusion.....	103

CONCLUSION.....	105
------------------------	------------

ANNEXE A

A.1.....	A1
----------	----

ANNEXE B :

B.1. Algorithme de segmentation.....	B1
B.1.1. Algorithme Quad-Tree.....	B2
B.1.2. Algorithme pyramidal stochastique.....	B6
B.2. Estimation des paramètres.....	B8
B.3. Conclusion.....	B9

ANNEXE C : METHODE DE MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE

C.1. Principe de décision Bayesienne.....	C1
C.2. Estimation des paramètres K et $\square$	$\tilde{C}5$
C.2.1. Estimation par maximum de vraisemblance.....	C5
C.2.2. Choix de la fonction de similarité Je	C9
C.2.2.1. Fonction minimisant l'erreur quadratique moyenne.....	C9
C.2.3. Détermination du nombre de classes K.....	C11

ANNEXE D :

D.1. Paramètres calculés à partir des matrices de cooccurrences.....	D1
D.1.1. Notations.....	D1
D.1.2. Paramètres texturaux.....	D2
D.2. Paramètres calculés à partir des différences statistiques.....	D5
D.2.1. Paramètres texturaux.....	D5

ANNEXE E

E.1. Définitions.....	E1
E.2. Diagonalisation de la matrice variance covariance.....	E2
E.3. Application de la T. K. L à l'image Landsat TM.....	E4

1- INTRODUCTION GENERALE

Des contraintes environnementales récentes, notamment, la limitation de l'émission des gaz à effet de serre, et, des nouvelles technologies sûres, ont entraîné l'élaboration d'importants programmes de développement des énergies renouvelables. L'énergie éolienne est l'une des solutions les plus prometteuses, spécialement, en considération des avancées technologiques dans la dite énergie.

Force est de constater, que l'utilisation de l'énergie éolienne a connu un accroissement rapide, à travers le monde, au cours de ces dernières années.

Toutefois, nous devons rappeler, que depuis des siècles, l'homme capte l'énergie contenue dans le vent. Les moulins à vent hollandais, qui datent du 12^{ème} siècle, constituaient en 1700, une importante source d'énergie en Europe. Cependant, en Amérique du Nord, il y a, seulement, un siècle que les agriculteurs ont adopté la technologie du moulin à vent pour pomper l'eau. De nos jours, on peut encore utiliser le rotor d'une éolienne pour faire fonctionner des pompes, ou, faire tourner une génératrice produisant de l'électricité.

Aussi, le vent constitue une source d'énergie qui est continuellement renouvelée par les phénomènes naturels. Les technologies appliquées aux énergies renouvelables, telles que les systèmes éoliens et les systèmes solaires photovoltaïques qui utilisent la lumière solaire, convertissent les sources naturelles d'énergie renouvelable en énergie utilisable, qui peut, soit remplacer les sources d'énergie conventionnelle, soit servir de ressource d'appoint.

L'intérêt pour l'utilisation des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux [2].

Il est connu que les mesures de la vitesse du vent sont essentielles pour plusieurs domaines comme l'aéronautique, la météorologie, la conversion d'énergie et l'architecture [1].

L'étude de faisabilité de l'exploitation de l'énergie éolienne nécessite une investigation préalable des caractéristiques des sites. En effet, l'un des premiers éléments à déterminer, dans l'étude de faisabilité d'un système éolien, c'est la quantité d'énergie éolienne dont on dispose. Il faut, pour ce faire, mesurer la vitesse du vent pendant une période déterminée, en notant les laps de temps pendant lesquels le vent souffle aux différentes vitesses [4].

Notre travail de recherche est destiné à l'étude et le dimensionnement de la chaîne de conversion d'énergie éolienne en vue de l'élaboration d'un logiciel de calcul susceptible de choisir automatiquement et de manière numérique l'aérogénérateur le plus adéquat pour couvrir le besoin en énergie électrique dans des sites enclavés. Il s'agit donc d'une étude portant sur les

Introduction

énergies renouvelables et dans le contexte de la préservation de l'environnement et d'un développement durable, notamment de l'intérêt de l'apport de l'énergie éolienne et de sa conversion en vue de son utilisation pour les communautés isolées. Dans ce sens et sur la base des travaux de météorologie déjà mené dans le laboratoire de traitement d'images et rayonnement, on cherche à acquérir simultanément les composantes météorologiques nécessaires à la connaissance de l'énergie éolienne qui prévaut dans des régions régulièrement ventées, mais situées dans des zones enclavées. L'étude et l'analyse des données ainsi collectée sont par la suite utilisées pour le dimensionnement de système de conversion éolien.

On dénombre essentiellement deux méthodes de pompage éolien : le pompage éolien mécanique et le pompage éolien électrique à partir d'un aérogénérateur. La première méthode convient bien pour les puits peu profonds (50m) et les petits débits ($20 \text{ m}^3/\text{j}$) [5]. Le pompage à partir d'aérogénérateur présente plus d'avantages que le pompage éolien mécanique [6] surtout en ce qui concerne les quantités d'eau pompées.

Le choix optimal d'un système éolien destiné à couvrir en totalité ou partiellement les besoins énergétiques d'un site, doit s'appuyer sur la connaissance des caractéristiques du vent de la région où ce système va être implanté. Ces caractéristiques interviennent, en effet, sur le type d'utilisation (électricité, pompage, etc...) et sur le choix des machines (puissance nominale, vitesses caractéristiques) [7]. L'étude des distributions de vent peut être effectuée soit à partir de mesures de vitesses du vent effectuées sur le site, soit à partir d'un modèle de variation de la vitesse du vent obtenu par des méthodes statistiques appropriées. La distribution de Weibull est un modèle couramment utilisé [8].

La méthode proposée pour le choix d'un système de conversion de l'énergie éolienne va permettre à l'utilisateur de choisir le système le plus adapté à ses besoins énergétiques. Un programme de calcul a été développé pour l'estimation de la puissance produite par un aérogénérateur à partir de sa courbe de puissance (fournie par le concepteur), et, du régime de vent (distribution de Weibull de la vitesse du vent) à différentes hauteurs d'emplacement des pâles.

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre porte sur la présentation des différentes énergies renouvelables, et plus particulièrement, l'énergie éolienne, objet de notre travail.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de la machine qui assure la conversion de l'énergie éolienne ainsi que sa constitution mécanique et ses caractéristiques techniques.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes méthodes destinées au traitement des données du vent.

Dans le quatrième chapitre est présentée la base de données construite, et aussi, à leur gestion, leur exploitation, et, leur actualisation, si nécessaire.

Dans le cinquième chapitre, nous montrons les différents systèmes de pompage existants et en indiquant le choix d'une pompe parmi celles qui existent.

Dans le sixième chapitre, Nous présentons, dans ce chapitre une évaluation des besoins énergétiques d'une maison. Ensuite, nous analysons la couverture de ces besoins par l'utilisation d'aérogénérateurs de moyenne puissance.

CHAPITRE I

Les Energies Renouvelables

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différentes énergies renouvelables, et plus particulièrement, l'énergie éolienne, objet de notre travail.

I.1. Introduction

L'énergie est présente dans toutes nos activités quotidiennes pour la production du chauffage, de l'électricité, dans l'industrie, pour la construction et dans les transports.

Depuis que l'industrie a commencé, il y a plus de 200 ans, la richesse économique a été immédiatement liée à l'accès aux combustibles fossiles pour la production énergétique, en premier lieu le charbon, mais plus récemment le pétrole et le gaz. Ce troisième millénaire est particulièrement marqué par la problématique de la consommation d'énergie, eu égard au développement économique et au progrès social. Les inquiétudes dominantes concernent les effets de la croissance économique sur la consommation excessive des ressources naturelles et de l'impact sur l'environnement, en particulier l'atmosphère, par l'augmentation de l'effet de serre, la pollution atmosphérique, la pollution des sols et celle des eaux et des pluies acides.

Pour parer quelque peu à ces difficultés, des politiques énergétiques, ayant pour vision un développement durable, sont conduites pour exploiter au mieux les énergies renouvelables existantes. Les technologies mises en œuvre sont très importantes et font appel au génie électrique et aux matériaux de pointe [1]. Les énergies renouvelables telles que : solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marémotrice et de la biomasse sont des énergies de flux, on les oppose aux énergies fossiles qui sont disponibles sous forme de réserve épuisable.

Dans ce chapitre, on commencera par la présentation du concept ainsi que la description des énergies renouvelables. Puis, nous parlerons de l'énergie éolienne, à laquelle une attention particulière sera accordée, car elle constitue le thème de notre projet. Finalement, un tableau comparatif de ces énergies sera présenté, résumant leurs avantages et leurs inconvénients.

I.2. Définition des Energies renouvelables

L'énergie renouvelable se rapporte à la puissance développée par une source renouvelable, c'est à dire, quand l'énergie est produite, la ressource n'est pas épuisée. Elle est naturellement reconstituée, donc inépuisable [2].

On dira alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. L'expression « énergie renouvelable » s'applique à plusieurs sources d'énergies qui ont un point en commun ; elles produisent toutes de l'énergie électrique, thermique ou mécanique sans épuiser les ressources naturelles [2], exemple : le vent, le soleil, l'eau, la biomasse. Tant que cet équilibre entre la consommation actuelle et la disponibilité future de la ressource est respecté, on parlera d'énergie renouvelable. Le mot renouvelable veut

dire substituer. Renouveler l'énergie, c'est aussi remplacer l'énergie fossile qui exploite le charbon, le pétrole et le gaz qui sont des réserves limitées et qui polluent l'environnement, par des énergies dont les ressources inépuisables et non polluantes, que l'on appelle aussi les énergies de substitution.

L'utilisation des énergies renouvelables a prédominé jusqu'à la révolution industrielle au 18^{ème} siècle. Elles ont commencé à être substituées par le charbon, puis par l'exploitation intensive du pétrole et du gaz à partir du début du 19^{ème} siècle. Cette tendance s'est poursuivie au 20^{ème} siècle avec l'utilisation accrue des énergies fossiles et l'avènement du nucléaire [1].

Après le premier choc pétrolier en 1973, certains pays industrialisés ont commencé à s'intéresser de nouveau aux énergies renouvelables, mais elles étaient très vite oubliées à cause de l'effondrement des prix des cours des énergies fossiles dans les années 80. Cependant, le malheureux accident de Tchernobyl, à la fin des années 80, a été la cause de la re-exploitation à nouveau des sources renouvelables.

I.3. Principales énergies renouvelables

I.3.1 Energie éolienne

Les rayons du soleil sont la source de toute vie sur Terre. Ils fournissent de l'énergie aux plantes vertes qui sont à la base des chaînes alimentaires sur terre comme en mer. Un principe fondamental, dans ce contexte, est que l'énergie ne peut être ni créée, ni détruite. On parle du principe de conservation de l'énergie. Par contre, l'énergie peut être convertie d'une forme en une autre. La plupart de l'énergie contenue dans les rayons solaires pénétrant l'atmosphère de la terre est convertie en chaleur tandis qu'une partie de l'énergie des rayons solaires est convertie en énergie éolienne. Les rayons solaires engendrent des températures différentes dans les différentes régions du monde : ce qui produit des expansions ou des contractions de l'air. Là où il fait chaud, l'air se détend et là où il fait froid, il se contracte. Les expansions de l'air créent des dépressions barométriques, alors que les contractions créent des anticyclones. Les différences de pression sont nivelées par les mouvements des molécules de l'air : le vent. Cette énergie en mouvement est également appelée énergie cinétique. L'énergie éolienne est donc l'énergie cinétique des molécules de l'air qui est une énergie diluée, non régulière et incontrôlable, gratuite, propre et inépuisable.

Le vent constitue une source d'énergie qui est continuellement renouvelée par les phénomènes naturels. Les technologies appliquées aux énergies renouvelables, telles que les systèmes éoliens et les systèmes solaires photovoltaïques qui utilisent la lumière solaire,

convertissent les sources naturelles d'énergie renouvelable en énergie utilisable qui peut soit remplacer les sources d'énergie conventionnelles, soit servir de ressource d'appoint.

I.3.1.1 Différentes applications de l'énergie éolienne

Le plus souvent, du fait, de l'irrégularité de l'énergie éolienne, celle-ci n'est pas utilisée sous sa forme initiale, mais seulement, une fois convertie, soit en énergie mécanique potentielle (pompage d'eau), soit en énergie thermique, ou encore souvent en énergie électrique [1,3]. De ce fait, elle est largement exploitée dans diverses applications.

§ Pompage de l'eau

L'utilisation des éoliennes pour le pompage de l'eau est une méthode traditionnelle. Les anciennes éoliennes, appelées communément éoliennes multipâles, sont les plus courantes pour ce type d'utilisation depuis très longtemps. Néanmoins, le pompage à l'aide des nouvelles éoliennes présente certains avantages, et, tend à se développer dans les régions où les vents moyens et forts ont une fréquence suffisante [4]. L'éolienne multipâles est présentée comme l'illustre à la figure (I.1).

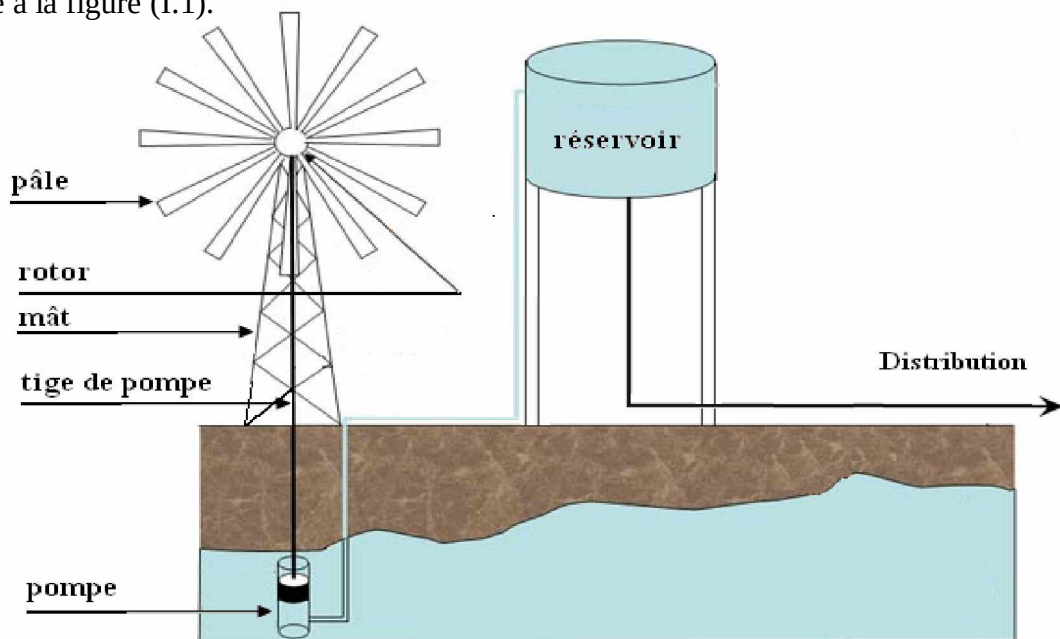


Fig. I.1 : le système mécanique de pompage d'eau.

§ Production d'électricité

Les éoliennes qui produisent de l'électricité sont appelées aérogénérateurs. Elles sont principalement utilisées pour la production de l'électricité. Les rotations des pâles exposées au vent fait tourner une génératrice qui produit de l'électricité.

Actuellement, l'énergie éolienne est la source d'énergie qui connaît l'expansion la plus rapide au monde.

L'énergie éolienne implique de nombreuses applications, allant du chargeur de batterie ou l'alimentation électrique d'une habitation isolée, à des éoliennes de taille industrielle, capables d'alimenter en électricité des milliers de foyers domestiques.

§ Chauffage éolien

Parmi les besoins énergétiques susceptibles d'être satisfaits par l'emploi des aérogénérateurs, on peut citer le chauffage des locaux, indispensable pendant l'hiver où, justement, le vent souffle fréquemment.

Le chauffage éolien peut être réalisé de diverses manières :

- Soit directement à l'aide de résistances électriques, celles-ci peuvent être alors incorporées à la structure même du bâtiment. Dans ce cas, l'énergie électrique produite par l'éolienne n'est pas stockée, et, est utilisée au fur et à mesure de sa production [2].
- Soit en chauffant un fluide caloporteur, qui sera généralement de l'eau, ce chauffage se fera, selon les dispositions décrites, ci après :
 - Par résistance électrique utilisant ou non un circuit de distribution existant.
 - Ou à l'aide d'un système mécano-thermique, l'énergie éolienne est transformée directement en chaleur par frottement mécanique d'un fluide caloporteur. L'énergie calorifique est ensuite transportée par des tuyauteries calorifiques vers le bâtiment à chauffer.
 - Ou encore par l'utilisation d'une pompe à chaleur couplée directement ou non à l'éolienne.

I.3.1.2 Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont dû encore améliorer cette technologie durant la 1^{ère} et 2^{ème} guerre mondiale, et cela pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle a décliné à la fin de la 2^{ème} guerre mondiale.

C'est avec la crise pétrolière des années 1970 que cet intérêt a ressurgi. Durant cette période, plusieurs pays ont consenti des investissements importants afin, notamment, d'améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui a donné naissance aux aérogénérateurs modernes [5] [6]. Le premier marché véritablement significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de l'énergie éolienne a pu se développer. Ensuite les aides financières accordées à ce type de développement ont diminué aux Etats-Unis. En revanche, celles-ci ont connu des augmentations notables en Europe, ce qui a permis un développement important de cette industrie dans des pays tels que l'Allemagne et le Danemark. Le marché mondial est d'ailleurs passé de 200 MW/an en 1990 à 5500 MW/an en 2001. L'éolien a eu une croissance moyenne annuelle de 40% lors de 5 dernières années [7]. Ce développement s'est surtout exprimé en Europe, comme on peut le constater sur la Figure I.1 [5].

L'énergie éolienne est la source d'énergie, dont l'accroissement, dans le monde, a été le plus rapide [6].

Il y a des milliers d'éoliennes dans le monde, sans compter les petites éoliennes en fonctionnement, qui pour la plupart sont artisanales. Plus de 35000 grandes éoliennes sont réparties, à travers le monde [8]. Voici un aperçu général :

- En Afrique : des éoliennes ont été installées au Sénégal, pour assurer l'alimentation des villages en eau. La Mauritanie possède un grand potentiel du vent. L'Egypte et le Maroc ont des besoins importants en énergie, et, de très bonnes ressources éoliennes, on observe que des parcs éoliens commencent à s'implanter.
- En Algérie : les recherches sont encore en cours.
- En France : elles se multiplient surtout dans les régions les plus exposées au vent.
- Au Canada : un projet très important s'est implanté au Québec.
- En Europe : forte croissance dans les pays tels que : l'Allemagne, le Danemark, l'Angleterre, l'Espagne.
- Au Etats-Unis : la plus grande population d'éoliennes s'y trouvait jusqu'ici (17000), avec une forte concentration en Californie.
- En Inde : deux usines de fabrication sous licence sont en production.
- Au Japon : peu développé jusqu'ici.

- En Chine et reste de l'Asie : c'est le marché le plus gigantesque, mais le décollage est lent, les risques de tremblement de terre limitent le potentiel d'installation.
- En Amérique du Sud : plusieurs éoliennes ont été installées, il y a des vingtaines d'années, surtout en Argentine.

Le coût de l'énergie éolienne est en baisse constante depuis plusieurs années. Ce prix dépend de nombreux facteurs, et, est par conséquent différent d'un pays à l'autre, et même d'un site à l'autre puisque la vitesse du vent est un des facteurs de plus grande importance. En effet, la puissance produite par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Malgré tout, on peut dire que le coût de cette énergie a été divisé par deux ces 10 dernières années [6]. Parmi les facteurs ayant provoqué cette baisse, on peut citer la baisse des prix des aérogénérateurs, l'augmentation de la rentabilité et de la disponibilité et la baisse des coûts de maintenance. Avec la tendance vers des turbines toujours plus grandes, la baisse des coûts d'infrastructure que cela entraîne et les réductions du coût des matériaux, le prix de l'énergie éolienne continue à diminuer régulièrement. Il faut de plus noter qu'en prenant en compte le coût correspondant à la pollution produite par les différentes sources d'énergie, le coût de l'énergie éolienne est encore plus compétitif.

I.3.2 Energie solaire

Le rayonnement énergétique qui nous provient du soleil résulte des réactions de fusions nucléaires qui ont lieu à sa surface (transformation d'hydrogène en hélium). La puissance ainsi dégagée à sa surface est d'environ 66 millions de watts par m².

La puissance solaire est le terme employé pour décrire l'énergie dérivée directement du soleil. En effet, sa lumière a été utilisée par les êtres humains pour sécher les récoltes, réchauffer l'eau et les bâtiments, c'est une énergie qui ne s'épuise pas. L'énergie émise par le soleil jusqu'à la terre se fait sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est semblable aux ondes radioélectriques [1].

L'énergie du soleil est utilisée sous différentes formes :

- Le chauffage solaire passif : des maisons et des bâtiments sont conçus avec de grandes fenêtres pour les murs qui font face au sud et de petites fenêtres pour les murs qui font face au nord dans le but de réduire le besoin en électricité et permettre à la lumière et à la chaleur du soleil d'être utilisées à leur pleine capacité.

- Le chauffage solaire actif : celui-ci utilise des panneaux solaires pour chauffer l'eau des piscines, des maisons et des usines, ainsi que les locaux et en plus produire de l'électricité.
- Les systèmes photovoltaïques permettent la conversion directe du rayonnement solaire en électricité, par l'interaction de la lumière avec les électrons dans une cellule semi-conductrice. Cette énergie est ensuite, soit injectée dans le réseau, soit stockée dans des batteries.

I.3.3 Energie hydraulique

Depuis des millénaires, l'homme utilise la force de l'eau, domestiquée dans un premier temps pour moudre le grain, puis utilisée pour actionner des forges, des métiers à tisser, des scies et toutes sortes de machines [1]. L'énergie hydraulique est l'une des plus vieilles sources d'énergie, fournie par les barrages hydroélectriques, et qui utilise la force de l'eau en mouvement pour créer de l'électricité. Cette électricité est produite par un générateur après que l'eau en mouvement soit passée à travers une turbine. Les stations hydroélectriques exigent souvent de grands barrages, afin de contrôler l'alimentation en eau en fonction de la demande en énergie. La production globale d'énergie hydroélectrique peut être importante car les réserves, disponibles en eau et utilisables, sont largement répandues.

I.3.4 L'énergie des vagues et marémotrice

L'énergie marémotrice produit de l'électricité d'une manière similaire à l'énergie hydraulique. Une structure comme un barrage est construite à travers un estuaire pour emprisonner une marée haute et pour ensuite la laisser passer à travers des turbines pour produire de l'électricité. L'écoulement de l'eau peut seulement produire de l'électricité sur la marée descendante ou sur la marée descendante et montante [1]. Cette énergie dépend des variations journalières de la marée.

Les centrales énergétiques marémotrices ont besoin pour produire de l'électricité, de turbines spéciales tournant dans les deux sens, utilisant les marées montantes et descendantes [1].

L'énergie des vagues est créée par le vent et l'eau, par conséquent comme ces deux énergies sont renouvelables, leur association permet de disposer d'une nouvelle forme d'énergie propre. Cette énergie est très peu développée. Un frottement se développe entre l'air et l'eau pendant que le vent souffle à travers l'eau.

I.3.5 Energie géothermique

L'énergie géothermique est une puissance développée par l'exploitation de la chaleur sous la surface de la terre. Des puits sont utilisés pour transporter la vapeur et l'eau chaude dans les profondeurs de la terre, jusqu'à la surface. L'eau chaude est alors utilisée pour faire tourner des turbines et pour produire de l'électricité [1]. Les zones du sous-sol imprégnées d'eau sont appelées des aquifères. Leur température varie d'une dizaine de degrés, selon la profondeur et la région [1]. Les utilisations de la géothermie sont fonction du niveau de la température de l'eau géothermale :

- Une ressource de 20 ou 30°C suffit au chauffage des serres ou des bassins de pisciculture.
- Une ressource entre 45 et 75°C est nécessaire pour le chauffage des bâtiments.
- La production d'électricité est envisageable à partir de 100 à 150°C.
- L'exploitation de l'énergie géothermique exige l'existence simultanée d'une ressource en sous sol et d'un besoin en surface car la chaleur n'est pas économiquement transportable à longue distance.

I.3.5 La biomasse

La biomasse est le terme utilisé pour décrire l'ensemble des particules vivantes d'un écosystème [1]. Il désigne l'ensemble de la matière vivante, et, il s'applique aux produits organiques végétaux, et, animaux, utilisés à des fins énergétiques [9]. La biomasse contient du carbone, lequel après combustion fournit de l'énergie sous forme de chaleur ou d'électricité. C'est la source la plus ancienne d'énergie renouvelable connue des hommes.

Il y a trois principales catégories d'énergie relatives à la biomasse :

- Bio fuel : la combustion naturelle du bois, de la paille ou des récoltes avec un fort pouvoir calorifique [10].
- Incinération des déchets : c'est à dire des déchets domestiques, ou des déchets commerciaux. C'est une méthode qui permet d'éliminer les déchets, utilisée pour le chauffage ou pour la production d'énergie électrique. Deux tonnes de déchets ménagers peuvent contenir autant d'énergie qu'une tonne de charbon.

- Biogaz : la dégradation des déchets émet de grandes quantités de méthane qui est un gaz combustible additionnée à une faible quantité d'oxygène et qui peut être considéré comme source d'énergie.

I.4. Etude comparative des énergies renouvelables

On peut résumer les avantages des énergies renouvelables comme suit :

- Elles utilisent des flux d'énergie d'origine naturelle (soleil, vent, eau, déchets, chaleur, eau des océans).
- Elles constituent une alternative aux énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon).
- Elles sont inépuisables et gratuites.
- Elles réduisent les problèmes écologiques tel que :
 - Pollution de l'air.
 - Déchets solides et dangereux.
 - Pollution de l'eau.
- Elles peuvent atténuer :
 - Les effets des pluies acides.
 - L'ozone au niveau du sol.
 - La brume sèche régionale.
 - Les particules.
 - La menace d'un changement climatique.
- Elles n'entraînent ni risques majeurs ni nuisances locales.
- Elles constituent la seule possibilité d'électrification des sites isolés.

Une comparaison entre les différents types d'énergies renouvelables est donnée par les tableaux (I.1 - I.6) :

Type d'énergie et source	Energie éolienne (vent)
Avantages	- Pas de production d'émission atmosphérique. - Pas de consommation d'eau. - Ne génère pas de déchets. - Procuration des avantages économiques. - Réduction de la dépendance à l'égard des combustibles fossiles. - Simple technologie.
Inconvénients	- Le problème lié aux petits réseaux, c'est l'inconstance de la puissance fournie qui nécessite l'intervention d'un système de régulation. - Impact sur l'environnement. - Perturbation de l'écologie locale des sites. - Les interférences électromagnétiques.
Classement dans le monde Importance en Algérie	- Monde : Plus de 35 000 grandes éoliennes. Elles produisent plus de 8 000 MW - Algérie : Non encore exploitée.

Tableau I.1 : Energie éolienne.

Type d'énergie et source	Energie solaire (soleil)
Avantages	- Pas de production d'émission atmosphérique. - Pas de consommation d'eau. - Ne génère pas de déchets. - Procuration des avantages économiques. - Réduction de la dépendance à l'égard des combustibles fossiles. - Simple technologie.
Inconvénients	- Matériaux utilisés est des semi conducteurs polluants.
Classement dans le monde Importance en Algérie	- Monde : présente 0,04 % de l'énergie renouvelable mondiale, [11]. - Algérie : l'Algérie dispose d'un gisement solaire le plus élevé au monde > 5 milliards de GWh. - L'énergie reçue quotidiennement : 1700KW/m²/an au nord et de 2263 KWh/m²/an au sud. Alimentation solaire de vingt villages et vingt autres en perspective.

Tableau I.2 : Energie solaire

Type d'énergie et source	Energie géothermique (chaleur de terre)
Avantages	- Moins chère. - Exploitation ne génère pas de flamme, de fumée, d'odeur, ou de ramonage.
Inconvénients	- Coût de forage élevé. - Epuisement de la ressource est possible sur certains stocks. - Risque de pollution si l'eau extraite rejetée à la surface du sol contient des métaux lourds.
Classement dans le monde Importance en Algérie	Monde : - deuxième niveau mondial. - Représente 1,5 % des énergies renouvelables. Algérie : - plus de 2000 sources chaudes non exploitées.

Tableau I.3 : Energies géothermique.

Type d'énergie et source	Energies : hydraulique, marémotrice, et des vagues (eau, la marée, les vagues)
Avantages	- Maturité. - Haute efficacité de production. - Haut rendement de production par comparaison aux autres sources d'énergies.. - Exploite l'eau mais ne le consomme pas. - Pas d'introduction de polluant ou de chaleur résiduaire dans les ressources d'eau. - Réduction des inondations. - Une alimentation en eau potable.
Inconvénients	- Inondation des terres sous le niveau du réservoir produisant de l'électricité. - Perturbation dans la migration des poissons.
Classement dans le monde Importance en Algérie	Monde : produit 6 % de l'énergie du monde. Algérie : très peu exploitée.

Tableau I.4 : Energies hydraulique, marémotrice, et des vagues.

Type d'énergie et source	Biomasse (matière organique)
Avantages	- Réduire la quantité de déchets envoyés au décharge. - Absorbe du gaz carbonique.
Inconvénients	- Complexité de transformation.
Classement dans le monde	Monde : Représente 12 % des énergies.
Importance en Algérie	Algérie : - Potentiel de la forêt est : 37 millions de tonnes équivalent de pétrole. - 5 millions de tonnes de déchets ne sont pas recyclés. - Non exploitée.

Tableau I.6 : Energies Biomasse.

Dans ce qui suit, nous allons présenter, le système de conversion qui assure la transformation de cette énergie en une énergie électrique directement utilisable ainsi que le potentiel éolien.

CHAPITRE II

La conversion de l'énergie éolienne

Dans ce chapitre, on va présenter, dans une première étape, la machine qui assure la conversion de l'énergie éolienne ainsi que sa constitution mécanique et ses caractéristiques techniques. Dans une deuxième étape on montrera comment évaluer de l'énergie éolienne après sa conversion.

II.1. Préambule

Depuis plusieurs années la protection de l'environnement a suscité beaucoup d'intérêt. Par conséquent plusieurs technologies se sont développées, c'est le cas de l'énergie éolienne [1]. Les moulins à vent étaient utilisés auparavant pour moulinier le grain et leur principe de fonctionnement était la base de la construction des éoliennes modernes utilisées, pour le pompage de l'eau, et, surtout pour la production d'électricité. Les machines actuelles de conversion de l'énergie éolienne sont appelées « aérogénérateurs » et « éolienne de pompage ». Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en des formes d'énergie mécaniques ou électriques. La quantité d'énergie produite dépend principalement de la vitesse du vent, mais est légèrement affectée par la densité de l'air déterminée, à son tour, par la température, la pression barométrique et l'altitude. Par conséquent, les éoliennes sont installées sur des tours hautes, et, dans des régions ventées.

II.2. Aérogénérateurs

Un aérogénérateur, usuellement appelé "éolienne", est une machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique. Il réalise une double conversion énergétique: l'énergie éolienne est transformée en énergie mécanique, et, celle-ci est convertie en énergie électrique. Principalement, deux éléments distincts le composent. Ce sont:

§ **la turbine éolienne ou l'aéromoteur, appelée aussi capteurs éoliens ou rotor**, est la partie d'un système éolien qui réalise la conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique. Il existe deux grandes familles des capteurs éoliens qui peuvent être classées par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière :

- Turbines à axe horizontal :

Ce sont les machines actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines et dont l'axe de transmission est parallèle au sol.

- Turbines à axe vertical :

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savanious, constitué de deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre, et caractérisé par un grand couple de démarrage , et, le rotor de Darrieus, inventé par le français Darrieus, au cours des années 1920-1935 [4]. Les turbines à axe vertical sont encore au stade d'essai des prototypes.

Presque la totalité des réalisations au niveau industriel concerne donc les machines avec rotor à axe horizontal.

§ **le générateur électrique**, entraîné par la turbine qui transforme l'énergie éolienne en énergie électrique alternative ou continue.

La charge qui reçoit cette énergie électrique peut être une résistance (chauffage électrique), un moteur, une pompe, ou un réseau de distribution d'énergie électrique. Selon la nature de cette charge, les exigences sur le conditionnement de l'énergie électrique utilisée sont très différentes. C'est pourquoi, elle est associée à un convertisseur qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge, pour adapter la forme de l'énergie fournie par le générateur à ce qu'exige la charge, et, un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire et éventuellement en régime dynamique.

II.2.1 Les différents organes d'un aérogénérateur

Les principaux organes qui constituent l'aérogénérateur sont illustrés dans la figure II.1, ils se présentent comme suit :

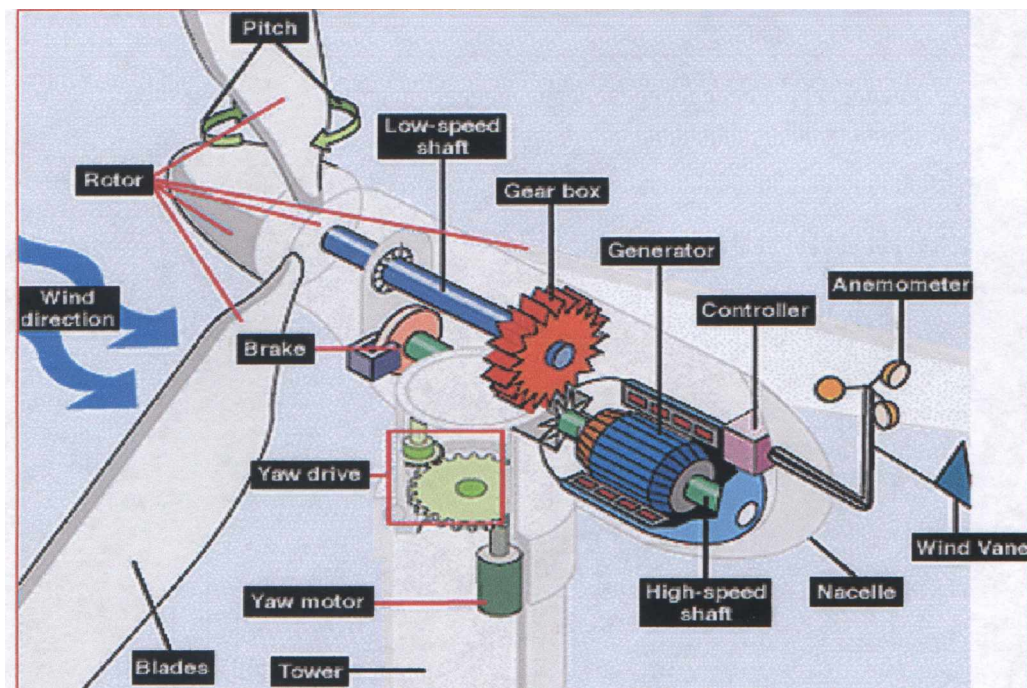


Fig. II.1 Présentation des différents organes d'une éolienne, [1].

§ **La nacelle (nacelle)** : contient les principaux composants d'une éolienne, entre autres le multiplicateur et la génératrice.

§ **Pales (blades)** : captent le vent et transfèrent sa puissance au moyen du rotor. Elles sont fixées ou orientables (habituellement, 3 pâles sont considérées), tournant en général à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/mn, et, leur conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.

§ **Le moyeu** du rotor est fixé à l'arbre lent de l'éolienne.

§ **L'arbre lent (low-speed shaft)** : de l'éolienne lie le moyeu du rotor au multiplicateur. Le rotor d'une éolienne moderne de 1000 kW tourne assez lentement. L'arbre contient des tuyaux pour le système hydraulique permettant l'opération des freins aérodynamiques.

§ **Le multiplicateur (gear box)** : est un convertisseur de puissance, il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique. Le multiplicateur assure donc l'adaptation de la vitesse du rotor de l'éolienne à la vitesse du générateur électrique.

§ **L'arbre rapide (high-speed shaft)** : entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un **frein (break)** mécanique à disque actionné. Il constitue une mesure préventive, relative, par exemple, à une panne éventuelle du frein aérodynamique, ou à l'arrêt momentané de l'éolienne pour des raisons de maintenance.

§ **La génératrice (generator)** : (ou l'alternateur) est généralement asynchrone. La puissance électrique maximale d'une éolienne moderne se situe normalement entre 600 et 2500 kW.

§ **Le système contrôle-commande (controller)** : comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne, tout en contrôlant le dispositif d'orientation en cas de défaillance (par exemple : surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice). En effet dans une telle situation, le système arrête automatiquement l'éolienne.

§ **Anémomètre (anemometer)** : mesure la vitesse du vent.

§ **Girouette (wind van)** : mesure la direction du vent.

§ **Le mat (tower)** : tour ou encore pylône de l'éolienne, supportant la nacelle et le rotor.

II.2.2 Fonctionnement d'un aérogénérateur

Le vent en exerçant une force sur les pâles de l'éolienne les fait tourner. La rotation du rotor entraîne alors, avec l'aide ou non d'un multiplicateur, une génératrice électrique : il y a transfert de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Un anémomètre et une girouette placés sur la nacelle commandent le fonctionnement de l'éolienne. La girouette va permettre d'orienter l'éolienne face au vent. Si le vent tourne, la nacelle et le rotor se positionneront pour être à nouveau face au vent. Dès lors que le vent se lève (environ 5 km/h) les pâles se mettent en mouvement par la seule force du vent. Elles entraînent avec elles le multiplicateur et la génératrice électrique. Le rotor tourne alors à environ un tour en deux secondes. Cette vitesse de rotation va rester constante tout au long de la période de production, afin de produire un courant alternatif de fréquence constante. La génératrice délivre alors un courant électrique, dont l'intensité varie en fonction de la vitesse du vent. Ainsi, lorsque cette dernière croît, la puissance délivrée par la génératrice augmente. Quand le vent atteint environ une vitesse fonction du type d'aérogénérateur utilisé, l'éolienne fournit alors sa puissance maximale. Cette puissance est maintenue constante en jouant sur l'aérodynamisme des pâles.

II.2.3 Différents types de systèmes éoliens

Il est nécessaire de disposer de différents types de systèmes, afin de pouvoir répondre aux diverses besoins en alimentation énergétique. La gamme des systèmes varie des systèmes de très petites tailles aux systèmes connectés au réseau de distribution électrique. Principalement, on trouve :

II.2.3.1 Le système autonome

Il s'agit de systèmes de petites tailles, non connecté au réseau de distribution électrique. Ce type de systèmes s'adapte bien aux sites isolés, et, permet à des éoliennes inférieures à 100 kW d'assurer une production électrique dans les lieux éloignés de tout réseau de distribution électrique. Ils sont souvent équipés d'un dispositif qui stocke l'énergie pour la restituer lorsque les conditions de vent sont défavorables.

Ces systèmes éoliens sont classés en fonction de leur puissance nominale propre, c'est-à-dire de la puissance maximale de sortie du système, par vent fort et dans des conditions idéales.

§ Les micro-systèmes (100 watts au maximum)

Ils sont utiles dans les applications suivantes :

- Systèmes portatifs destinés à l'éclairage, et, aux ensembles de radiocommunications des camps de pêche et de chasse,
- Petits appareils électroménagers des yachts, des véhicules récréatifs, des maisonnettes et des chalets,
- Eclairage d'endroits éloignés,
- Eclairage d'urgence,
- Chargeurs d'entretien,
- Balises et phares de navigation,
- Systèmes de communications.

§ Les mini-systèmes de 100 watts à 10 kilowatts

Ils sont utiles dans les applications suivantes :

- Appoint d'une petite génératrice diesel ou à essence,
- Pompage de l'eau destinée au bétail ou à l'irrigation,
- Pompage de l'eau domestique ou utilisée dans les chalets,
- Systèmes de télécommunications,
- Eclairage localisé et de secours,
- Réfrigération et fabrication de glace pour la conservation du poisson dans les endroits éloignés,
- Traitement de l'eau et des déchets,
- Pompage des eaux usées.

§ Petits systèmes de 10 kilowatts à 50 kilowatts

La capacité de ces systèmes est suffisante pour assurer l'approvisionnement en électricité d'une ferme ou d'une installation commerciale, ainsi que pour l'alimentation en électricité des communautés ou des camps éloignés.

II.2.3.2 Le système raccordé au réseau

L'autre possibilité consiste à raccorder son installation au réseau basse et moyenne tension, et, à prélever le courant sur le réseau de distribution électrique lorsque la production est inférieure à la consommation, tel est le fonctionnement, dans le monde, des éoliennes raccordées

au réseau électrique. Le fonctionnement des grands aérogénérateurs est différent des éoliennes de pompage ou des éoliennes de production des sites isolés.

Une installation raccordée au réseau doit répondre à certaines conditions techniques. Comme les éoliennes modernes sont conçues pour démarrer doucement, on emploie donc des thyristors qui sont un type de semi-conducteur fonctionnant comme un interrupteur à progression continue susceptibles d'assurer leur connexion (ou déconnexion) graduelle au réseau [12,13]. Néanmoins, les thyristors perdent environ 1 à 2 % de l'énergie qui les traverse.

Les éoliennes modernes sont donc normalement munies d'un disjoncteur de dérivation, c'est-à-dire un interrupteur actionné après le démarrage souple de l'éolienne qui nous assure une perte d'énergie minime.

On s'intéresse dans notre travail au système autonome, dit aussi système décentralisé.

II.2.4 Spécificités liées à la technologie des aérogénérateurs

La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces vingt dernières années, entraînant ainsi, une spécialisation des différents types d'éoliennes. Certains concepts de base permettent de classer les diverses sortes d'aérogénérateurs, à savoir : leurs principales caractéristiques technologiques et leurs ingénieries.

II.2.4.1 Types des machines électriques (générateurs)

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. On donne par la suite les principales caractéristiques de chacun de ces types de machine [5] [14] :

§ Générateur synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, (ceux de 500 kW à 2 MW) sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau de distribution électrique, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau, ce qui a pour conséquence une grande rigidité de la connexion générateur - réseau, impliquant alors la propagation des fluctuations du couple captées par l'aéroturbine sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans

les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont, par contre, utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à des faibles vitesses de rotation, et, donc sont directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs, et, demandant un important travail de maintenance.

§ Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau de distribution électrique de ce type de machine est bien plus douce, grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. Dans les années 1990, les danois ont ajouté une deuxième machine électrique, pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses, et, augmenter par la même le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. Comme pour les machines synchrones, il existe différents types de machines asynchrones, qui associées à divers convertisseurs de puissance, fonctionnent dans des domaines de variation de vitesse de rotation plus ou moins importants. Deux des inconvénients majeurs des machines à induction sont, respectivement, la consommation de puissance réactive, et, le courant élevé au démarrage. Toutefois, ces problèmes peuvent être résolus par l'utilisation d'éléments d'électronique de puissance. Les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique, et, une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères [15].

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [15] :

§ Fonctionnement à vitesse fixe

Ce type de fonctionnement offre les avantages suivants :

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

§ Fonctionnement à vitesse variable

Ce type de fonctionnement présente aussi quelques avantages, qui sont :

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

II.2.4.2 Nombre de pâles

Les aérogénérateurs ont plus ou moins de pâles. Plus le nombre de pâles est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite [5]. Les aérogénérateurs modernes sont dotés d'une, de deux ou de trois pâles. Les machines uni et bi-pâles ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, mais, génèrent plus de bruit dans la mesure où elles vont plus vite, et, produisent un impact visuel plus important. Ceci explique pourquoi 80% des constructeurs fabriquent des aérogénérateurs tripâles.

II.2.4.3 Longueur et largeur des pâles

La largeur des pales formant le rotor n'intervient pas dans la puissance de l'aéromoteur qui n'est fonction que de la surface balayée. La largeur intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pôle sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, des pâles fines et légères sont plutôt recommandées. Une hélice est à pas variable ou à calage variable quand l'orientation de la pôle par rapport au moyeu se modifie pendant le fonctionnement.

La longueur de la pôle détermine le diamètre de l'hélice, lequel est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout des pâles, dues à la force centrifuge. La figure II.2 nous donne une représentation des diamètres généraux du rotor, munis de ses pales, valables pour les différentes tailles d'éoliennes.

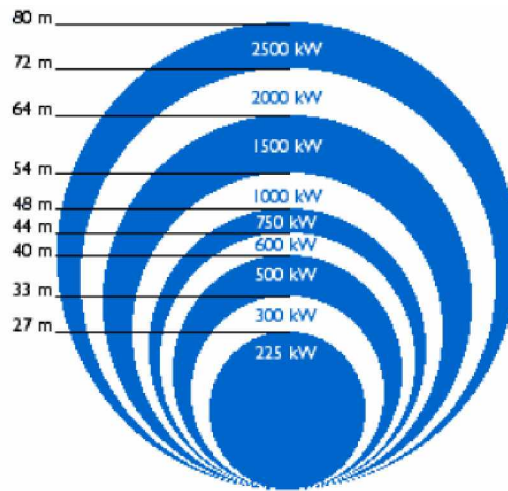


Fig. II.2 : Représentation des diamètres du rotor munis de ses pales, en fonction de la puissance fixée de l'éolienne.

II.2.4.4 La hauteur du pylône

Le choix de la hauteur du pylône dépend de la nature du terrain au-dessus duquel se propage la masse d'air. Ces variations sont représentées par la relation suivante :

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^a \quad (\text{II.1})$$

Où V_1 et V_2 représentent les vitesses de vent horizontales aux hauteurs h_1 et h_2 .

L'exposant α caractérise le terrain, il est compris entre 0,08 et 0,4. Sa valeur augmente en fonction de la grandeur et de la densité surfacique des obstacles au sol.

Pour que l'écoulement d'air soit laminaire, la tour doit être telle que l'éolienne d'un mini-système ou d'un petit système dépasse de 10 mètres la hauteur de tout obstacle se trouvant plus près.

II.2.4.5 Transmission mécanique et multiplicateur de vitesse

La transmission mécanique a pour fonction de transmettre la puissance du rotor vers la génératrice. Dans le cas des éoliennes à génératrice de basse vitesse, la transmission est réduite à sa plus simple expression : un roulement et un arbre mécanique qui est aussi celui de la génératrice.

Dans le cas des éoliennes conventionnelles, la transmission comporte les éléments suivants :

- § Une ligne d'arbre basse vitesse, appelée aussi arbre primaire,
- § Un multiplicateur de vitesse entre le rotor et la génératrice,
- § Un arbre grande vitesse, ou arbre secondaire, entre le multiplicateur et la génératrice.

- Arbre primaire

L'arbre basse vitesse est une pièce en acier spécial sur laquelle est placée à une extrémité une bride d'attaque du moyeu connectée à son autre extrémité au multiplicateur.

- Multiplicateur de vitesse

La vitesse de rotation du rotor est le paramètre le plus important dans la conversion de l'énergie mécanique. Elle est généralement faible, en effet, elle peut aller de quelques dizaines à une centaine de tours par minute. Or, les générateurs, les pompes rapides et les convertisseurs thermiques tournent à de grandes vitesses, ce qui nécessite un multiplicateur de vitesse.

La puissance produite par la rotation du rotor d'une éolienne est transmise à la génératrice par toute une chaîne dynamique, c'est-à-dire, par l'arbre lent, le multiplicateur et l'arbre rapide. Si nous utilisons une génératrice ordinaire raccordée directement à un réseau (courant alternatif, fréquence 50 Hz, trois phases) avec deux, quatre ou six pôles, il nous faudrait une turbine à une vitesse extrême, variant entre 1 000 et 3 000 tours par minute, avec un diamètre de 43 m, cela impliquera une vitesse tangentielle des pâles du rotor à leur extrémité, de plus de deux fois la vitesse du son.

La solution la plus pratique est de placer un multiplicateur entre l'arbre lente et l'arbre rapide. Le facteur de dimensionnement d'un multiplicateur est le couple (puissance divisée par la vitesse de rotation) caractérisé par un rapport de multiplicateur entre la vitesse de rotation du rotor et celle de la génératrice et est constant.

- Arbre secondaire

Cet arbre raccorde le multiplicateur de vitesse à la génératrice. Différentes configurations sont utilisées :

§ Accouplement direct de la génératrice avec le multiplicateur.

§ Arbre secondaire avec accouplement élastique, qui permet le découplage facile de la génératrice.

§ Arbre secondaire avec cardan.

II.2.4.6 Types de régulation de puissance de l'aérogénérateur

La puissance éolienne, captée par une aéroturbine, est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Il existe une vitesse de vent à partir de laquelle la puissance mécanique transmise par l'aéroturbine est supérieure à la puissance nominale de la machine électrique. Divers éléments de l'aérogénérateur sont dimensionnés en fonction des charges, de la vitesse de rotation et des puissances correspondantes à cette vitesse de vent.

Ces éléments ne peuvent pas supporter des valeurs de ces grandeurs supérieures à certaines limites. Il faut donc limiter la puissance captée par l'aéroturbine, lorsque le vent devient trop important. Il y a deux méthodes principales pour contrôler la puissance aérodynamique recueillie par la turbine, et, ainsi limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent est trop élevée.

D'une part, le comportement aérodynamique de la turbine peut être contrôlé activement en modifiant l'angle de calage, appelé aussi "pas", des pâles de la turbine autour de leur axe longitudinal. Ce type de régulation est appelé "**pitch-regulation**" ou "régulation par variation d'angle de calage". Ce système permet également de freiner la turbine, si nécessaire. Le comportement aérodynamique des pâles évolue également d'une manière passive, selon le rapport entre la vitesse de rotation de la turbine et la vitesse du vent. En effet, les pâles peuvent être conçues de façon à ce qu'à partir d'une certaine vitesse de vent, la turbulence provoquée par le profil des pâles entraîne un décrochage aérodynamique, et par conséquent, une décroissance du couple capté par chacune des pâles. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pâles.

Les pales sont fabriquées avec un pas variant suivant la position le long de la pôle, permettant ainsi, que le décrochage aérodynamique se produise progressivement d'abord près du moyeu puis de plus en plus près du bout des pâles. Ce genre de contrôle passif de la puissance, captée par les pâles, est appelé "**stall-regulation**" ou "régulation par décrochage aérodynamique"

[5]. Les éoliennes utilisant ce type de régulation de puissance possèdent en général un mécanisme de freinage en bout de pôle lequel, en cas de survitesse, actionne des masselottes par effet centrifuge, pour orienter une partie de l'extrémité de la pôle, freinant ainsi le rotor de manière aérodynamique [16,17].

Certains aérogénérateurs combinent les avantages des deux systèmes en réalisant un contrôle **stall-actif** [5,17]. Pour de faibles vents, l'angle de calage est contrôlé, comme dans le cas de la régulation pitch, c'est-à-dire, qu'il est modifié pour atteindre un bon rendement et un couple de démarrage suffisamment grand. Dans la zone de limitation de puissance, l'angle de calage est contrôlé en direction contraire à celui de la stratégie de régulation pitch, avec l'objectif de rentrer dans la zone de perte aérodynamique, c'est à dire de provoquer la "stall". On dit que ce type de contrôle entraîne une régulation de puissance plus douce.

En 2000, environ 60% des aérogénérateurs utilisaient la régulation "stall", mais les grandes machines d'aujourd'hui, utilisent presque en exclusivité le contrôle « pitch ».

II.2.4.7 La courbe de puissance d'une éolienne

La courbe de puissance est un graphe représentant la puissance de sortie d'une éolienne à différentes vitesses de vent. On élabore les courbes de puissance à partir de mesures réalisées sur site, en fixant un anémomètre sur un mât, situé à proximité de l'éolienne (pas sur l'éolienne même, ou, trop près d'elle vue qu'elle risquera alors de provoquer des turbulences qui nuiront à la fiabilité des mesures). Dans le cas où les fluctuations de la vitesse de vent ne sont pas trop rapides, il est possible d'utiliser directement les mesures de la vitesse du vent obtenues par l'anémomètre, et, de lire la puissance de sortie. Ensuite, on trace les deux valeurs conjointement.

La courbe de puissance est en réalité une multitude de points espacés autour de la courbe bien définie, comme celle du graphe II.3. La raison en est qu'il y aura toujours des fluctuations de la vitesse du vent ce qui rend impossible la mesure de façon précise du flux d'air passant à travers le rotor de l'éolienne. Placer un anémomètre devant l'éolienne ne résoudra pas ce problème, l'éolienne projetant également une "ombre" en amont qui freine, elle aussi, le vent. Dans la pratique, on doit donc prendre la moyenne des différentes mesures pour chaque vitesse de vent et les utiliser pour tracer le graphe. De plus, il est difficile d'obtenir des mesures précises de la vitesse du vent. S'il y a une erreur de seulement 3 % dans la mesure de la vitesse du vent, le contenu énergétique réel du vent pourra être de 9 % supérieur ou inférieur au résultat obtenu, étant donné que le contenu énergétique varie avec le cube de la vitesse du vent.

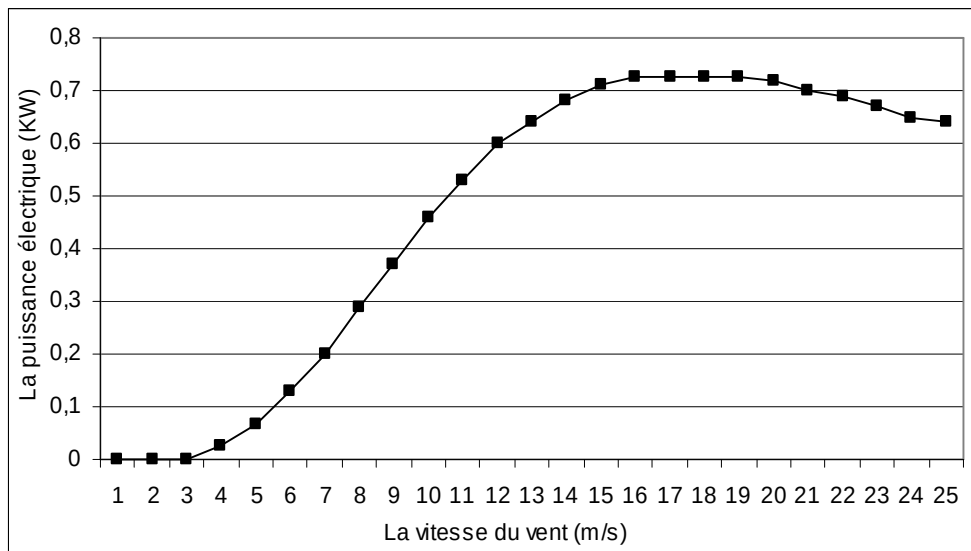


Fig II.3 : La courbe de puissance.

Par conséquent, il faut prévoir un risque de +/- 10 %, même dans les courbes de puissance certifiées. Pour cette raison, les courbes de puissance sont basées sur des mesures faites sur des terrains, où la turbulence est faible, et, où le vent souffle directement vers la face de l'éolienne. Des turbulences locales et un terrain complexe (p.ex. une pente rugueuse) peuvent impliquer que des rafales de vent frappent le rotor depuis des directions diverses. Dans ce cas-là, il peut s'avérer difficile de reproduire de façon exacte la courbe de puissance d'une éolienne installée sur un site donné.

II.2.4.8 Le coefficient de puissance

Le coefficient de puissance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie du vent en électricité. Pour mesurer l'efficacité technique d'une éolienne, nous divisons tout simplement la puissance électrique de sortie par l'énergie éolienne d'entrée. Nous prenons, en d'autres mots, la courbe de puissance, et, la divisons par la surface du rotor, afin d'obtenir la puissance de sortie par mètre carré de la surface balayée par le rotor.

L'obtention d'une efficacité technique élevée n'est pas un but, cependant, ce qui importe réellement est le coût de la récupération des kWh du vent pendant les 20 ans de fonctionnement de l'éolienne. Comme le combustible est gratuit, il n'est pas nécessaire de le mettre en réserve. L'éolienne optimale n'est donc pas forcément celle qui produira la plus grande énergie de sortie annuelle.

II.3. Le système de stockage d'énergie électrique

Ce sont des systèmes autonomes associés à des batteries ou des accumulateurs simples, il existe aussi d'autres types d'accumulateur, tels que :

§ Les batteries d'accumulateurs au plomb.

§ Les accumulateurs alcalins.

Des circuits électriques sont associés à ces systèmes de stockage pour contrôler l'état des batteries, et, protéger la machine de la charge et la décharge de ces dernières. On distingue deux types de contrôle, celui manuel et un autre automatique.

- Contrôle manuel :

Le dispositif de protection monté en série dans le circuit de la charge de batterie comprend :

§ Obligatoirement : soit une diode de puissance qui évite que la batterie ne se décharge dans la génératrice, lorsque celle-ci est arrêtée, dans le cas où l'aéromoteur est équipé d'une génératrice à courant continu, ou d'un pont redresseur monophasé ou triphasé si l'aéromoteur est équipé d'un alternateur. Dans le cas d'un alternateur, on pourra intercaler entre l'alternateur et le redresseur un transformateur pour adapter la tension de sortie de l'alternateur à celle de la batterie d'accumulateurs.

§ Un interrupteur et un fusible sur le circuit de charge de l'aérogénérateur. L'interrupteur permet de couper la charge lorsque la batterie est complètement chargée et le fusible protège les éléments, en cas de fausses manœuvres, ou, de défaut dans un composant.

§ Un interrupteur et un fusible sur le circuit d'alimentation pour empêcher la batterie et le circuit électrique d'être détériorés par un court circuit prolongé dans l'utilisation.

§ Un voltmètre dont le calibre correspond à la tension batterie et qui sert à vérifier l'état de la batterie.

§ Un ampèremètre ou un témoin de charge monté en série dans le circuit de charge permet de mesurer le courant, délivré par l'aérogénérateur.

- Contrôle automatique :

Le dispositif automatique doit assurer la protection de la batterie dans les deux cas suivants :

- Les accumulateurs sont complètement déchargés par absence de vent productif, il est alors nécessaire d'interrompre la décharge de la batterie.

- Les accumulateurs sont complètement chargés par la production prolongée d'énergie et une consommation réduite. Il est alors nécessaire de couper le courant de charge de la batterie.

Après avoir présenter la machine qui assure la conversion de l'énergie éolienne, on montre ci-après la manière, dont cette conversation peut être quantifiée.

II.4. Potentiel éolien

II.4.1 La quantification de l'énergie éolienne

L'installation d'une éolienne doit tenir compte, de la vitesse de vent, de la linéarité du vent qui dépend des obstacles (habitat, arbre,...), et, de l'espace disponible.

Un des premiers éléments à déterminer dans l'étude de faisabilité d'un système éolien, c'est tout d'abord, la quantité d'énergie éolienne dont on dispose, car les performances énergétiques d'un aérogénérateur dépendent dans une large mesure du "gisement éolien" potentiel du site sur lequel celui ci sera installé. Les caractéristiques principales de ce gisement éolien sont données par la régularité, et, la vitesse du vent à différentes altitudes. Il faut, à cet effet, mesurer, au préalable, la vitesse du vent pendant une période déterminée, en notant les laps de temps pendant lesquels le vent souffle aux différentes vitesses, puis calculer la vitesse annuelle moyenne du vent. Pour qu'un système éolien présente un intérêt matériel, la vitesse annuelle moyenne doit atteindre 15 km/h au minimum. Il importe, également, de connaître la variation de la vitesse du vent. La vitesse du vent n'est presque jamais nulle, et, ne dépasse que rarement – et toujours brièvement – le double de sa vitesse annuelle moyenne.

Ces caractéristiques permettent de quantifier le gisement énergétique, grâce à un travail d'analyse et de traitement statistique des données du vent sur une longue période. L'extrapolation en altitude de ces caractéristiques est donnée avec une approximation satisfaisante par des codes de calculs spécialisés le plus souvent calés sur des valeurs mesurées, lors de campagnes effectuées in situ [5, 6,7].

II.4.2 Courbe de Rayleigh

Pour évaluer la quantité d'énergie éolienne disponible sur un site, on utilise un des outils d'évaluation appelée courbe de Rayleigh de distribution de vitesse de vent. Ce n'est qu'un graphique montrant le nombre d'heures, pendant lesquelles le vent souffle à chacune des vitesses

relevées. Le vent souffle le plus fréquemment à la vitesse correspondant au point le plus élevé de la courbe, comme nous montre la figure suivante :

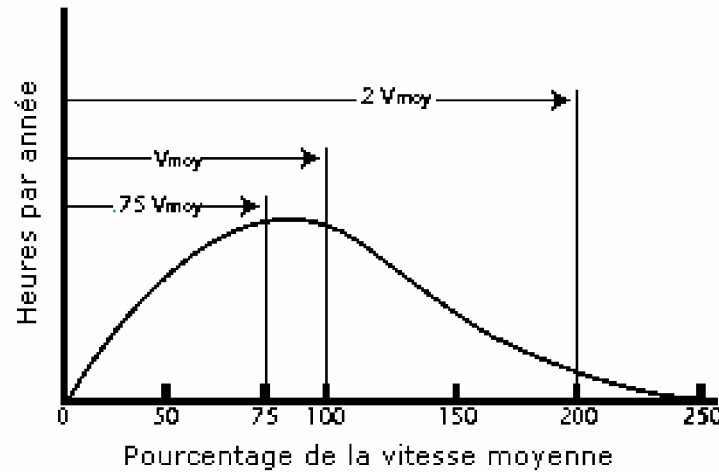


Fig. II.3 : Représentation du pourcentage de la vitesse annuelle moyenne du vent (V_{moy}), en fonction des nombres d'heures par années.

Le point le plus élevé de la courbe correspond à la vitesse à laquelle le vent souffle le plus souvent. Ce type de graphique est appelé courbe Rayleigh de distribution de la vitesse du vent.

II.4.3 La limite de Betz

La vitesse du vent diminue lorsqu'on en capte de l'énergie. En principe, si on retirait du vent toute énergie qu'il contient, il cesserait d'exister! Néanmoins, en réalité, il est impossible de capter toute l'énergie contenue dans le vent. Le maximum d'énergie qu'un système éolien idéal peut capter équivaut à environ 59 % de l'énergie contenue dans le vent. Cette valeur est appelée la limite de Betz qui est déterminée comme suit :

L'énergie cinétique E_c d'une masse d'air m qui se déplace avec la vitesse v , est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{II.2})$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface A , situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance éolienne instantanée serait alors [10] :

$$P_e = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (\text{II.3})$$

où :

ρ : la masse volumique de l'air ($\rho \approx 1,25 \text{ kg/m}^3$).

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance P inférieure à la puissance disponible P_e , par suite de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur.

L'aptitude de conversion de l'énergie éolienne est donnée par le coefficient de puissance C_p , défini par la relation :

$$c_p = \frac{P}{P_e} ; c_p < 1 \quad (\text{II.4})$$

L'évaluation suivante de ce coefficient est basée sur la théorie Rankine - Froude de l'hélice éolienne dans un fluide incompressible. Dans la figure II.4, on donne le schéma des vitesses dans ce modèle d'écoulement axial de l'air à travers la surface A , balayée par une hélice.

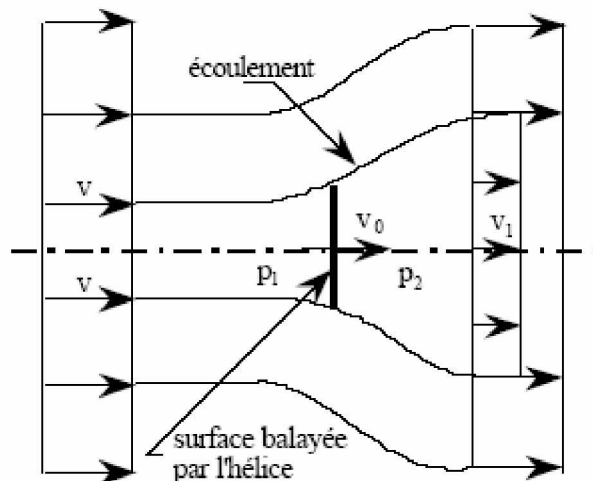


Fig. II.4 : Modèle de l'écoulement axial de l'air.

On a noté :

v : la vitesse axiale d'écoulement en amont,

v_0 : la vitesse d'écoulement sur la surface A ,

v_1 : la vitesse axiale en aval,

p_1 et p_2 : les pressions avant et après l'hélice.

La quantité du moment H , transmise par l'hélice avec une masse d'air m qui traverse la surface A , est donnée par la formule suivante :

$$H = m (v - v_1) \quad (\text{II.5})$$

La quantité du moment donnée par H produit une force T , qui peut être exprimée selon deux expressions :

$$T = \frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{\Delta m (v - v_1)}{\Delta t} = \frac{\rho A v_0 \Delta t (v - v_1)}{\Delta t} = \rho A v_0 (v - v_1) \quad (\text{II.6})$$

et

$$T = A(p_1 - p_2) \quad (\text{II.7})$$

En utilisant la relation de Bernoulli, on obtient :

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v^2 - v_1^2) \quad (\text{II.8})$$

La relation (II.7) devient :

$$T = \frac{1}{2} \rho A (v^2 - v_1^2) \quad (\text{II.9})$$

On obtient :

$$v_0 = \frac{1}{2} (v + v_1) \quad (\text{II.10})$$

$$v - v_1 = 2(v - v_0) \quad (\text{II.11})$$

L'énergie cinétique transmise à l'hélice est :

$$E_c = \frac{1}{2} m (v^2 - v_1^2) \quad (\text{II.12})$$

Si m représente la masse d'air qui traverse la surface A dans l'unité de temps, c'est à dire $m = \rho A v_0$, alors l'expression (II.13) exprime la puissance extraite par la turbine :

$$P = \frac{1}{2} \rho A v_0 (v^2 - v_1^2) \quad (\text{II.13})$$

et

$$c_{p\max} = c_p\left(\frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (\text{II.14})$$

Cette valeur détermine la puissance maximale récupérable par l'hélice, valeur dénommée la limite de BETZ du coefficient de puissance.

Et la formule de BETZ est donnée par :

$$P = 0,5 C_p \rho A v^3 \quad (\text{II.15})$$

P : puissance récupérable par une éolienne (en W).

A : surface balayée par les pâles (en m²).

v : vitesse du vent (en m/s).

Conclusion

Pour de nombreuses applications, l'énergie éolienne est un bon complément aux systèmes solaires électriques en particulier pour les sites isolés, car en hiver il y a plus de vent que de soleil.

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie dont la croissance est la plus forte actuellement. Avec cette croissance, l'énergie éolienne garde sa position de leader parmi les différentes sources d'énergie de substitution. De 1990 à 2000, la puissance installée a été multipliée par un facteur de plus de 9. A l'horizon 2005, quelques 58000 MW devraient être installés dans le monde. Il est prouvé que le vent est la source de production d'électricité la moins chère, de plus les maîtrises des ingénieries des systèmes éoliens sont largement assurées, notamment, dans les pays avancées, tels que le Danemark, les Etats-Unis, la France, et, l'Allemagne.

Pour les constructeurs d'éoliennes, l'objectif principal des activités de recherches et de développer est d'améliorer le rapport entre le coût et la performance des éoliennes. Un bon dimensionnement et un bon choix du matériel garantissent le bon fonctionnement de l'installation, sa durée de vie et sa rentabilité.

Chapitre III

Mesure du vent

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu les appareils de mesure du vent qu'il nous permet d'avoir des données sur ce dernier, en suite nous allons montrer les différentes méthodes destinées au traitement des données du vent.

III.1. Introduction

Comme on a vu au chapitre II où la quantification de l'énergie éolienne est conditionnée par la connaissance des données des vitesses du vent. Ainsi, le dimensionnement de la chaîne de conversion présenté au chapitre VI qu'il nécessite aussi des données de vent, d'où nous allons présenter dans ce chapitre les paramètres du vent et comment on les détermine ainsi sa vitesse moyenne.

Le vent est une grandeur vectorielle tridimensionnelle, il est caractérisé par deux grandeurs variables par rapport au temps : la vitesse et la direction. Comme ces deux grandeurs sont variables, on mesure la valeur moyenne sur des intervalles réguliers de temps [18, 19]. Ces mesures sont faites sur dans les endroits où on veut implanter un aérogénérateur d'où la mesure du vent nous aide aussi au choix de du site.

III.2. Sites d'implantation d'aérogénérateurs

Pour tous les types d'aérogénérateurs, le choix du site est déterminant, mais les paramètres de choix sont sensiblement différents s'il s'agit d'une éolienne car il nécessite un vent régulier et suffisamment puissant. Les sites les plus favorables sont ceux où le vent rencontre peu d'obstacles de types forêts, bâtiments, pylônes,... En conséquence, une éolienne est installée de préférence dans un endroit un peu élevé et dégagé. Les sites les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets des collines et des montagnes bien dégagées, malgré que le premier présente des problèmes de corrosion et le second des risques de givrage. La recherche des sites constitue donc le premier travail à effectuer pour juger la possibilité d'implantation des éoliennes. Des relevées météorologiques sur les sites présumés doivent être effectuées au moins pendant une année.

III.2.1 Les appareils de mesure

Les meilleurs spécialistes examinent l'orientation des branches d'arbre et l'état des bourgeons, mais il existe des outils modernes et parfois simple pour mesurer et surtout enregistrer la vitesse des vents sur une assez longue période, car il y a souvent davantage de vent en hiver qu'en été. On utilise alors un anémomètre et une girouette reliés à un système électronique qui affiche ou enregistre les données. Ces deux appareils sont installés en haut d'un mat dont la hauteur correspond à la hauteur moyenne de l'éolienne prévue :

§ La "girouette" permet de mesurer la direction du vent moyen, elle possède généralement 18 directions de 20°. Le transducteur associé aux girouettes est un convertisseur d'angles qui peut être constitué par une résistance variable par bonds, un circuit à capacité ou inductance variable [2].

§ L'anémomètre fournit le module du vecteur vent (vitesse ou force du vent), on l'exprime en m/s ou en nœud (1 nœud = 0,515 m/s). Il existe un certain nombre d'anémomètres mais le plus utilisé, est l'anémomètre à coupelle (moulinet). Il est muni d'un rotor de trois coupelles en métal ou en plastique qui sous l'effet du vent se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse est enregistrée électroniquement, on peut citer [14].

Il existe d'autres types d'anémomètres :

- Ø Anémomètres à ultrason ou à laser,
- Ø Anémomètre à fil chaud (thermique).

III.2.2 La rose du vent

Afin de mieux se faire une idée de la direction du vent, on peut construire une rose de vent à partir des observations météorologiques faites dans une région donnée.

La rose des vents correspond à un compas, elle se compose de plusieurs sections, l'horizon ayant été divisé en 8, 12 ou 16 secteurs de 30° chacun. Le rayon de chacun des secteurs coniques indique la fréquence relative de chaque direction du vent. La portion la plus petite dans chaque secteur montre la contribution au total de la vitesse moyenne de la direction du vent en question, tandis que la contribution totale de la moyenne du cube de la vitesse est donnée par la portion centrale marquée en rouge, qui est la section la plus intéressante [11].

La figure III.1 montre à titre d'exemple la rose des vents de Brest France (source : Atlas Eolien Européen, laboratoire nationale de Rissole).

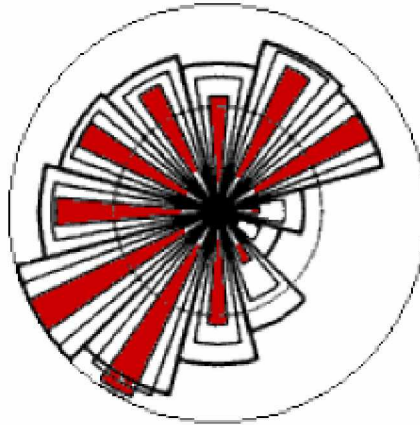


Fig. III.1 Rose des vents de Brest [14].

Comme nous montre la figure précédente, elle se compose de plusieurs sections. Cela correspond au standard appliqué par l'Atlas Eolien Européen, mais la rose des vents aurait tout aussi bien pu être construite avec huit ou seize secteurs. Le rayon de chacun des douze secteurs coniques indique la fréquence relative de chaque direction du vent. La portion la plus petite dans chaque secteur montre la contribution au total de la vitesse moyenne de la direction du vent en question, tandis que la contribution totale de la moyenne du cube de la vitesse est donnée par la portion centrale marquée en rouge. La capacité énergétique du vent varie avec le cube de la vitesse du vent. Ce sont donc les sections marquées en rouge qui sont les plus intéressantes à étudier, lorsqu'on essaye de trouver un site propice à l'installation d'une éolienne. Dans ce cas, nous voyons que la direction dominante du vent est sud-ouest. La rose des vents nous indique les vitesses relatives du vent soufflant dans des directions différentes.

Le vent est un processus aléatoire, non stationnaire, qui dure peu de temps. Pour caractériser un tel phénomène et connaître son évolution au cours du temps, il faudrait évaluer ces propriétés climato-statiques puis analyser celles-ci dans l'espace et dans le temps [15]. La distribution du vent se modélise facilement par la loi de Weibull à deux paramètres.

III.3. Distribution de Weibull [20]

De nos jours, la distribution de Weibull est couramment utilisée pour ajuster les données expérimentales du vent avec une très bonne précision. Supposons que pour un site donné et pour un secteur de direction donné, les mesures de la vitesse du vent, soient représentées par une variable aléatoire continu (v) dont les valeurs possibles sont celles de la vitesse du vent et dont la densité de probabilité est une distribution de Weibull $f(v)$. Cette distribution, s'écrit [5] :

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (\text{III.1})$$

Où, v , k et C sont respectivement la vitesse du vent (m/s), le facteur de forme (qui est sans dimension) et le facteur d'échelle (en m/s).

La probabilité d'avoir une mesure (v) de la vitesse du vent, est :

$$F(v) = \int_0^v f(v) dv = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (\text{III.2})$$

On en déduit que le moment d'ordre n de cette distribution est :

$$\mu_n = c^n \Gamma \left(1 + \frac{n}{k} \right) \quad (\text{III.3})$$

La fonction gamma qui intervient dans cette expression, est de la forme :

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty \left(\frac{v}{c} \right)^{x-1} \exp \left(- \frac{v}{c} \right) d \left(\frac{v}{c} \right) \quad (\text{III.4})$$

En calculant les moments du premier ordre et du second ordre à l'aide de l'équation (III.2), on trouve que la moyenne $\bar{v}$ et l'écart-type σ de la distribution de Weibull sont respectivement :

$$\bar{v} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (\text{III.5})$$

$$\sigma = c \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{1/2} \quad (\text{III.6})$$

III.4. Les différentes méthodes pour déterminer les paramètres de Weibull

Deux sortes de méthodes permettent d'évaluer le facteur de forme (k) et le facteur d'échelle (c), qui sont :

III.4.1 La première méthode [1]

La première méthode consiste à linéariser les distributions cumulées (III.2) et à ajuster les distributions de fréquences des vitesses du vent au moyen de la méthode des moindres carrées.

Cette méthode est mise en œuvre en prenant des échelles logarithmiques. Après transformation, l'équation (III.2) s'écrit sous une forme linéaire qui est [15]:

$$\ln[-\ln(1-F(\bar{v}))] = k\ln(\bar{v}) - k\ln c \quad (\text{III.7})$$

Pour une station donnée et pour une direction donnée, les mesures de la vitesse du vent collectées au cours de la période donnée, ont été regroupées en classes distinctes d'étendue égale à 2 m/s.

Le premier membre de l'équation (III.7) est calculé en considérant les valeurs de chacune des classes. En portant en abscisse (x) le second membre de l'équation (III.7) et en ordonnée (y) le premier membre de celle-ci, on obtient ainsi un nuage de points représentatifs des mesures effectuées.

L'étape suivante est l'application de la technique des moindres carrés pour ajuster ce nuage de points à une droite de régression de la forme $y = a x + b$. On en déduit alors que :

$$c = \exp(-b/a) \quad \text{et} \quad k = a.$$

D'où :

À partir des distributions des fréquences des vitesses du vent, La probabilité discrète pour qu'une vitesse de vent soit inférieure à une vitesse v_i s'exprime par :

$$F_i = F(v < v_i) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k\right] \quad (\text{III.8})$$

En posant :

$$X_i = \ln v_i \quad \text{et} \quad Y_i = \ln [-(1 - \ln F_i)]$$

L'équation (III.9) peut se mettre sous la forme :

$$Y_i = kX_i - k\ln c \quad (\text{III.9})$$

On peut déterminer la droite de régression linéaire:

$$Y_i = b + a X_i \quad (\text{III.10})$$

De ces valeurs on déduit les paramètres de Weibull:

$$c = \exp(-b/a) \quad \text{et} \quad k = a \quad (\text{III.11})$$

La procédure consiste à déterminer, pour une période bien définie, la valeur maximale des vitesses du vent mesurées et à partager l'intervalle en n intervalles égaux de bornes supérieures $v_1, v_2, \dots, v_n$.

Pour chaque intervalle $[v_{i-1}, v_i]$, on cherche le nombre f_i de valeur de vitesse du vent y tombant et on calcul les probabilités comme suit :

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= f_1 \\ F_2 &= f_1 + f_2 \\ &\vdots \\ F_n &= F_{n-1} + f_n \end{aligned} \right\} \quad (III.12)$$

Nous avons utilisé la méthode des moindres carrés pour calculer les estimateurs $\hat{a}$ et $\hat{b}$ correspondant aux valeurs des paramètres a et b qui minimisent la distance du nuage de point (X_i, Y_i) à la droite de régression. Il s'agit donc de résoudre le problème de minimisation suivant :

$$\min_{a,b} \sum_{i=1}^n (Y_i - aX_i - b)^2 \quad (III.13)$$

La résolution de ce problème donne :

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (III.13a)$$

$$\hat{b} = \bar{Y} - \hat{a} \bar{X} \quad (III.13b)$$

Où : $\bar{X}$ est la moyenne des X_i , et $\bar{Y}$ est la moyenne des Y_i .

On obtient finalement pour les coefficients de Weibull :

$$c = \exp\left(-\frac{\hat{b}}{\hat{a}}\right) \quad (III.14)$$

$$k = \hat{a}$$

III.4.2 La deuxième méthode [1]

La seconde méthode est basée sur le calcul des moments du premier ordre et du second ordre de la distribution de Weibull.

Cette méthode repose sur la résolution de l'équation (III.4). En effet, les paramètres de Weibull (c) et (K) sont estimés connaissant le moment du premier ordre (μ_1) et le moment du second ordre (μ_2). Dans ce cas, on peut écrire que :

$$c = \frac{\mu_2}{\mu_1} M(k) , \quad (\text{III.15})$$

Et

$$c = \frac{\mu_2}{\mu_1^2} N(k) \quad (\text{III.16})$$

Avec :

$$M(k) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)} \quad (\text{III.17})$$

Et

$$N(k) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (\text{III.18})$$

Les équations (III.15) et (III.16) sont alors résolues numériquement en considérant les tables des fonctions Gamma et en procédant par récurrence.

La méthode de régression linéaire est plutôt facile à mettre en œuvre, mais nécessite la connaissance de toutes les distributions de fréquences des vitesses du vent. En dépit de sa complexité, la seconde méthode utilise seulement les valeurs moyennes expérimentales des moments du premier ordre et du second ordre.

CHAPITRE IV

La base de données

Dans ce chapitre, les différentes techniques de programmation, utilisés dans notre application, seront présentées. Cela concerne aussi bien les modes opératoires nécessaires à la préparation, l'organisation et, la création de bases de données, mais aussi, à leur gestion, leur exploitation, et, leur actualisation, si nécessaire.

IV.1. Préambule

Afin de faire une étude précise, de manière rapide et avec une grande sécurisation des données, on a informatisé notre travail par l'utilisation de quatre logiciels, un pour le calcul (Matlab, version 7), un pour le dessin (Excel), un pour la création de la base de donnée (Access) et un autre qui un langage de programmation orienté objet destiné pour la création des interfaces (Visual Basic).

IV.2. La base de données

La base de données est un ensemble de données structurées, sous forme d'une ou plusieurs "tables de données", chaque table représentant un ensemble de données relatives à un domaine, ou, à une entité bien déterminée.

Des liaisons existent entre les tables qui dépendent les unes des autres, c'est la raison pour laquelle, elles sont rassemblées dans une base de données.

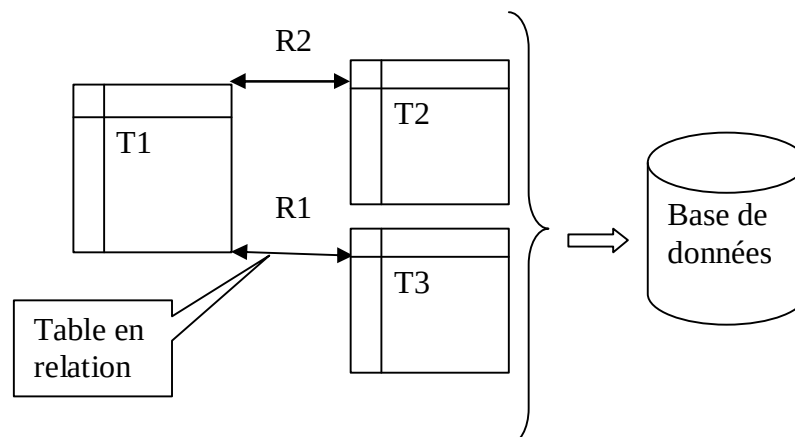


Fig. IV.1 : Représentation d'un schéma d'une base de données.

Cette base de données est constituée de trois (03) tables : T1, T2 et T3. R1 et R2 sont respectivement, les liaisons entre T1 et T2, et, T1 et T3.

En d'autres termes :

Une base de données est un regroupement d'information sous forme d'un tableau ou liste : ces informations concernent un domaine bien déterminé.

IV.2.1 Système de gestion de base de données

Une base de données est une représentation de la réalité en utilisant ce qu'on appelle un système de gestion de base de données (SGBD), tel que Access. Le SGBD permet de créer une base de données à travers toutes ses tables de données. Chaque table représente une structure de données, un domaine ou décrivant un objet déterminé.

Un SGBD est un programme informatique qui permet d'organiser, de représenter, de rechercher, et de conserver les informations. Un SGBD peut constituer un programme à part entière, tel que Access ou DBASE, comme il peut intégrer un langage de programmation tel que clipper, delphi.

Il existe aussi un SGBD relationnel, qui est un SGBD qui permet de gérer des données par domaine et d'établir des relations entre ces domaines. En d'autres termes, les tables qui constituent la base de données possèdent des relations entre elles.

IV.2.2 Access et les bases de données

Access est un SGBD, qui permet d'offrir à l'utilisateur un environnement agréable et complet pour gérer les bases de données. Access est un outils puissant, vu la quantité d'information qu'il peut contenir, flexible vu les services qu'il peut offrir pour manipuler les données, efficace quant on sait que la création des bases de données des états à imprimer ainsi que les requêtes à formuler n'est qu'un jeu.

En effet, Access intègre des assistants qui permettant d'accompagner l'utilisateur tout au long de son travail.

IV.2.3 Objectif d'une base de données Access

Une base de données ne comporte pas que des données, mais en plus, il comporte plusieurs objets qui permettent la gestion de ces données, ce sont les tables, les requêtes, les formulaires, les états, les pages, les Marcos et les module.

- Les tables

Une table est une structure de données organisées sous forme de colonnes représentant les champs et les lignes, les enregistrements.

Exemple : Pour une table machine

Numéro produit	Désignation produit	Puissance	Marque
01	aérogénérateur	200w	Bergy
02			

Champs

Enregistrement

- Les requêtes

Une requête est une question. Que l'utilisateur formule pour interroger sa base de donnée, afin de lui restituer des informations particulières.

- Les formulaires

Un formulaire est une fenêtre conçue pour aider l'utilisateur à saisir les informations facilement et avec précision.

- Les états

Un état est un récapitulatif d'information, fait à partir d'une base de donnée pour être affiché ou imprimé.

- Les modules

Un module est un programme que l'utilisateur écrit en utilisant un langage de programmation, en l'occurrence Microsoft Visual Basic dans le but d'automatiser un traitement sur la base de donnée.

- Les Relations

Pour manipuler des données de plusieurs tables, nous devons établir une relation entre ces tables, deux à deux. La relation est construite sur un champ de la première table et un champ de la deuxième table ; elle met en correspondance les enregistrements des deux tables qui ont la même valeur dans ces champs. La relation peut être définie au niveau des tables elles-mêmes, ou bien être établie au niveau d'une requête.

- Les Macros

Une macro est une séquence d'actions enregistrées qui peut être exécutée automatiquement. Une macro peut servir à exécuter une tâche en réponse à un événement

(validation avant sauvegarde d'un enregistrement, ouverture d'un formulaire en cliquant sur un bouton de commande).

IV.3. L'Application (La base de donnée construite)

IV.3.1 Schématisation de la base de donnée

Pour la conception de la base de donnée on a utilisé le logiciel Access.

Dans sa structure est constituée de cinq tables, dont chacune d'elles, est dotée des caractéristiques des paramètres correspondants.

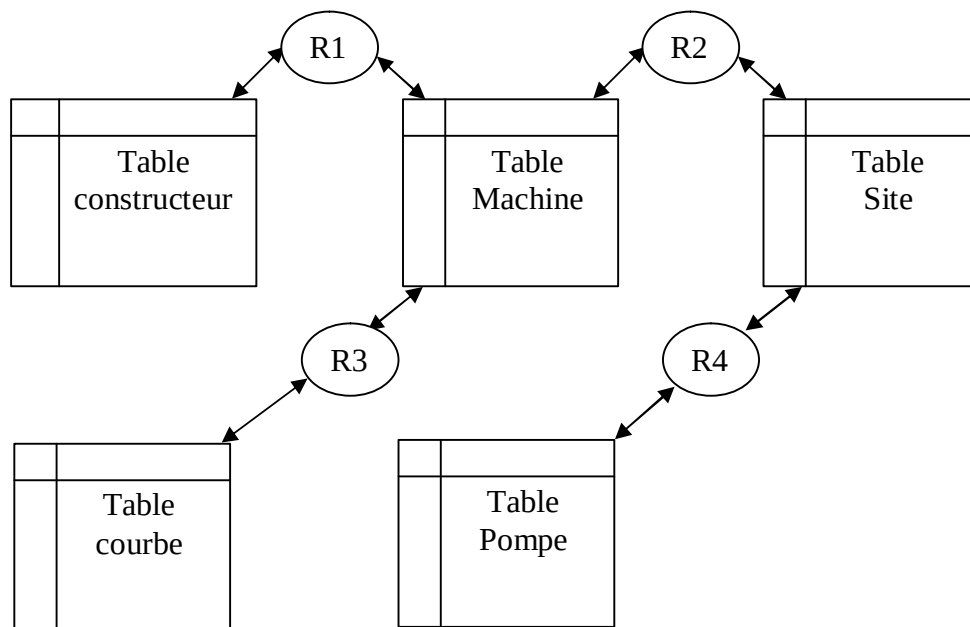


Fig. IV.1 : Schéma de la base de donnée.

- La table constructeur : dans cette table, on trouve les différents constructeurs des aérogénérateurs (Bergy, INCLIN, FORTIS,...).

- La table machine : les différentes informations qui caractérisent chaque aérogénérateur sont stockées dans cette table, et, données par :

Le nom de la machine, sa vitesse maximale, sa puissance nominale, son poids,

- La table site : les différents paramètres qui caractérisent chaque site sont stockées dans cette table sont données par :

Le nom du site sa vitesse moyenne et le deux paramètres de Weibull, le facteur de forme et le facteur de turbulence.

- La table pompe : dans cette table on trouve seulement les noms de celles utilisées dans notre application, pouvant être actualisés, en cas de besoin.

- La table courbe : c'est une table appartenant à la table machine. Elle est constituée par les différentes données des courbes de puissance de chaque aérogénérateur.

Les relations existantes entre les différentes tables sont :

- R1 : Entre la table aérogénérateur et la table constructeur, un constructeur peut avoir plusieurs machines par contre un aérogénérateur ne peut appartenir qu'à un seul constructeur.

- R2 : Entre la table aérogénérateur et la table site, un aérogénérateur peut appartenir à plusieurs sites.

- R3 : Entre la table aérogénérateur et la table courbe, un aérogénérateur ne peut avoir qu'une seule courbe et une courbe ne peut appartenir qu'à un seul aérogénérateur.

- R4 : Entre la table site et la table pompe, un site peut avoir plusieurs pompes et une pompe peut appartenir à plusieurs sites.

IV.3.2 Les différents aérogénérateurs utilisés

Suite à l'évolution de l'utilisation de l'énergie éolienne dans la production d'électricité, plusieurs sociétés sont apparues dont l'objectif est de contribuer à la construction d'un nombre consistant d'aérogénérateurs idéaux, destinés aux communautés isolées nécessitant des besoins de puissance moyenne, tel que des petites fermes ou maisons, et plus particulièrement pour l'électrification rurale, le pompage d'eau potable ou d'irrigation, le dessalement d'eau de mer. Les différents aérogénérateurs constituant notre base de donnée sont représentés comme suit :

IV.3.2.1 Les aérogénérateurs de marque INCLIN

La marque INCLIN composée de cinq aérogénérateurs ayant des puissances nominales différentes 250, 600, 1500, 3000 et 6000 W, leurs caractéristiques sont représentées comme suit :

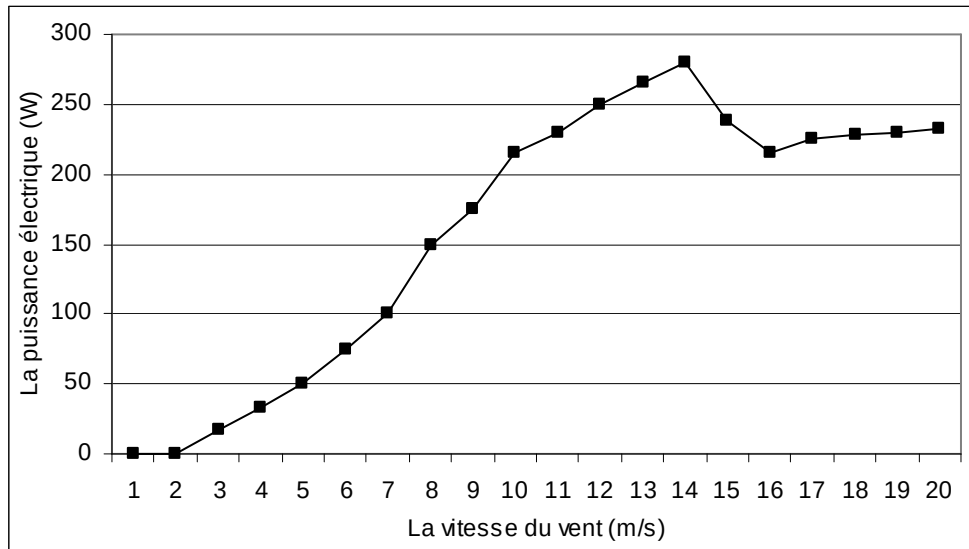


Fig. IV.2 : Variation de la puissance électrique instantanée (en Watt) de l'aérogénérateur de marque INCLIN 250, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

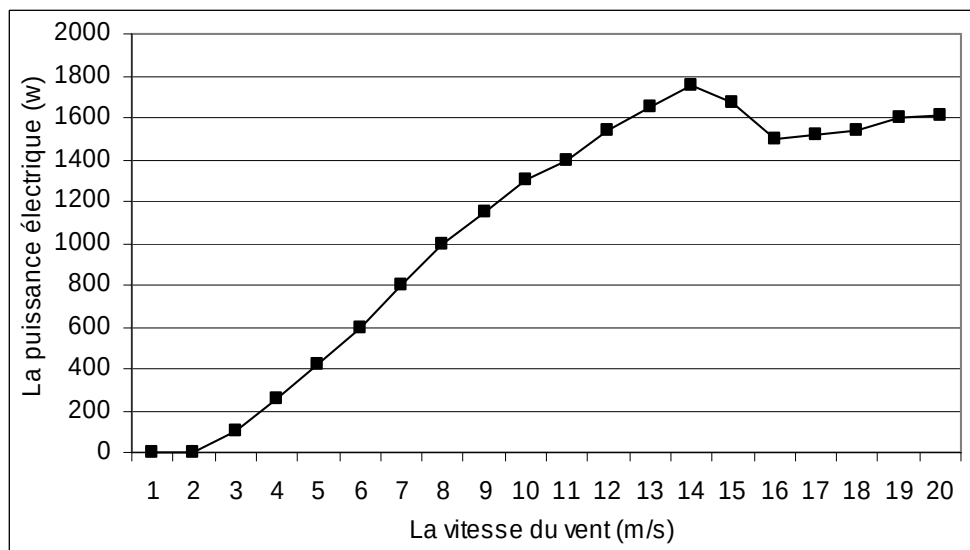


Fig. IV.3 : Variation de la puissance électrique instantanée (en Watt) de l'aérogénérateur de marque INCLIN 1500 NEO, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

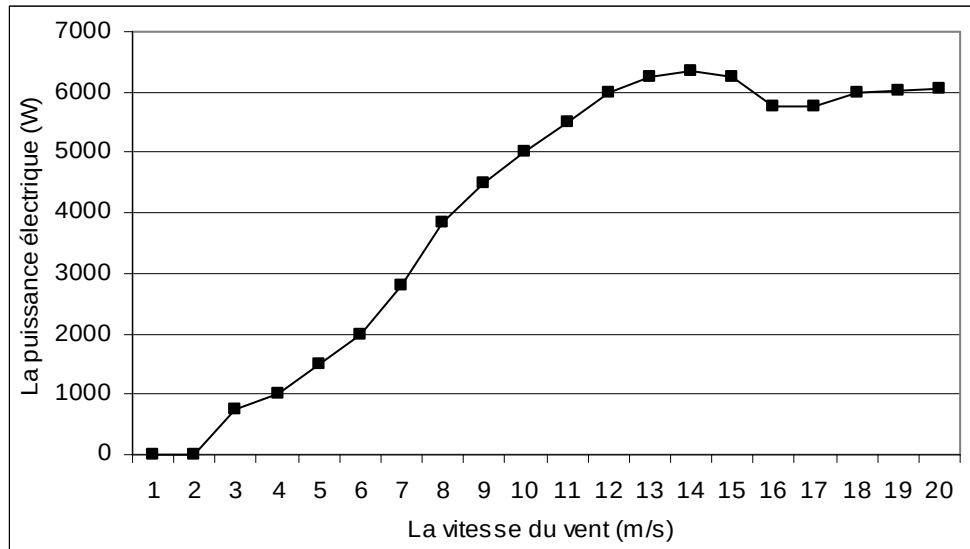


Fig. IV.4 : Variation de la puissance électrique instantanée (en watt) de l'aérogénérateur de marque INCLIN 6000 NEO, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

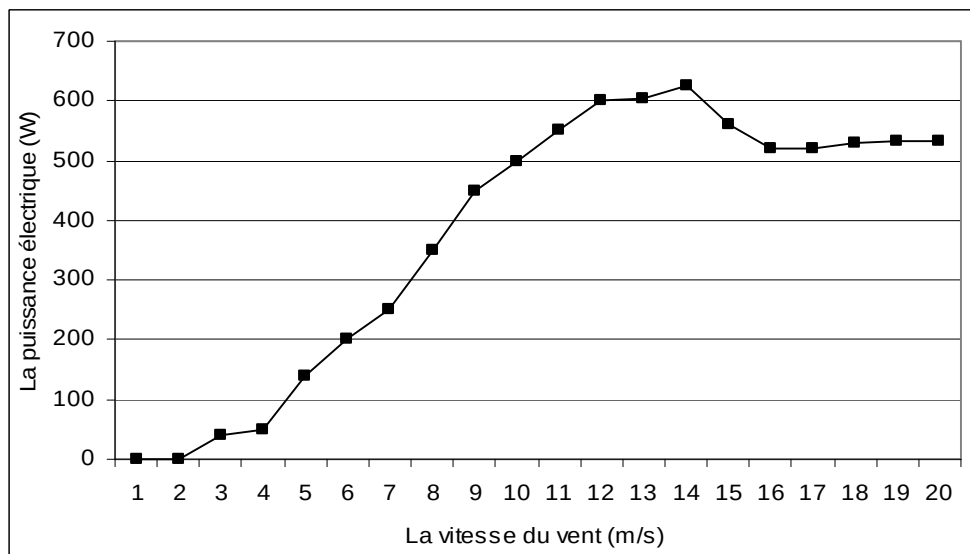


Fig. IV.5 : Variation de la puissance électrique instantanée (en watt) de l'aérogénérateur de marque INCLIN 600, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

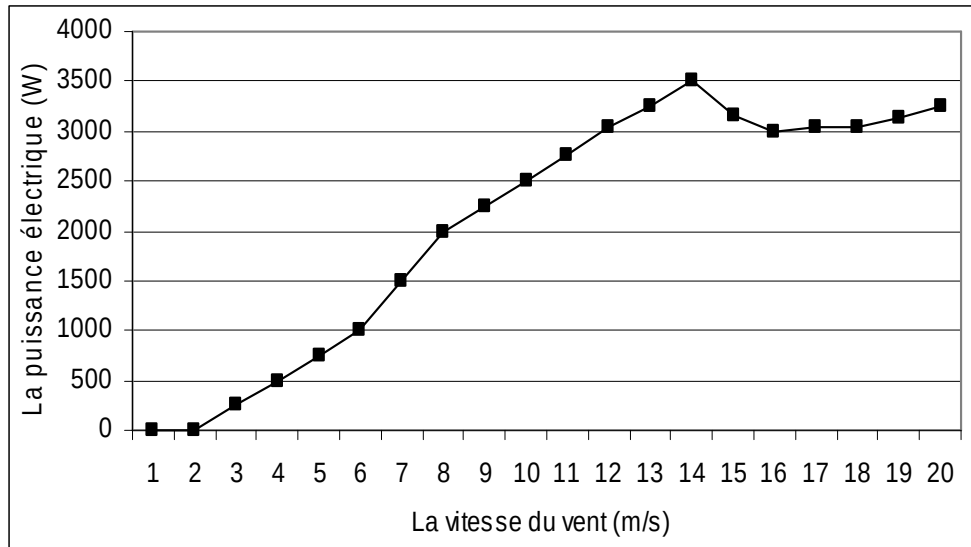


Fig. IV.6 : Variation de la puissance électrique instantanée (en watt) de l'aérogénérateur de marque INCLIN 3000 NEO, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

Les différentes caractéristiques des aérogénérateurs de marque INCLIN sont représentées dans le tableau suivant :

Types	250	600	1500 néo	3000 néo	6000 néo
Hélices	2	2	2	2	3
Diamètre	1,35 m.	2 m.	2,86 m.	4 m.	4 m.
Matériel	Nylon	-			
Paramètres du système électrique					
Type d'alternateur	le type d'aimant permanent				
Type d'aimant	Ferrite	Ferrite	-	-	-
Puissance nominale	250 w	600 w	1500 w	3000 w	6000 w
Voltage	12/24 v	12/24 v	24/48v	24/48v	48/300v
Paramètres de fonctionnement					
la vitesse de démarrage	3 m/s	3,5 m/s	3,5 m/s	3,5 m/s	3,5 m/s
la vitesse nominale	11 m/s	11 m/s	12 m/s	12,5 m/s	12,5 m/s
la vitesse d'arrêt	13 m/s	13 m/s	14 m/s	14 m/s	14 m/s
Poids	32Kg	38Kg.	42Kg	125Kg	150Kg

Tableau IV.1 : Caractéristiques des aérogénérateurs INCLIN.

IV.3.2.2 Aérogénérateur de marque FORTIS

- FORTIS ALIZE : Leurs caractéristiques ainsi que leur courbe de puissance sont présentées, comme suit :

- La puissance nominale : 10 kW.
- Le diamètre du rotor : 7 m/s.
- La vitesse de démarrage : 3,5 m/s.
- Nombre de pales : 3.
- La vitesse maximale : 25 m/s.
- La hauteur du mat: 18-36m.

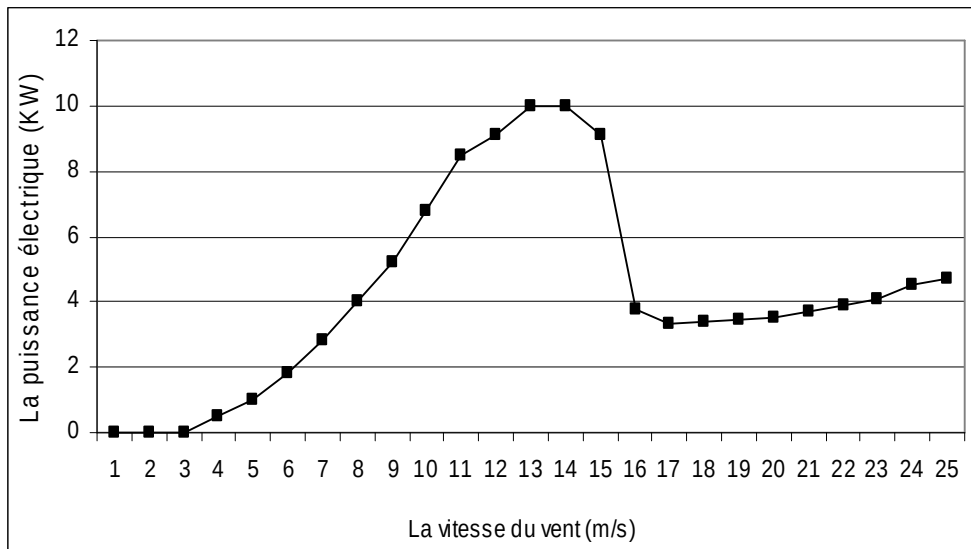


Fig. IV.7 : Variation de la puissance électrique instantanée (en kW) de l'aérogénérateur de marque FORTIS ALIZE, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

- FORTIS ESPADA : Leurs caractéristiques ainsi que leur courbe puissance sont présentées, comme suit :

- La puissance nominale : 800 W.
- Diamètre du rotor : 2.2 m.
- La vitesse de démarrage : 4,35 m/s.
- La hauteur du mat : 6-12m.
- La vitesse nominale : 17m/s.
- Nombre de pales : 3.

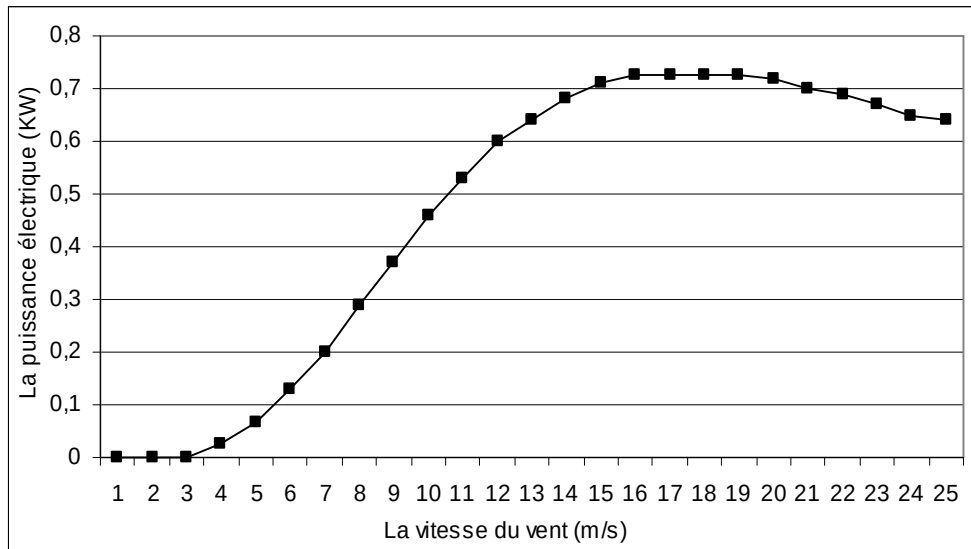


Fig. IV.8 : Variation de la puissance électrique instantanée (en kW) de l'aérogénérateur de marque FORTIS ESPADA, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

- FORTIS MONTANA : Leurs caractéristiques ainsi que leur courbe puissance sont présentées, comme suit :

- La puissance nominale : 5,8 kW.
- La vitesse du démarrage : 3,5 m/s.
- La vitesse nominale : 17 m/s.
- Poids : 200kg.
- Diamètre du rotor : 5,0m.
- La hauteur du mat : 12-24m.
- Nombre de pales : 3.

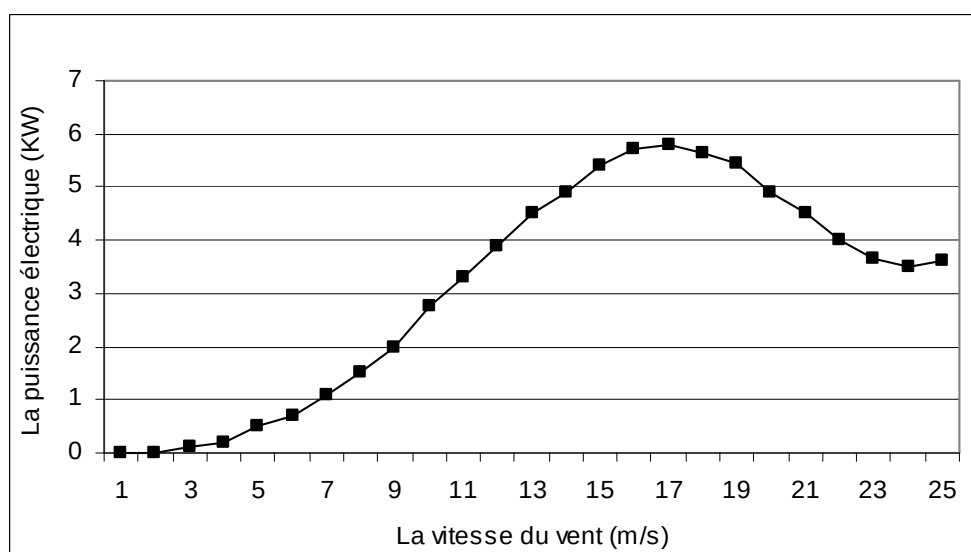


Fig. IV.9 : Variation de la puissance électrique instantanée (en kW) de l'aérogénérateur de marque FORTIS MONTANA, en fonction de la vitesse du vent (m/s)

IV.3.2.3 Aérogénérateur de marque VERGNET

- AEROGENERATEUR VERGNET GEV 5/5 :

Leurs caractéristiques ainsi que leur courbe puissance sont présentées, comme suit :

- Puissance nominale : 5 kW.
- Vitesse de démarrage : 4,5 m/s.
- Vitesse nominale : 15 m/s.
- Vitesse d'arrêt : 60 m/s.
- Diamètre du rotor : 5m.
- Nombre de pales : 2.

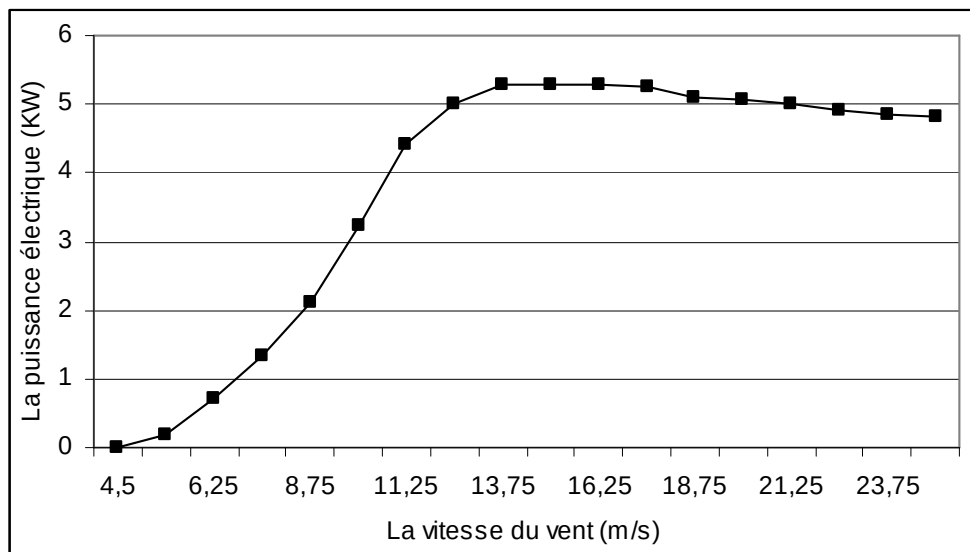


Fig. IV.10 : Variation de la puissance électrique instantanée (en kW) de l'aérogénérateur de marque VERGNET GEV 5/5, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

- AEROGENERATEUR VERGNET GEV 7/10 :

Leurs caractéristiques ainsi que leur courbe puissance sont présentés comme suit :

- Puissance nominale : 10kw.
- Vitesse de démarrage : 4m/s.
- Vitesse nominale : 12 m/s.
- Diamètre du rotor : 7m.
- Nombre de pales : 2.
- Vitesse maximale de service : 80 m/s.

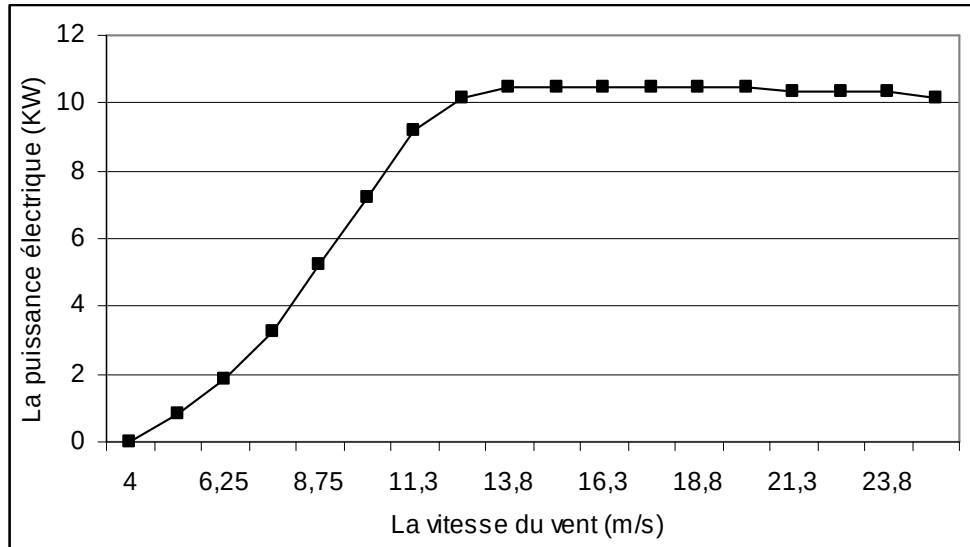


Fig. IV.11 : Variation de la puissance électrique instantanée (en kW) de l'aérogénérateur de marque VERGNET GEV 7/10, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

IV.3.2.4 Aérogénérateur de marque Bergey

- AEROGENERATEUR BERGEY 1kW

Leurs caractéristiques ainsi que leur courbe puissance sont présentées, comme suit :

- Puissance nominale : 1 kW à 10,5 m/s
- Diamètre du rotor : 1.25m.
- La vitesse de démarrage: 2,5 m/s.
- Nombre de pales : 3.
- La vitesse maximale : 54m/s.
- La hauteur du mat: 9-32m.

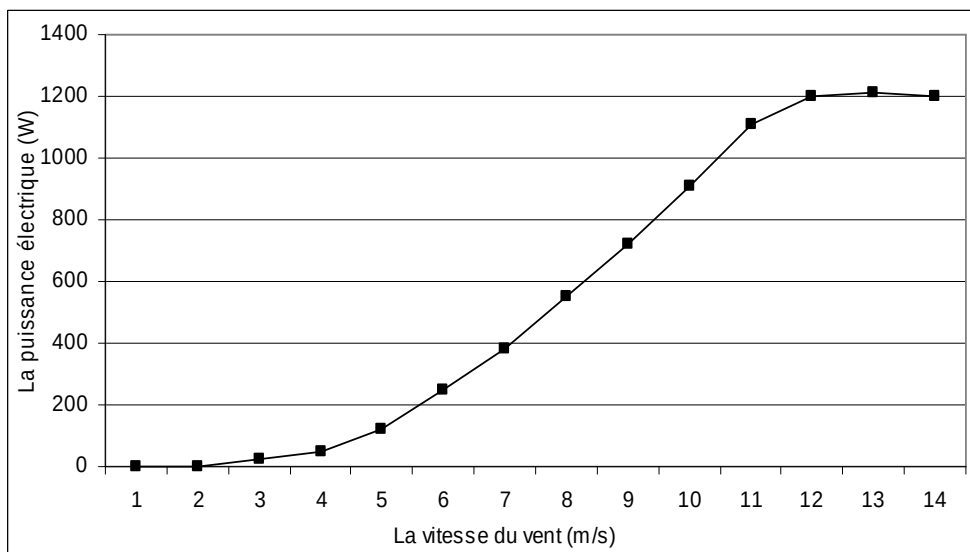


Fig. IV.12 : Puissance électrique instantanée (en W) de l'aérogénérateur de marque Bergey 1kW, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

- AEROGENERATEUR Bergey BWC 1000

Leurs caractéristiques ainsi que leur courbe puissance sont présentées, comme suit :

- Puissance nominale : 1 kW.
- Vitesse de début de freinage : 13 m/s.
- Vitesse de démarrage : 3 m/s.
- Nombre de pales : 3.
- Vitesse nominale : 11 m/s.
- Diamètre du rotor : 2,5m.
- Prix du rotor = 1890\$.

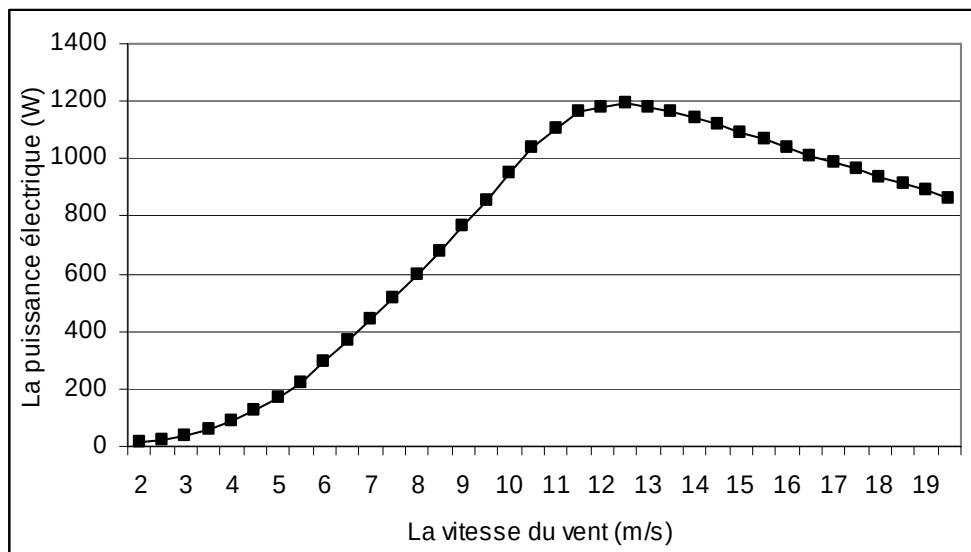


Fig. IV.13 : Puissance électrique instantanée (en W) de l'aérogénérateur de marque Bergey BWC 1000, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

- AEROGENERATEUR Bergey BWC EXCEL

Leurs caractéristiques ainsi que leur courbe puissance sont présentés comme suit :

- Puissance nominale : 7,5 KW.
- Vitesse d'arrêt : 54 m/s.
- Vitesse de démarrage : 3,5 m/s.
- Diamètre du rotor : 7m.
- Vitesse nominale : 14 m/s.
- Nombre de pales : 3
- Prix de rotor $\approx$ 20.000 \$

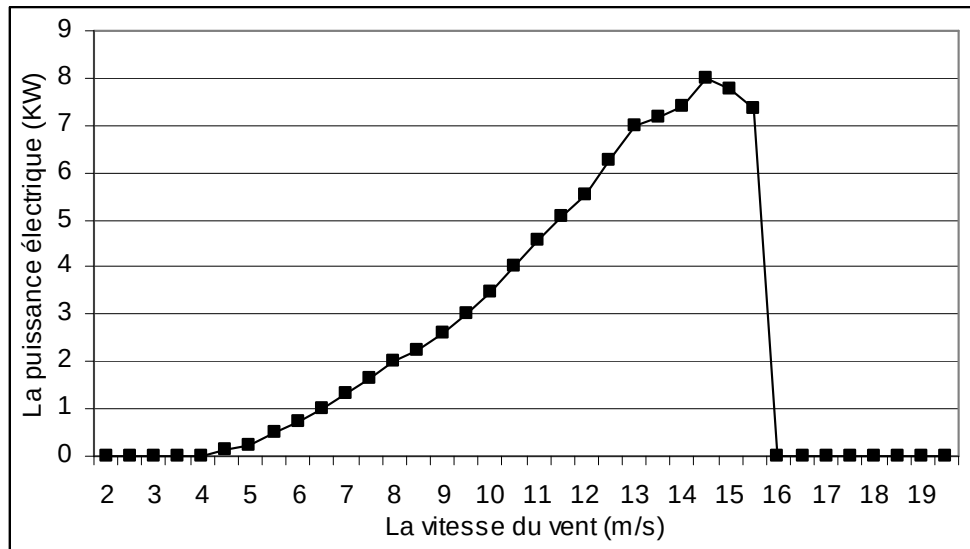


Fig. IV.14 : Puissance électrique instantanée (en kW) de l'aérogénérateur de marque Bergey BWC EXCEL, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

- AEROGENERATEUR Bergey Scirocco

Leurs caractéristiques ainsi que leur courbe puissance sont présentés comme suit :

- Puissance nominale : 6 kW à 11,5 m/s.
- Vitesse de démarrage : 2,7 m/s.
- Vitesse nominale : 11,5 m/s.
- Vitesse maximale : 60 m/s.
- Diamètre du rotor: 5,6m.
- Nombre de Pales : 2 pales.
- Poids nacelle/rotor : 202kg.
- La hauteur du mat : 18/24/30 m.

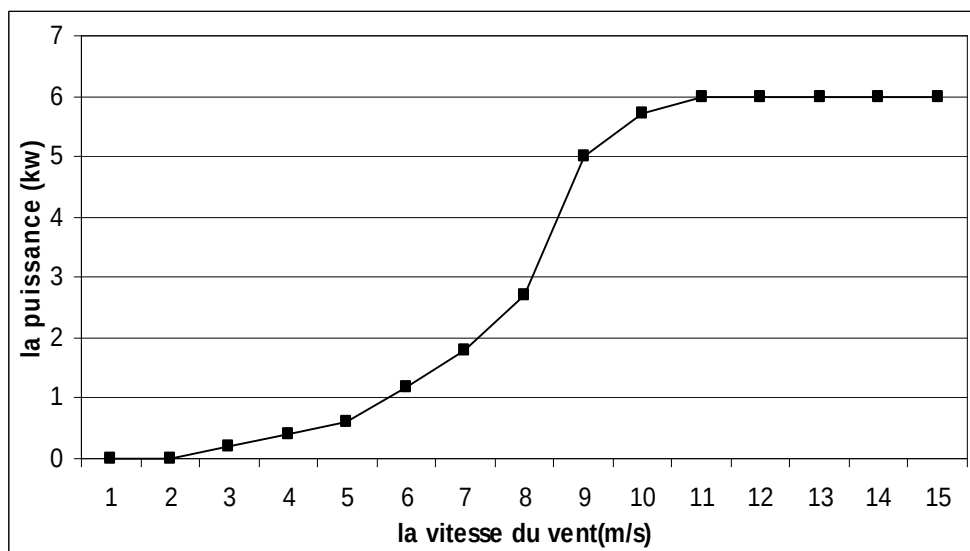


Fig. IV.15 : Puissance électrique instantanée (en kW) de l'aérogénérateur de marque Bergey Scirocco, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

IV.3.2.5 Aérogénérateur Southwest Windpower Whisper 175

Leurs caractéristiques ainsi que leur courbe puissance sont présentées, comme suit :

- Puissance nominale : 3 kW.
- Nombre de pales : 2.
- Vitesse de démarrage : 3,1m/s.
- Diamètre du rotor : 4,5m.
- Vitesse nominale : 10,5 m/s.
- Prix de rotor $\approx$ 5000 \$.

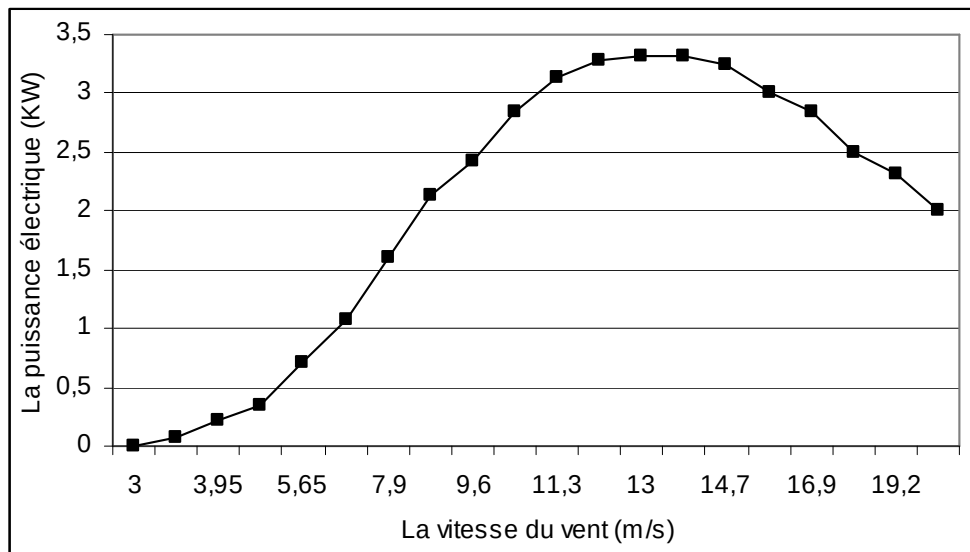


Fig. IV.16 : Puissance électrique instantanée (en kW) de l'aérogénérateur de marque Southwest Windpower Whisper 175, en fonction de la vitesse du vent (m/s).

IV.4. Le Visual Basic et l'interface graphique

Après avoir construit une base de données, on doit créer une interface graphique pour exploiter cette base de donnée, d'où on a opté à l'utilisation d'un langage de programmation VB (visual Basic) pour plusieurs raisons dont :

VB est un véritable langage orienté objet, il permet de créer des applications. Comme son nom l'indique, Visual Basic est un langage de développement axé sur la perception visuelle. Il est en parfaite harmonie avec Windows, robuste, indépendant des architectures matérielles, de haute performance. On peut noter, notamment, que :

- Il permet de stoker directement dans la base de données, des données existant déjà dans des fichiers, et, exige seulement la spécification de l'architecture des données à enregistrer.

- Il n'occupe pas un grand espace de RAM aussi élevée que possible pour travailler avec une vitesse exploitable.
- Il permet la création d'un exécutable pour notre application directement, à partir de la barre d'outil.

Chapitre V

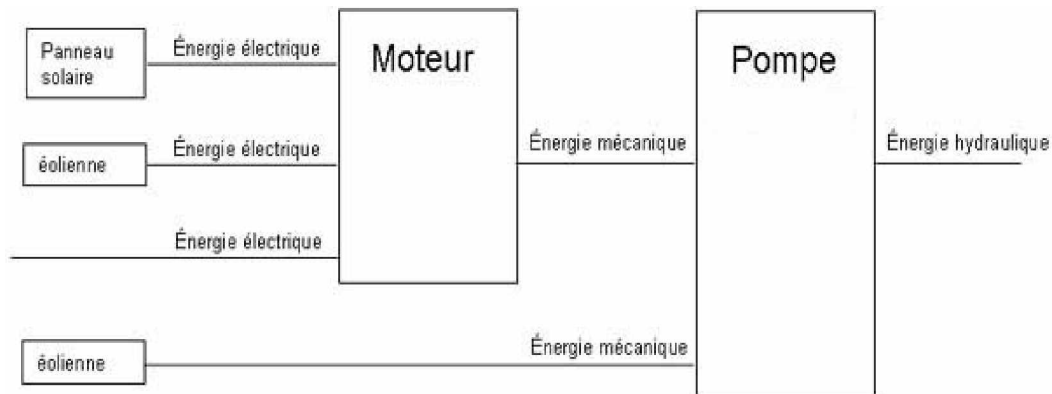
Optimisation d'un système de pompage par un aérogénérateur

Dans ce chapitre on va montrer les différents systèmes de pompage existants et en indiquant le choix d'une pompe parmi celles qui existent. Le critère de sélection repose sur le plus grand débit journalier pour un système de pompage dans un site donné.

V.1. Introduction

L'organe essentiel pour l'extraction de l'eau est la pompe. Selon la source d'énergie disponible (solaire, électrique, éolienne) et selon son utilisation (zone urbaine, zone rurale) l'architecture de la chaîne d'énergie et le choix des pompes sera différent.

La figure V.1 montre les différentes solutions qui permettent de disposer de l'énergie hydraulique.



FigV.1 : Domaine d'utilisation de différentes sources d'énergies.

Il existe deux grands domaines d'extraction de l'eau:

- Extraction d'eau potable en zone urbaine. Dans ce cas, l'eau extraite d'une source est ensuite traitée puis envoyée dans un réseau appelé réseau d'eau potable.
- Extraction d'eau pour un usage individuel, rural ou villageois (dans les pays en voie de développement). Les coûts de raccordement à un réseau urbain peuvent vite devenir élevés dès que l'on s'éloigne des villes. Différentes solutions technologiques sont alors utilisées pour extraire l'eau:

- § Eolienne de pompage,
- § Aérogénérateur + pompe immergée,
- § Pompage solaire (photovoltaïque),
- § Thermique,
- § Système de pompage diesel.

V.2. Les organes de transformation de l'énergie électrique en énergie hydraulique

V.2.1 La pompe

La pompe est l'organe de base d'un système d'extraction d'eau. La pompe peut être:

- § Centrifuge ou volumétrique,
- § Immergée ou en surface.

V.2.1.1 Les pompes centrifuges [21]

Les pompes centrifuges utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie mécanique d'un moteur est transmise au fluide. La vitesse donnée au fluide va donner de l'énergie cinétique à celui ci. Cette dernière est ensuite transformée en énergie de pression.

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont:

- § le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage. (particulièrement intéressant dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques car la pompe tourne même par très faible ensoleillement)
- § Système extrêmement simple pouvant être couplé directement sur une machine tournante comme un moteur électrique, essence, diesel, etc...
- § Equipe aussi bien les pompes immergées que les pompes de surface
- § Plusieurs étages (cage + roue à ailettes) peuvent être superposés pour obtenir de grandes pressions.

V.2.1.2 Les pompes volumétriques [21]

Les pompes volumétriques utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palette et à engrenage.

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- § Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes hauteurs ;
- § Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçantes ;

- § Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique $I = f(V)$ de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable. Pour palier au problème de surdimensionnement du générateur, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.

V.2.1.3 Les pompes de surface ou immergées

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

- Les pompes de surface : Une pompe à pistons placée en surface ne pourra pas relever l'eau au delà d'un maximum théorique qui est de 10,33 mètres. Au delà de cette hauteur, il faut s'orienter vers une solution de pompe immergée. Cependant, on peut utiliser des pompes centrifuges avec une pression absolue à l'aspiration inférieure à 1 MPa.

- Les pompes immergées : L'eau peut être extraite à plusieurs centaines de mètres. Les pompes centrifuges qui ont une forme adaptée aux puits et qui peuvent débiter à forte pression sont souvent utilisées.

V.2.2 Les moteurs

La pompe nécessite une énergie mécanique en entrée. Cette énergie mécanique est fournie dans la plupart des cas par un moteur. Les deux types de moteurs disponibles sont les moteurs à courant continu et les moteurs asynchrones. Quelques avantages et inconvénients de ces derniers sont donnés dans le tableau V.1 :

	Moteurs à courant continu	Moteur asynchrone
Avantages	- Facilité de régulation (variation de vitesse, couple,...). - Rendement de 90%.	- Fiabilité ; nécessite peu d'entretien. - Rendement de 90%.
Inconvénients	- Coût d'entretien élevé.	- Difficulté et coût de régulation (nécessite la réalisation de commandes vectorielles).

Tableau V.1 : les avantages et les inconvénients des moteurs à courant continu et les moteurs asynchrone.

Le meilleur compromis pour actionner une pompe immergée est le moteur asynchrone, car les sources d'énergie disponibles sur les sites d'extraction d'eau sont différentes. Ceci induit plusieurs modes de fonctionnement du moteur asynchrone. Il fonctionne sur une source de tension alternative en monophasé, diphasé ou en triphasé. Si la source d'énergie est continue, un onduleur est utilisé pour transformer le signal en alternatif.

V.3. Eoliennes de pompage et aérogénérateur

Les deux technologies utilisées pour le pompage de l'eau sont l'éolienne de pompage mécanique et l'éolienne de pompage électrique. Ces deux types sont utilisés principalement dans des applications rurales ou agricoles.

V.3.1 Éoliennes de pompages mécaniques

L'éolienne de pompage mécanique traditionnelle appelée aussi éolienne multi-pale utilise un système bielle-manivelle monté sur l'arbre du rotor. Elle possède plusieurs pales montées sur un rotor qui tourne relativement lentement. Le système bielle-manivelle transforme le mouvement circulaire de la bielle en un mouvement rectiligne alternatif qui commande la pompe à piston installée dans un puits ou un étang, à la base de l'éolienne. Le mouvement alternatif du piston de la pompe assure le pompage de l'eau. Les éoliennes de pompage mécaniques ont leurs avantages et leurs inconvénients. Elles sont généralement fiables, d'un entretien facile (elles ne nécessitent aucun accessoires) et d'un coût abordable. Mais leurs applications sont limitées parce qu'elles doivent être installées directement au-dessus du puits ou de l'étang, même si l'eau doit être utilisée à une certaine distance de ce puits.

V.3.2 Système éolien électrique

Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique ne doit pas se trouver près de la source d'approvisionnement en eau. Le système éolien électrique commande une pompe électrique, qui aspire l'eau de la source et la refoule à l'endroit de son utilisation (un étang ou un système d'irrigation...). La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électriques ne nécessitent pas d'accessoires compliqués, car elles ne comportent pas de batteries. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie comme il est illustré dans la figure V.2

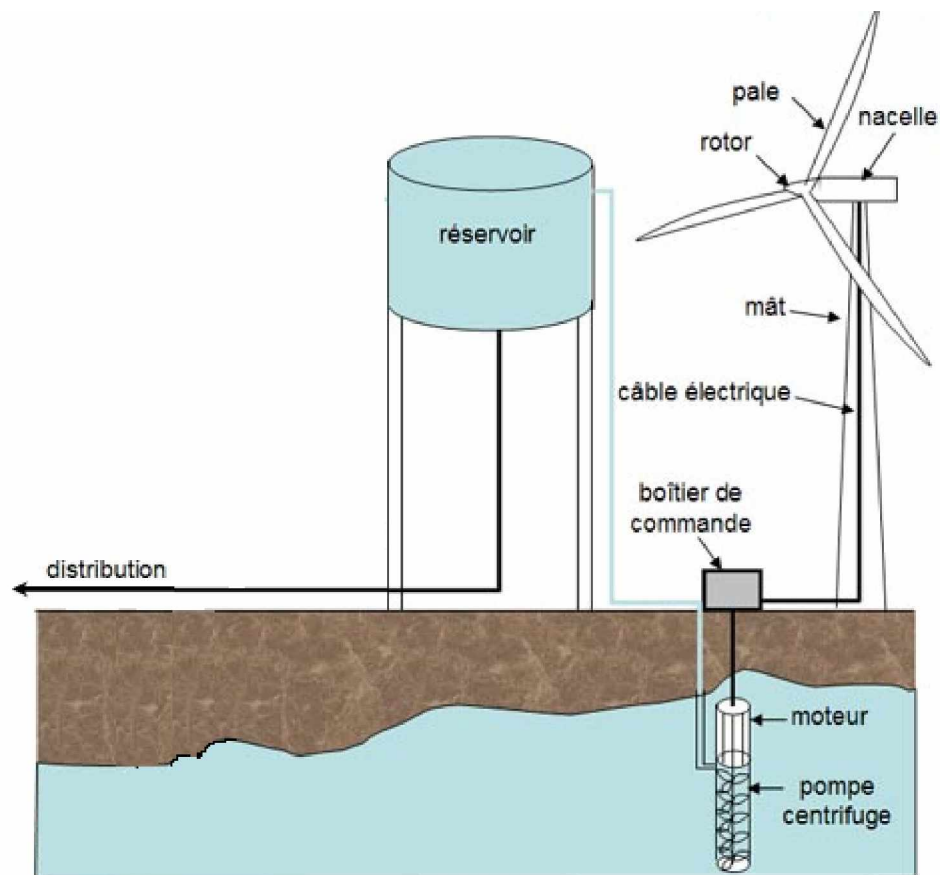


Figure V.2 : le système électrique de pompage.

L'aérogénérateur est utilisé pour produire l'électricité nécessaire au fonctionnement du moteur couplé à la pompe. L'énergie électrique produite peut alors être utilisée pour :

- § faire fonctionner un moteur,
- § charger des batteries,
- § débiter sur le réseau électrique.

Plusieurs systèmes de pompage éolien électrique existent, mais le plus courant est, celui dont la configuration est représentée sur la figure V.3 [22]. Comme le montre cette figure un rotor éolien à deux ou trois pâles et il est couplé à une génératrice à aimant permanent. Cette dernière alimente directement un moteur à induction triphasé qui entraîne une pompe, de surface ou submersible.

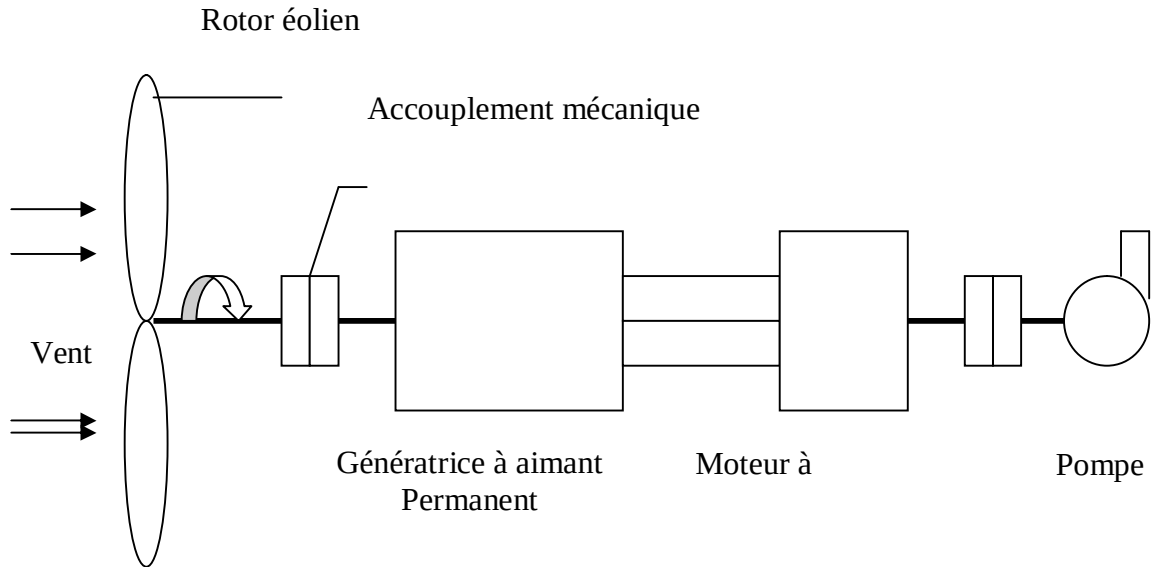


Fig. V.3 : Schéma d'un aérogénérateur à aimant permanent alimentant une pompe.

Les éléments constituant tous système de pompage doivent passés par une étude d'adaptation sur leurs performances afin d'obtenir un bon rendement. Dans ce qui suit on fait l'étude d'adaptation des pompes pour un système de pompage donné implantées dans quatorze sites.

Dans notre étude on a utilisé une approche d'évaluation du débit sans passer par le calcul de la puissance fournie par l'aérogénérateur, cette approche est donnée par la relation (V.1) :

$$Q = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} q(v) f(v) dv \quad (V.1)$$

Où : $q(v)$ est la courbe de débit caractérisant chaque pompe. Elle est donnée pour chaque hauteur nanométrique.

$f(v)$ est la probabilité de distribution des vitesses du vent qui dépend des paramètres météorologiques du site. En énergie éolienne, cette fonction est souvent représentée par la distribution de Weibull (III.1).

L'inconvénient de cette procédure est la nécessité d'avoir les courbes $q(v)$, qui expriment la variation du débit de la pompe à utiliser en fonction de la vitesse du vent, comme données d'entrées.

Un débit est la quantité d'eau recueillie à la sortie de la pompe en un temps donné. Cette quantité s'exprime en mètres cubes/heure (m^3/h) ou en litres/minute (l/mn).

Le schéma d'installation de la pompe est donné par la figure (V.4) :

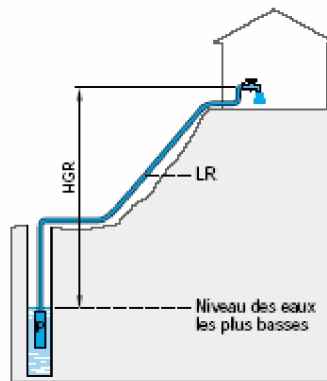


Fig. V.4 : schéma d'installation des pompes immergées.

HGR : Hauteur Géométrique de refoulement. Elle représente la différence de niveau entre l'axe de la pompe et le point le plus élevé de la distribution.

V.4. Calcul de la hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe

Pour véhiculer un liquide d'un endroit à un autre, la pompe doit fournir une certaine pression appelée hauteur manométrique totale, cela dépend des conditions d'aspiration et de refoulement. D'où la hauteur manométrique est la différence de pression entre deux points A et B elle est donnée par :

Hauteur manométrique : $H = P_B - P_A$ en mètres de colonne d'eau (m.c.e.).

Dans la pratique on considèrera : 1 bar = 10 m.c.e.

Hauteur manométrique totale :

$$HMT = HGA + HGR + PA + PR + P \quad (V.3)$$

Où :

- HGA : Hauteur géométrique d'aspiration.

- HGR : Hauteur géométrique de refoulement.
- PA et PR : pertes de charge, sont souvent exprimées en mètres de colonne de fluide
- P : Pression utile au niveau de l'aspersion.

Pour le calcul de la hauteur manométrique, toutes les valeurs doivent être exprimées en mètre. Pour ce faire, on utilise la conversion tel que : 1 bar = 10 mètres de colonne d'eau.

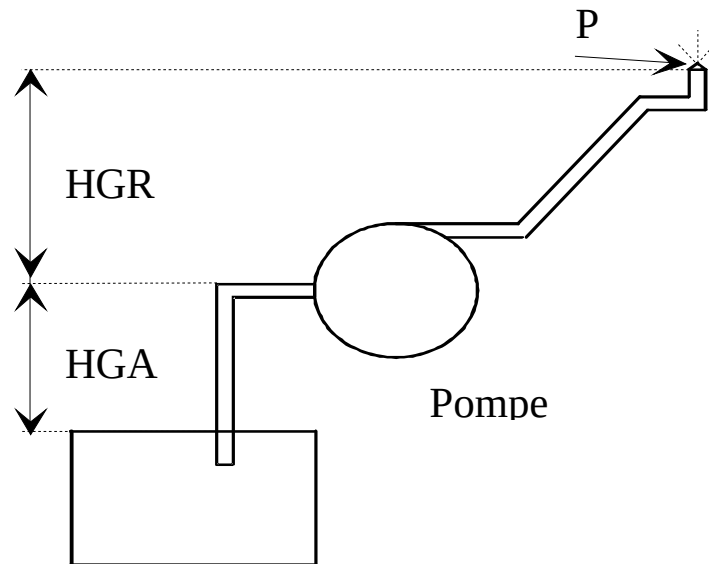


Figure V.5 : les différentes pressions d'une pompe.

V.5. Application

Les principales caractéristiques de l'aérogénérateur utilisé dans les calculs du présent travail sont résumées dans le tableau V.2 [22]:

Constructeur	Puissance nominale	Diamètre du rotor	Nombre de pôle	Vitesse	Vitesse de rotation du rotor	Générateur
Bergey (USA)	1500 Watts	3,05 m	3	V _{in} = 3,6 m/s V _{nom} = 10m/s V _{out} = 20m/s	100 à 500 tr/min	A aimant permanent délivrant du C.A. 3φ

Tableau V.2 : principales caractéristiques de l'aérogénérateur Bergey 1500.

Les figures (V.6) à (V.9) représentent la variation du débit en fonction de la vitesse du vent que fournirait cet aérogénérateur couplé avec une pompe de 7, 10, 15 et 19 étages respectivement. Ces pompes sont des pompes multicellulaires immergées da marque Grundfos.

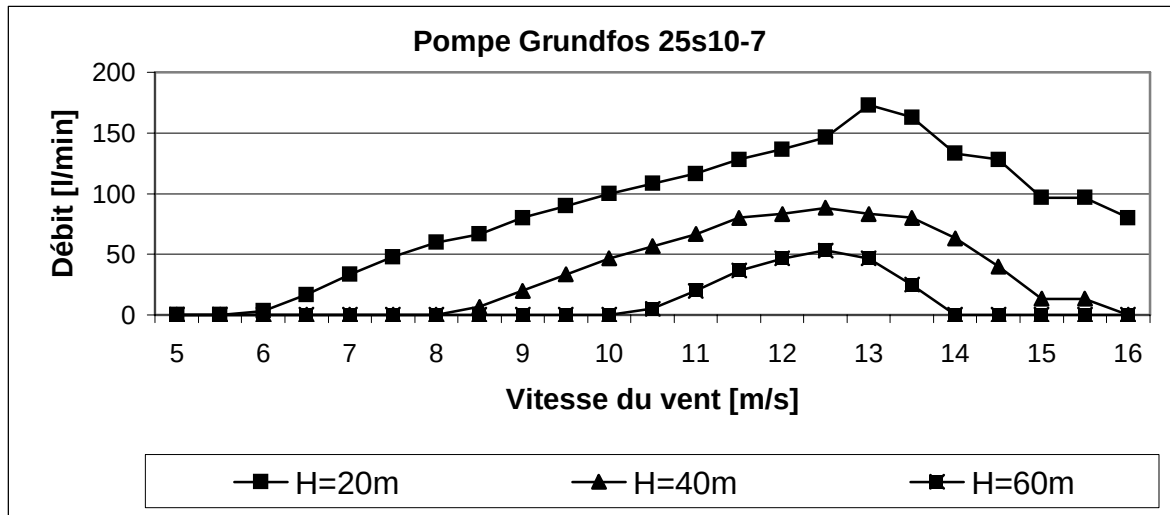


Fig.V.6: caractéristiques d'une pompe de 7 étages couplée à un aérogénérateur Bergey 1500.

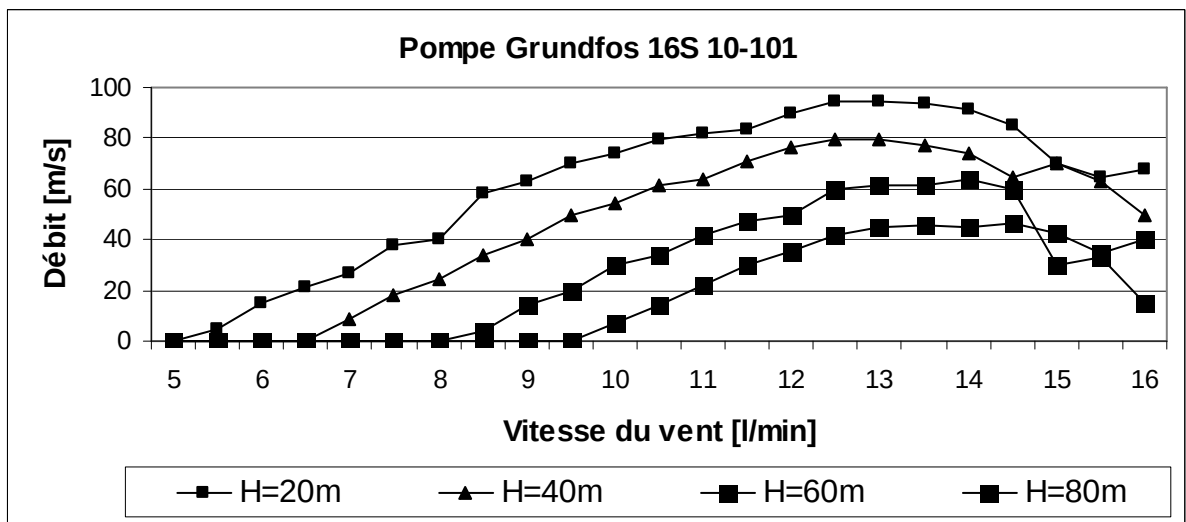


Fig.V.7 : caractéristiques d'une pompe de 10 étages couplée à un aérogénérateur Bergey 1500.

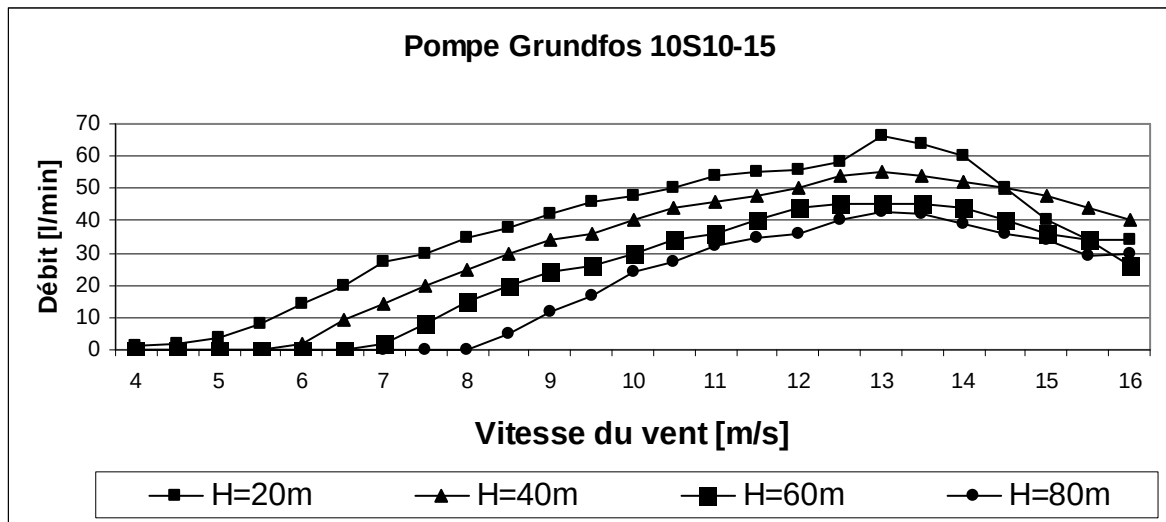


Fig.V.8 : caractéristiques d'une pompe de 15 étages couplée à un aérogénérateur Bergey 1500.

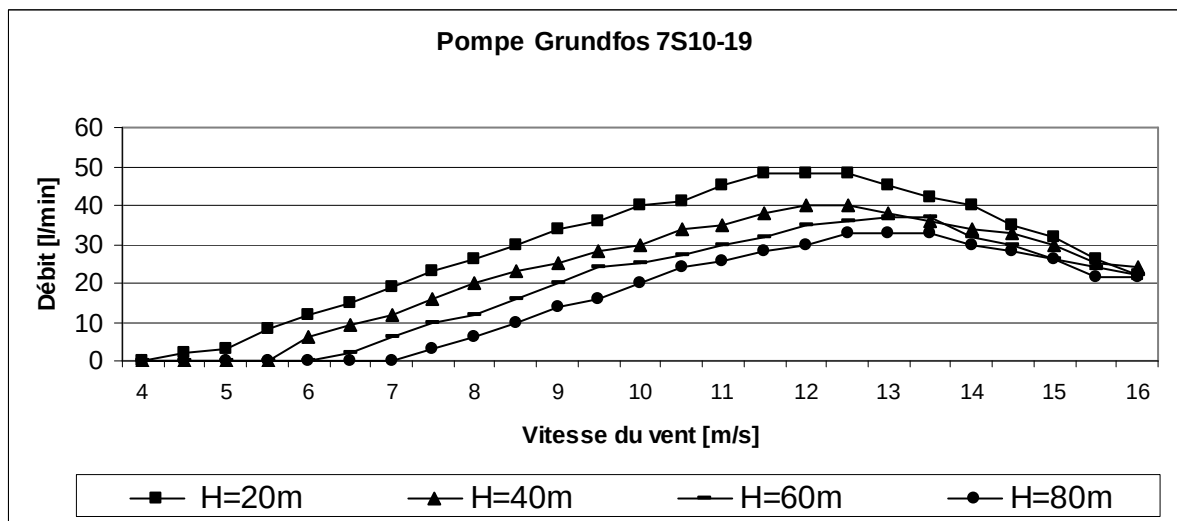


Fig.V.9 : caractéristiques d'une pompe de 19 étages couplée à un aérogénérateur Bergey 1500.

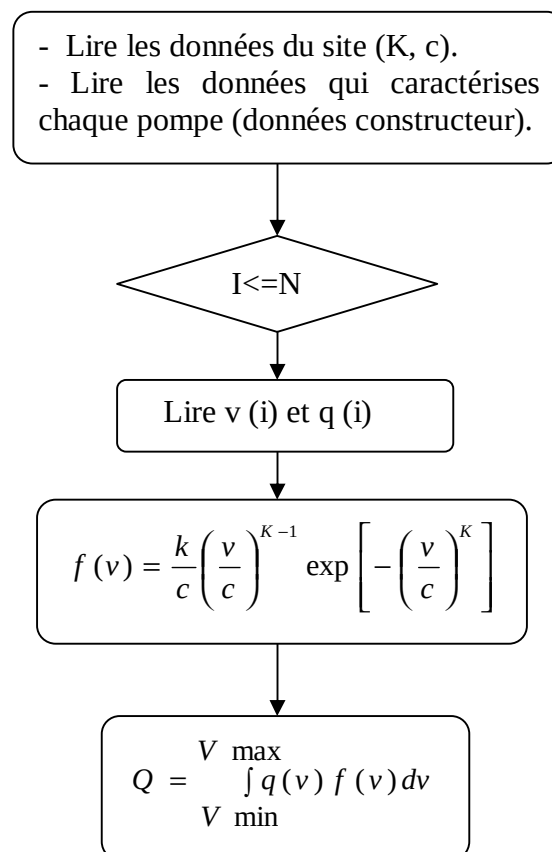
Les figures (V.6), (V.7), (V.8) et (V.9) sont données à partir d'expériences effectuées par le constructeur pour les mêmes vitesses du vent et utilisant le même aérogénérateur à une hauteur manométrique bien précise. Cette étude fait varier le type de la pompe utilisée pour pouvoir extraire pour chaque pompe la courbe de débit [22].

V.6. Estimation du débit pour différentes régions

Notre étude a portée sur 14 sites situés dans l'Algérie. Pour chacun de ces sites nous avons le débit à différentes hauteurs. Sur les figures (V.10-V.33) nous avons illustré seulement les résultats de six sites : BECHAR, TINDOUF, DJELFA, GUELMA, TOUGOURT et M'SILA.

Les différents paramètres météorologiques utilisés dans la présente étude sont extraits de l'Atlas vent de l'Algérie pour les régions de AIN-SEFRA, IN-SALAH, DJANET, IN-AMENAS, TINDOUF, BECHAR, EL-OUED, TOUGOURT, DJELFA, SIDI BELABBES, TAMANRASSET, M'SILA et GUELMA [14]. La variation mensuelle et annuelle de la vitesse du vent, du facteur de forme et du facteur d'échelle sont représentés en Annexe A.

Pour déterminer le débit journalier pour chaque pompe dans un site donné on a déroulé le programme dont l'organigramme est le suivant :



Tel que :

$q(i)$ et $v(i)$: les coordonnées de la courbe de débit donnée par le constructeur.

N : le nombre des coordonnées.

Q : le débit journalier de la pompe dans un site donné.

Les figures (V.10 - V.33) représentent le débit journalier que peut fournir un système de pompage par aérogénérateur de 1500 Watts au niveau de nos 6 régions d'étude. Des pompes de 7, 10, 15 et 19 étages ont été utilisées avec ce système de pompage éolien à différentes hauteurs manométriques : 20 m, 40 m, 60 m et 80 m.

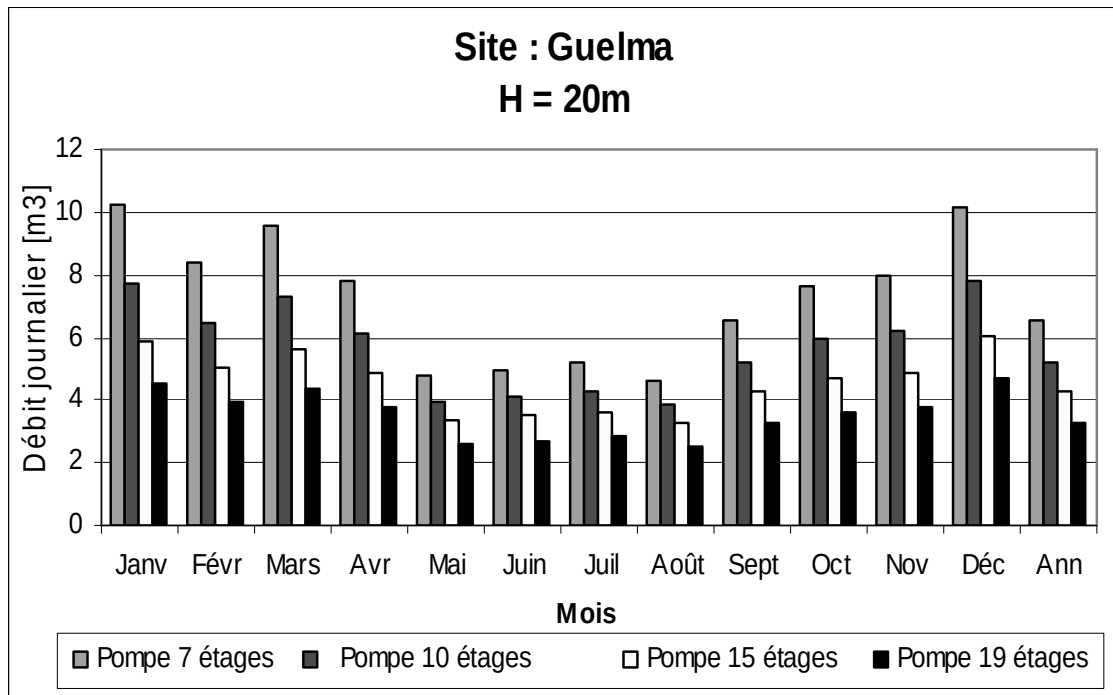


Fig.V.10 : Estimation du débit pour H=20m.

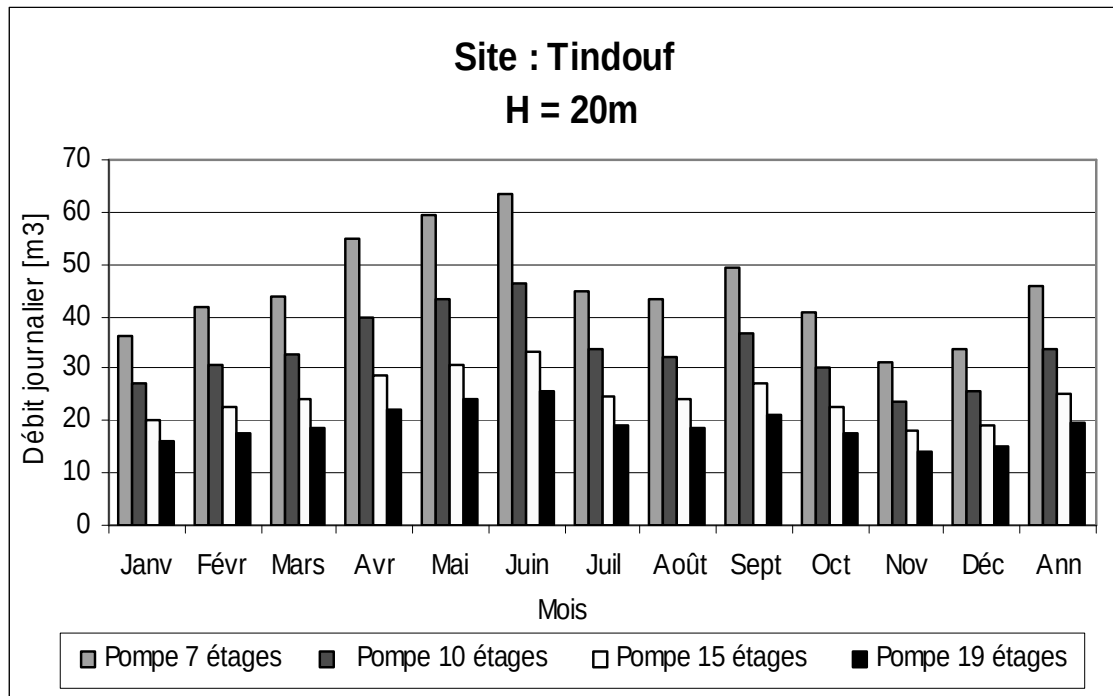


Fig.V.11 : Estimation du débit pour H=20m.

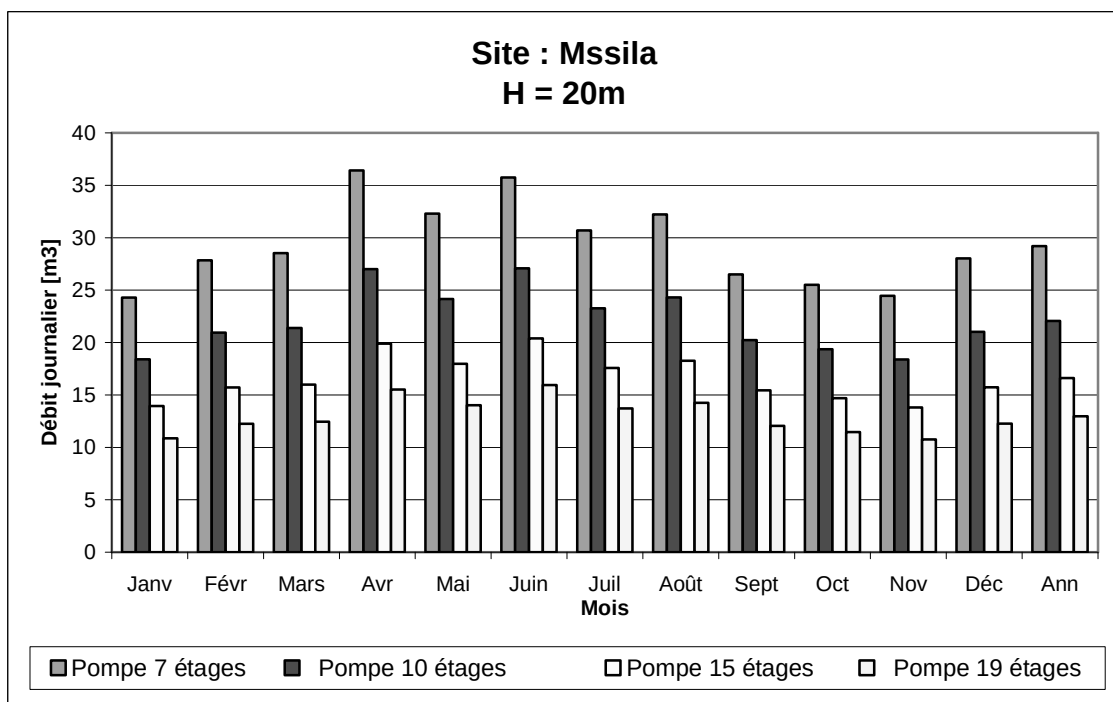


Fig.V.12 : Estimation du débit pour H=20m.

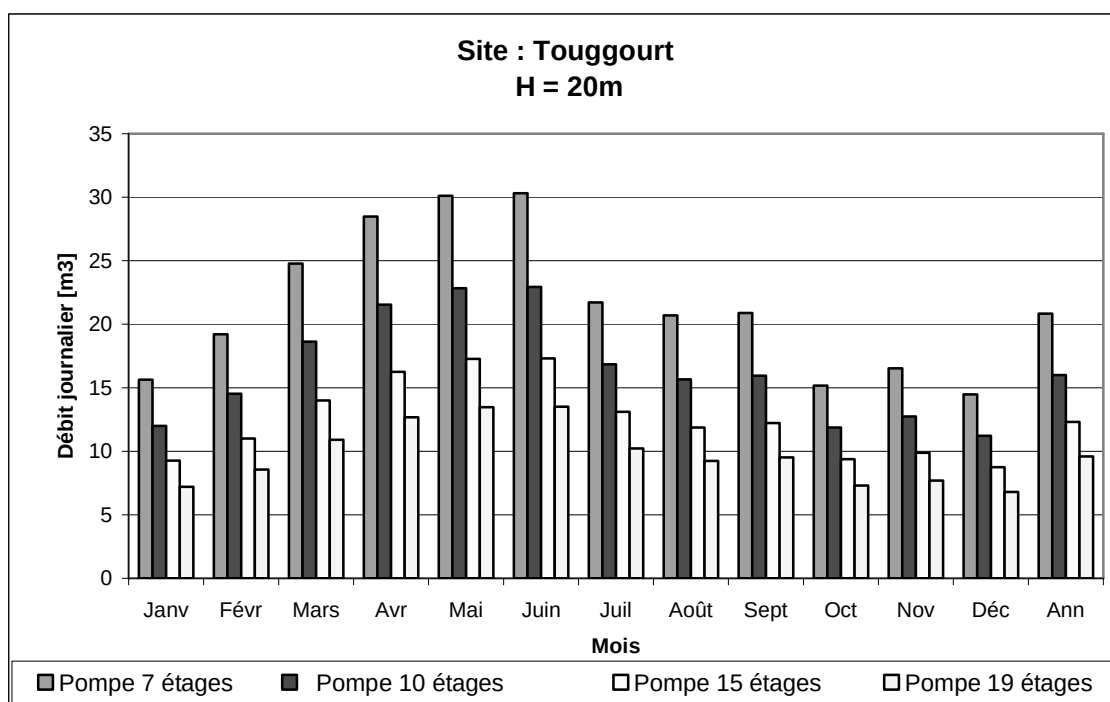


Fig.V.13 : Estimation du débit pour H=20m.

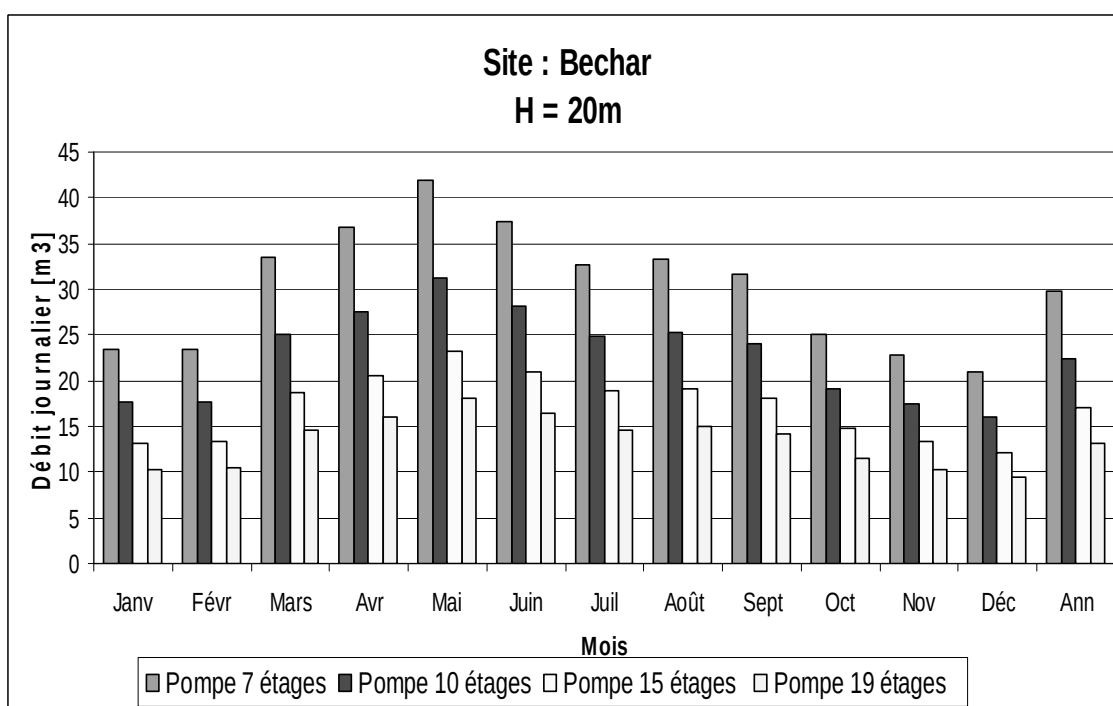


Fig.V.14 : Estimation du débit pour H=20m.

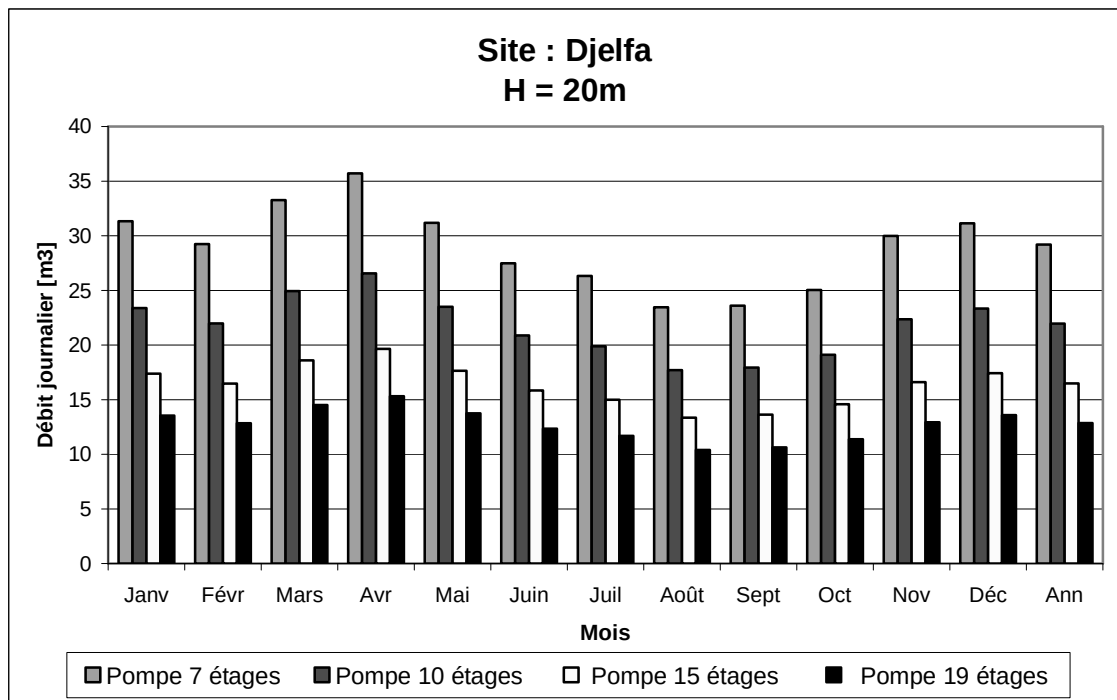
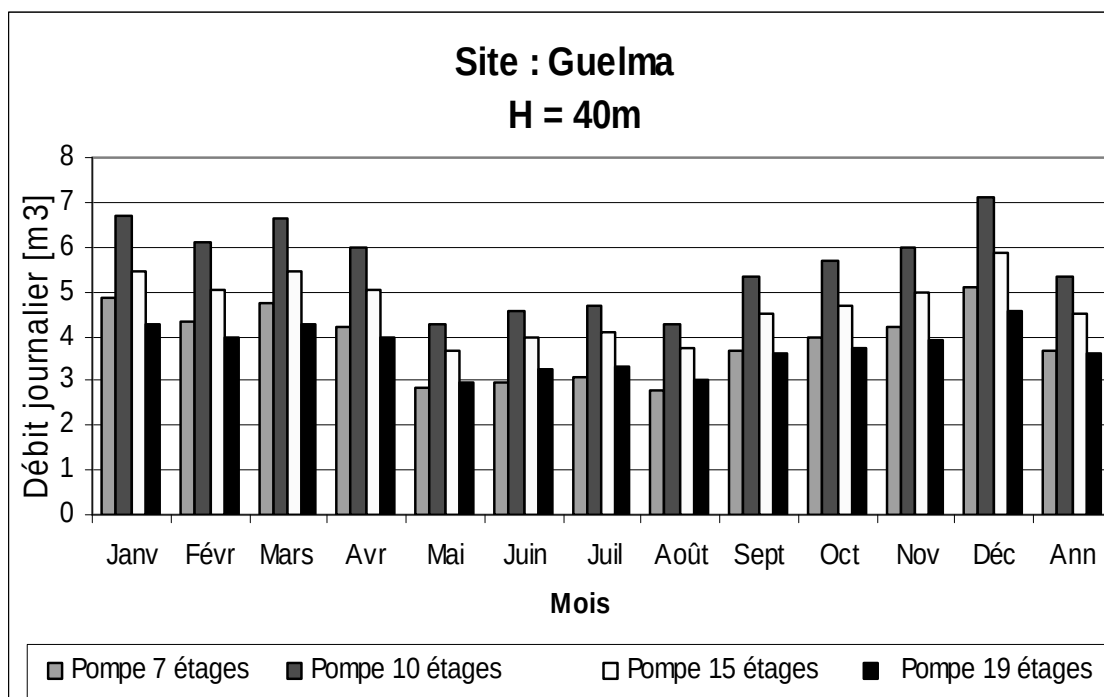
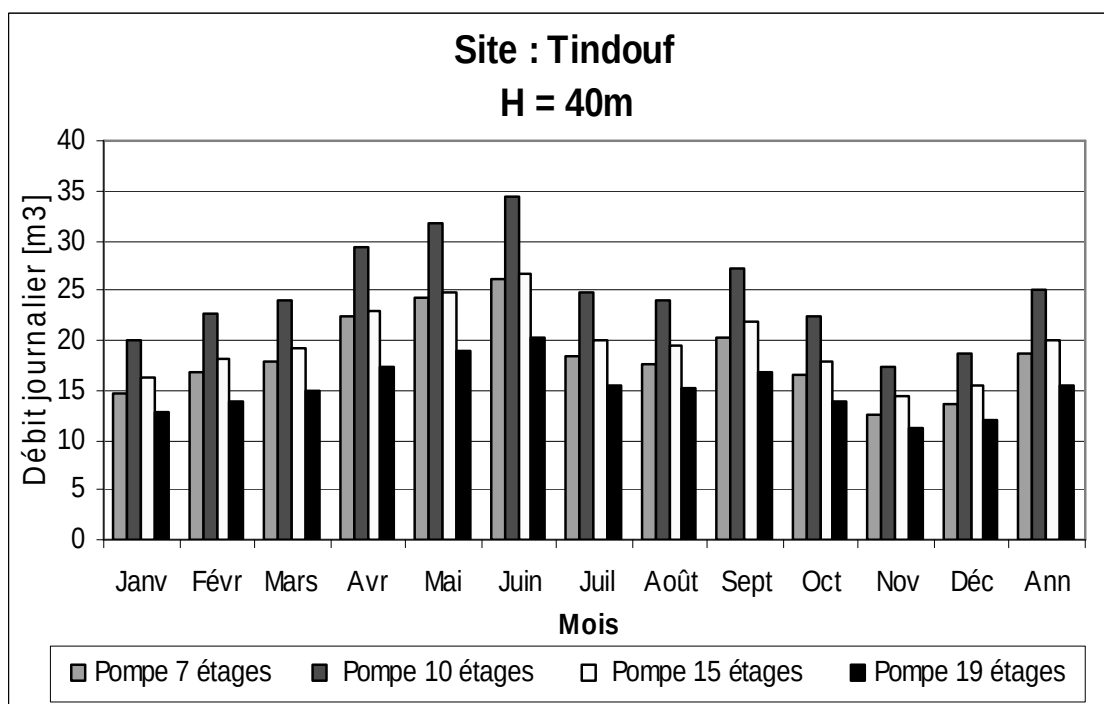


Fig.V.15: Estimation du débit pour H=20m.

Les quantités d'eau journalières pompées pour une hauteur manométrique de 20 m sont représentées sur les figures (V.10- V.15). On remarque que le débit atteint plus de 60 m^3 par jour durant les mois les plus ventés pour la région de Tindouf alors qu'il ne dépasse même pas 11 m^3 dans la région de Guelma et pour les autres site en trouve qui atteint 40 m^3 pour BECHAR, 35 m^3 pour MSILA et DJELFA. On notera aussi que la pompe à 7 étages est celle qui fournit le plus grand débit et cela pour tous les mois de l'année et pour les toutes les régions. La différence entre le débit obtenu par la pompe à 7 étages et les autres pompes possédant un nombre d'étage plus important, excède parfois le double. Ainsi on remarque le débit journalier délivré par les pompes possédants des étage plus de 7 vas progressivement avec l'augmentation de nombre d'étages où la pompe de 15 pour tous les mois et au différents sites.

**FigV.16:** Estimation du débit pour H= 40m.**Fig.V.17:** Estimation du débit pour H= 40m.

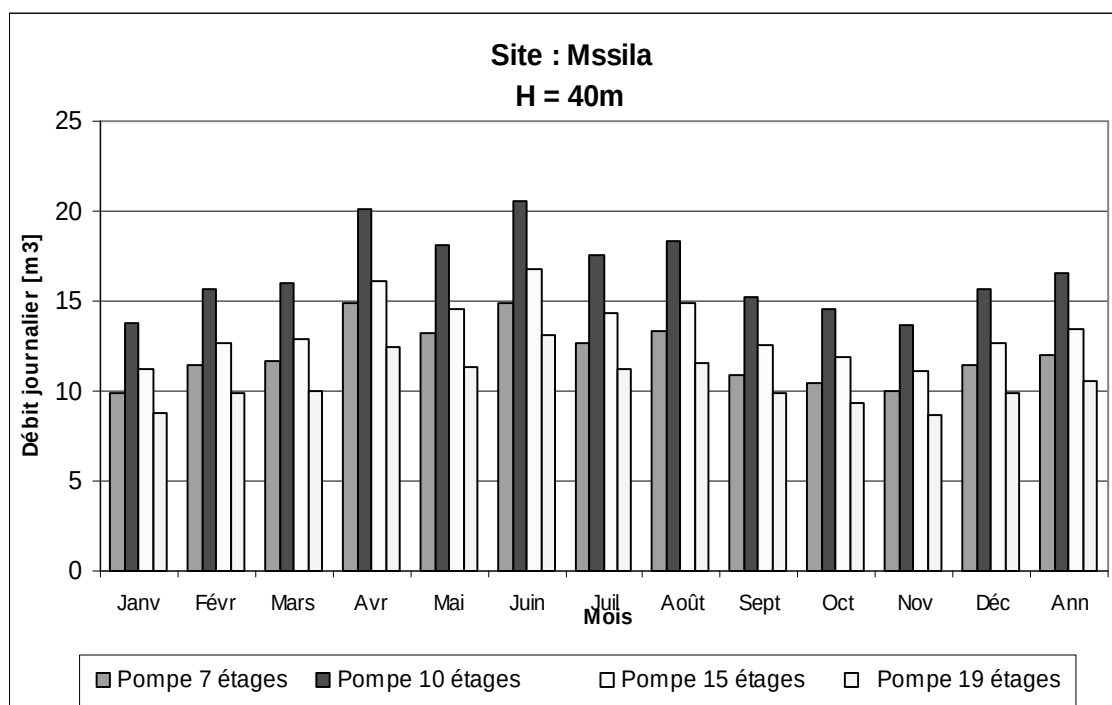


Fig.V.18: Estimation du débit pour H= 40m.

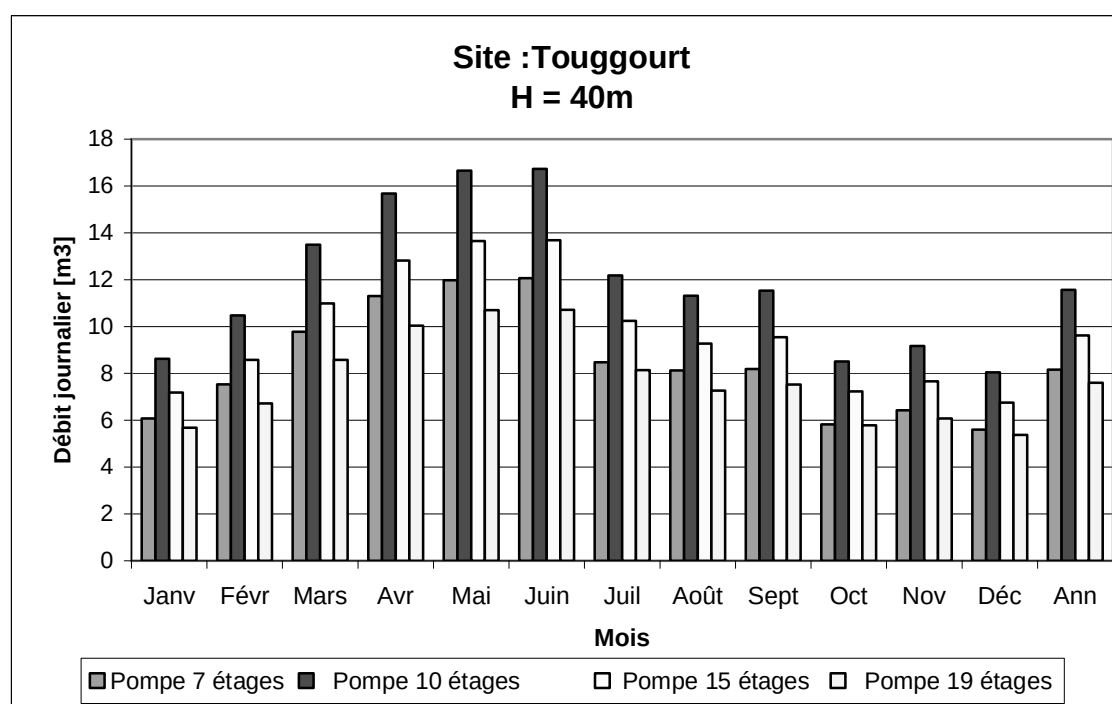


Fig.V.19 : Estimation du débit pour H= 40m.

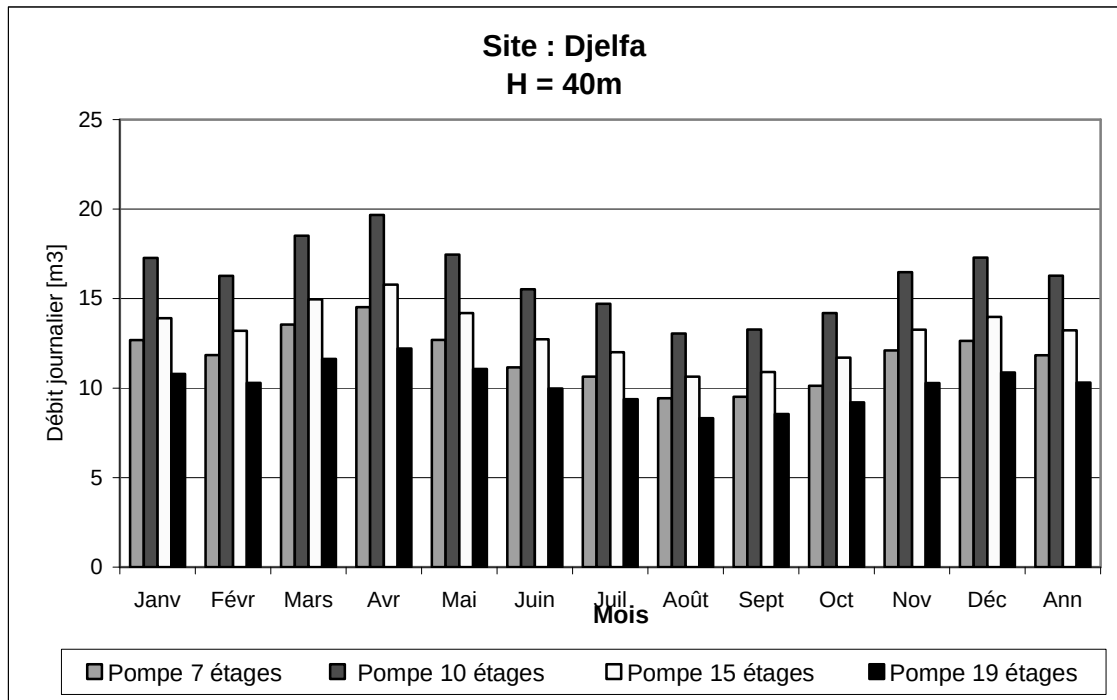


Fig.V.20 : Estimation du débit pour H= 40m.

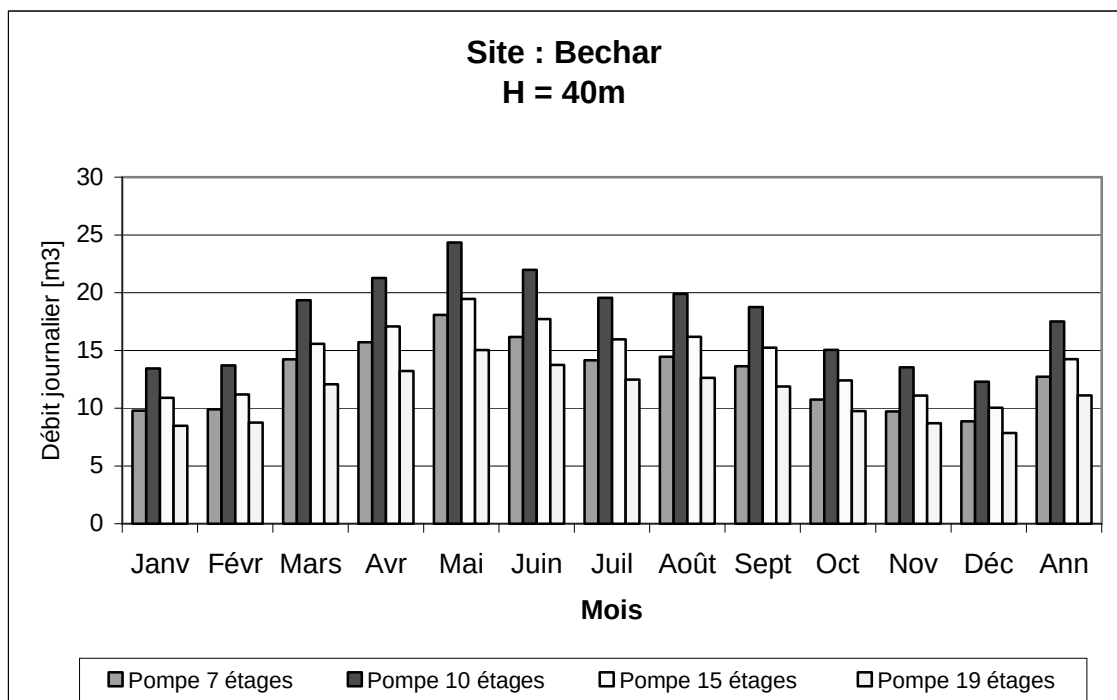


Fig.V.21 : Estimation du débit pour H= 40m.

D'après les figures (V.16 – V.21) on remarque que le débit journalier pour une hauteur manométrique de 40m les quantités d'eau pompées ont diminué presque de moitié par rapport à

la hauteur précédente ($H = 20\text{m}$). Par ailleurs, pour la pompe de 10 étages, qui est la pompe la plus performante pour $H = 40\text{m}$, le débit maximal atteint pour certains mois est de $33\text{ m}^3/\text{jour}$ pour la région de Tindouf et de 7 m^3 pour la région de Guelma ainsi qu'il dépasse $20\text{ m}^3/\text{jour}$ pour M'SILA, $16\text{ m}^3/\text{jour}$ pour TOUGOURT, $24\text{ m}^3/\text{jour}$ pour BECHAR et $20\text{ m}^3/\text{jour}$ pour DJELFA.

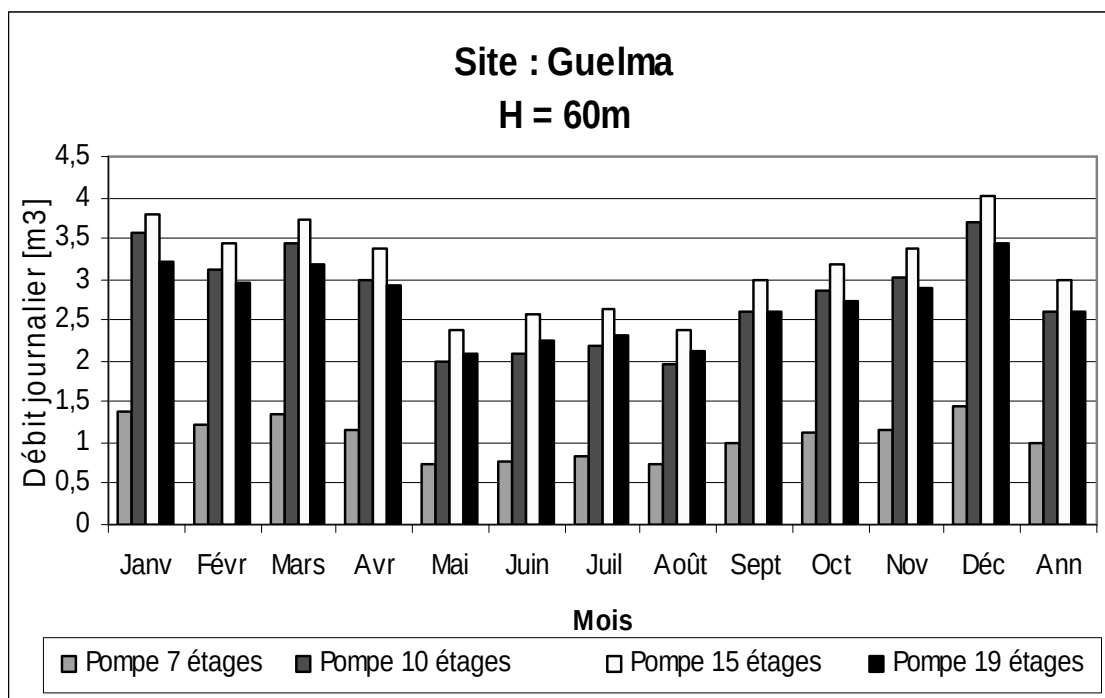


Fig.V.22 : Estimation du débit pour $H= 60\text{m}$.

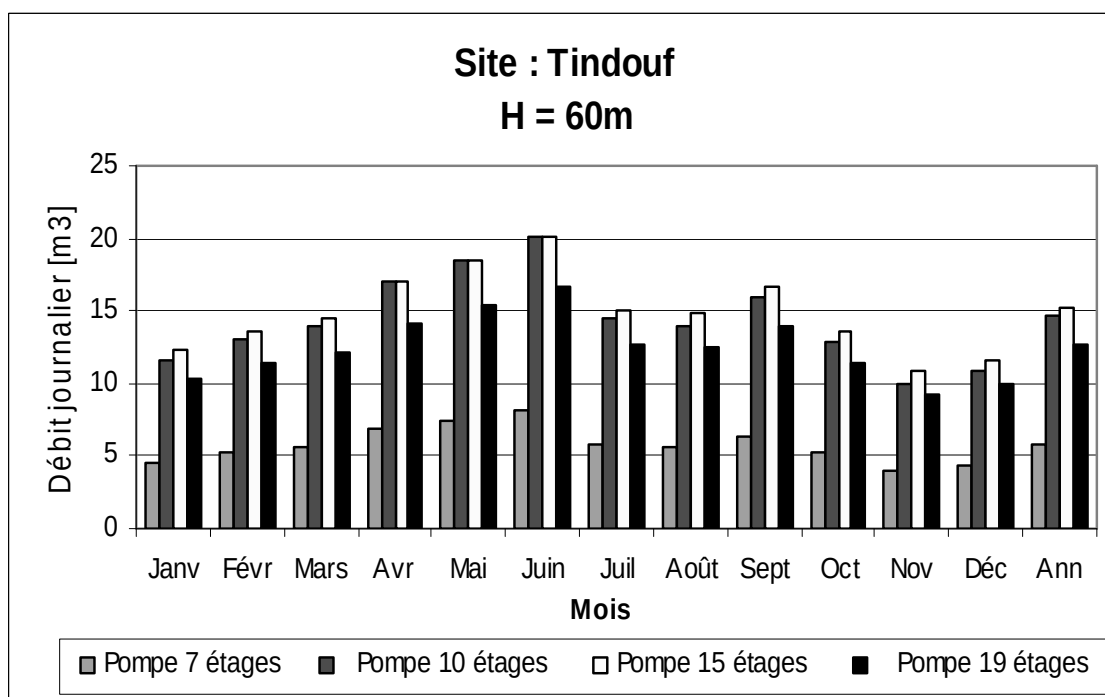


Fig.V.23 : Estimation du débit pour $H= 60\text{m}$.

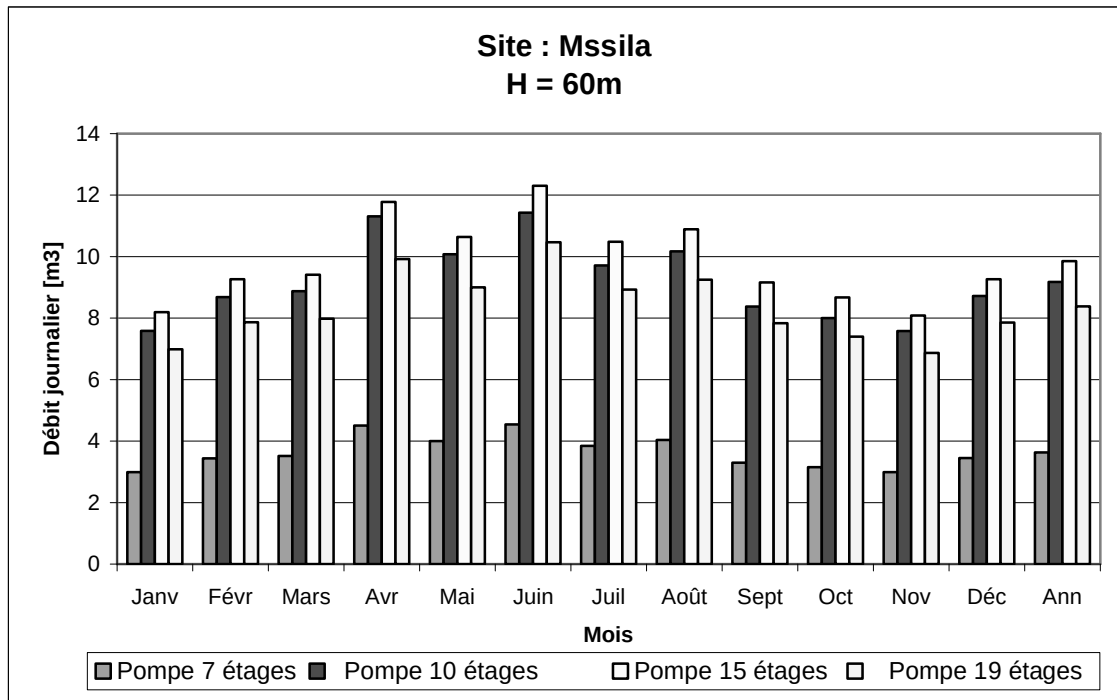


Fig.V.24 : Estimation du débit pour H= 60m.

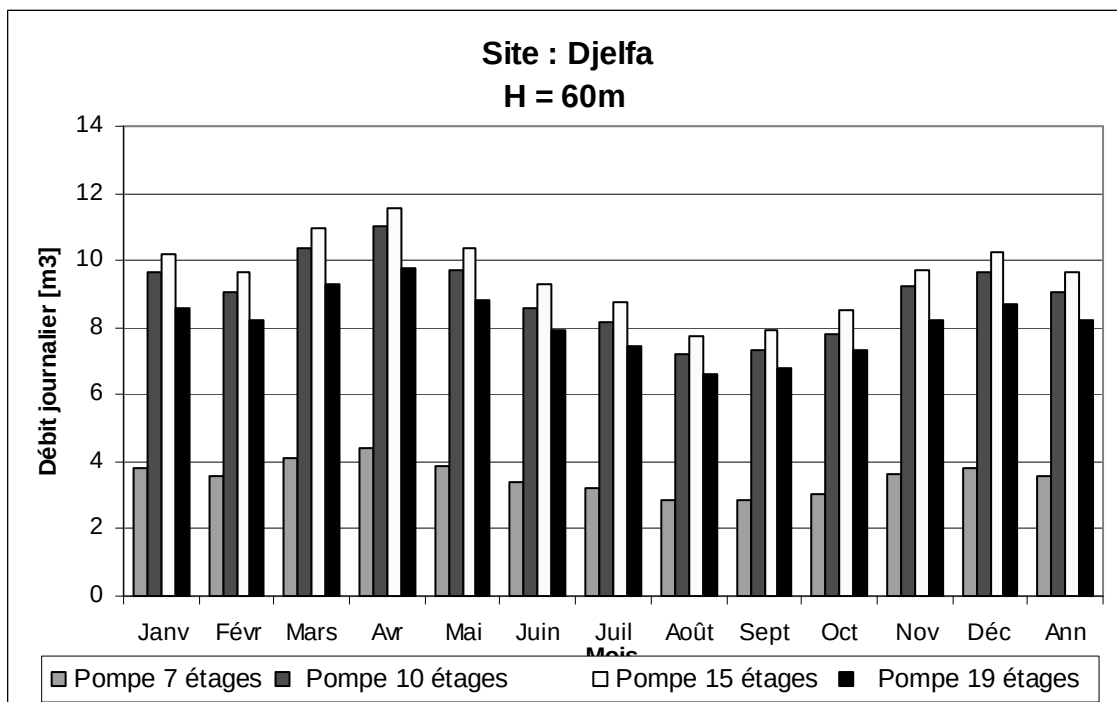


Fig.V.25: Estimation du débit pour H= 60m.

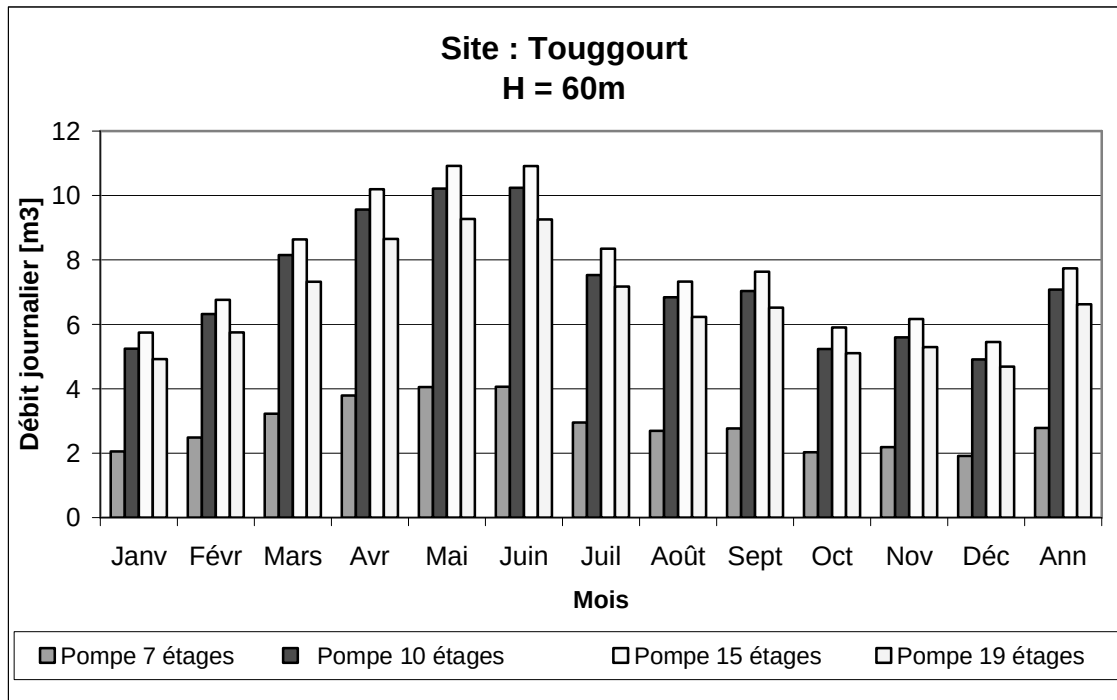


Fig.V.26: Estimation du débit pour H= 60m.

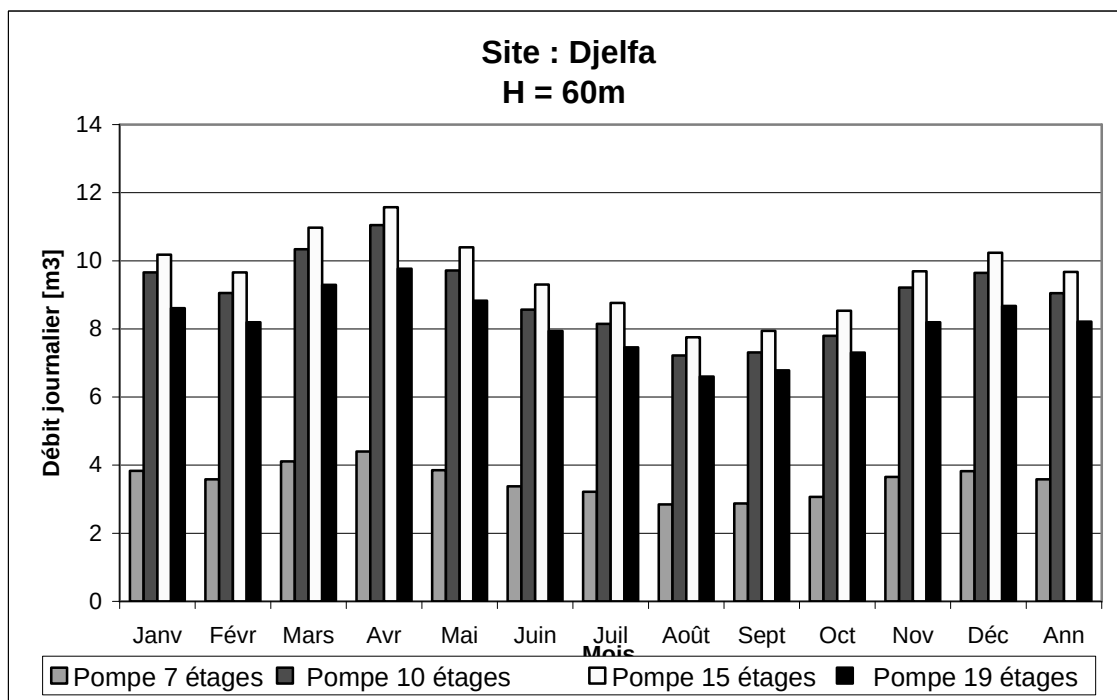


Fig.V.27 : Estimation du débit pour H= 60m.

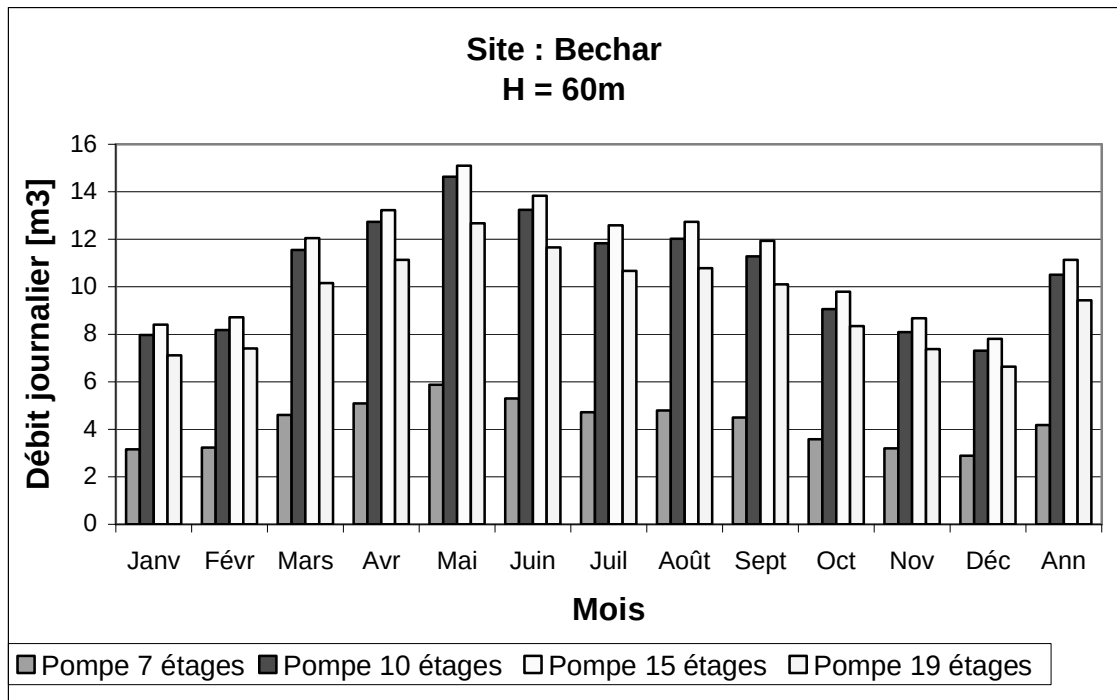


Fig.V.27: Estimation du débit pour H= 60m.

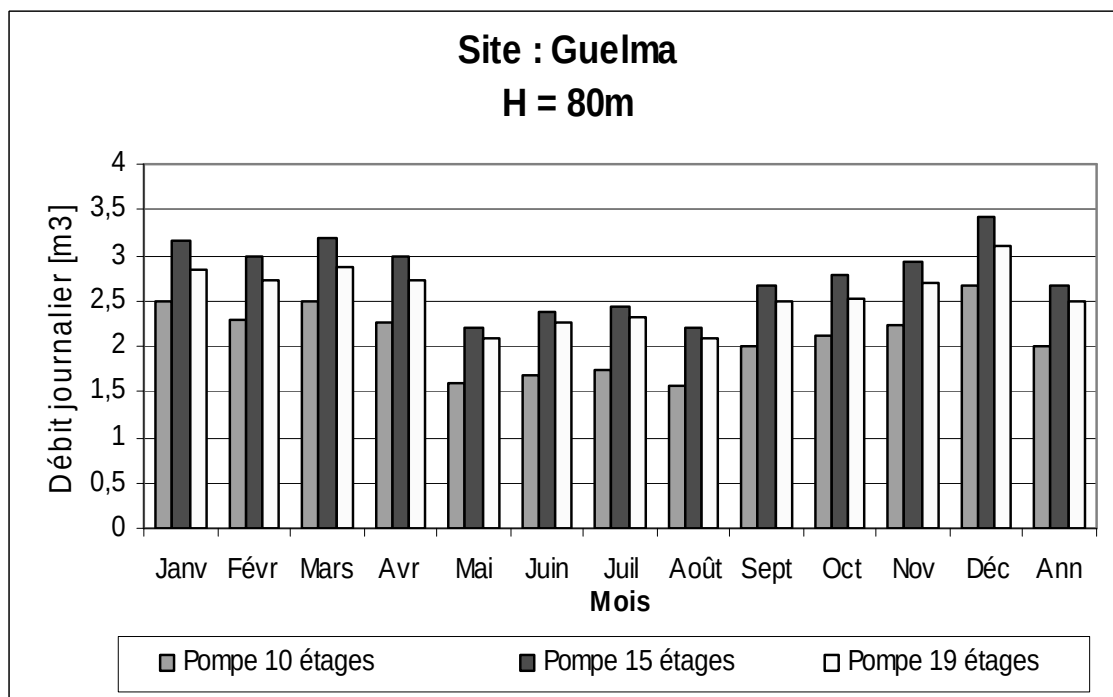


Fig.V.28: Estimation du débit pour H= 80m.

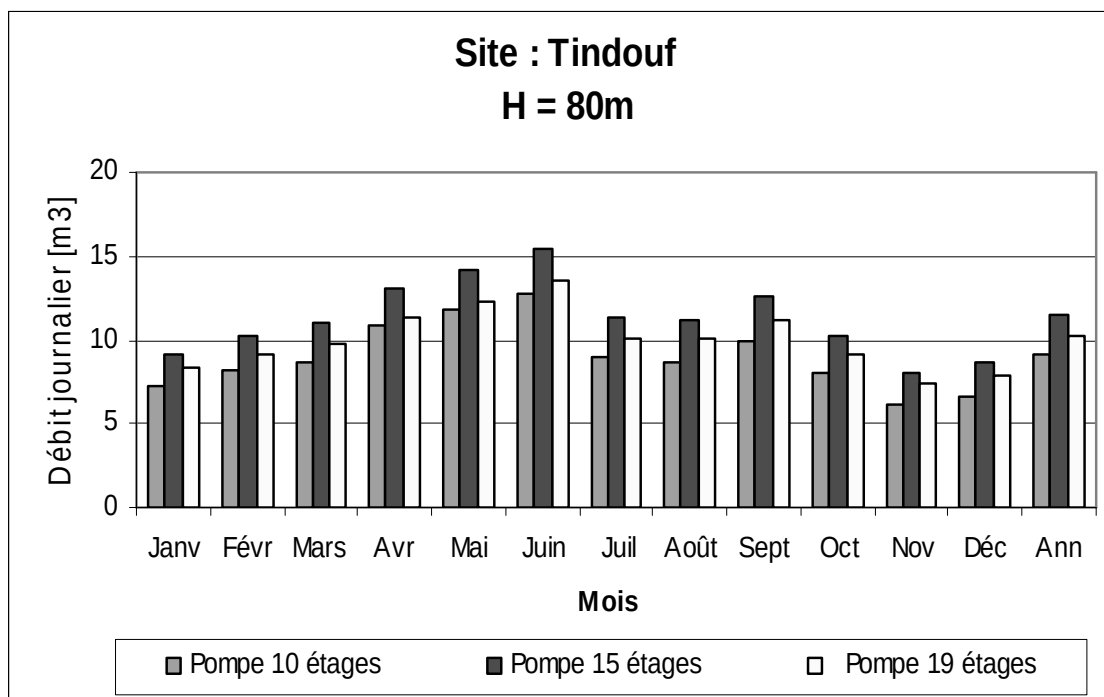


Fig.V.29 : Estimation du débit pour H= 80m.

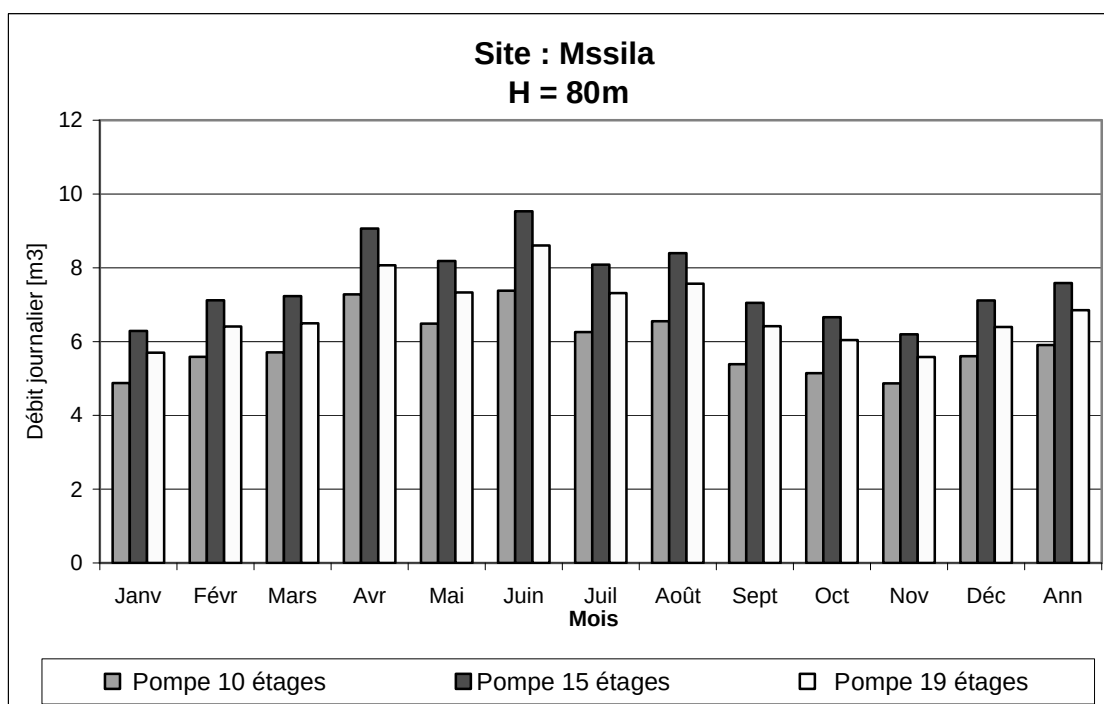


Fig.V.30 : Estimation du débit pour H= 80m.

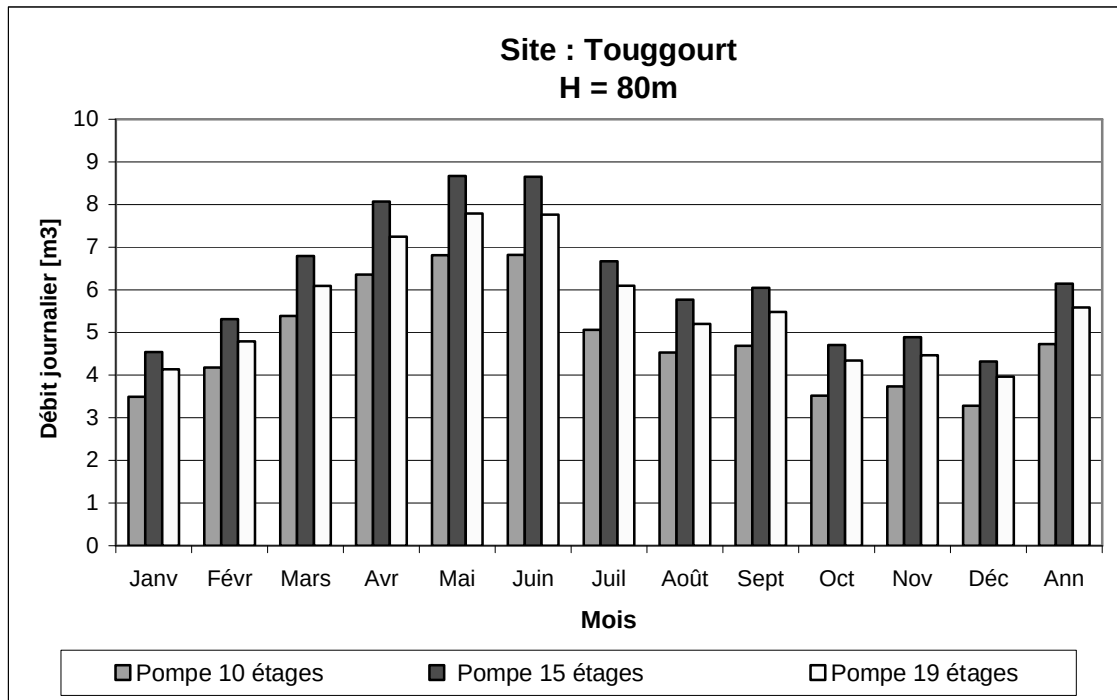


Fig.V.31: Estimation du débit pour H= 80m.

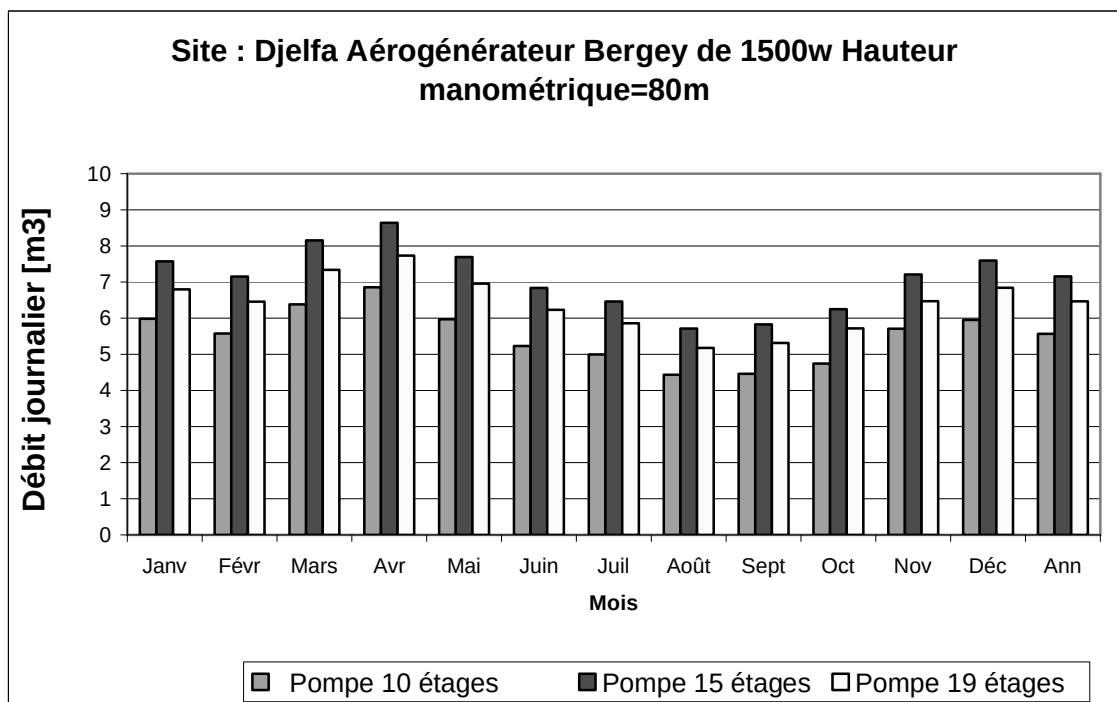


Fig.V.32 : Estimation du débit pour H= 80m.

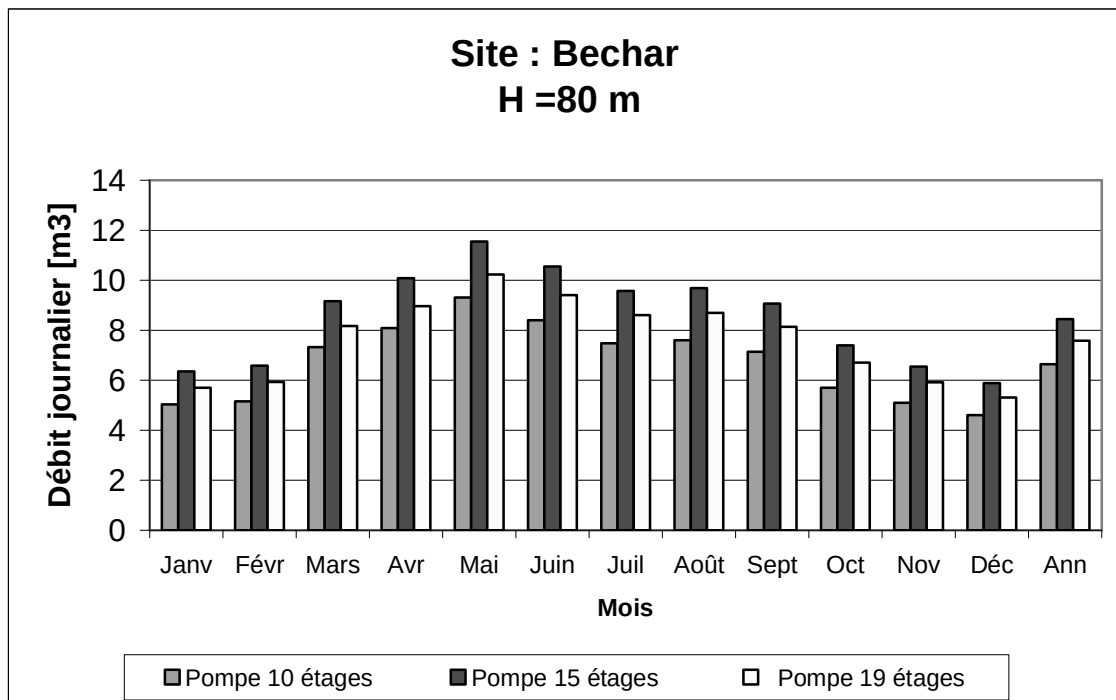


Fig.V.33 : Estimation du débit pour H= 80m.

Pour ce qui est des hauteurs manométriques de 60m et 80m, représentées respectivement au niveau des figures (V.27- V.32) on remarque que la pompe à 15 étages est celle qui pompe l'eau avec le plus grand débit par rapport aux autres pompes comme on peut remarquer que dans la région de Tindouf il dépasse les 15m^3 ou représente le plus grand débit par rapport aux autres sites où il ne dépasse même pas 3.5m^3 pour la région de Guelma et atteint 10m^3 au M'ssila et 12m^3 au Bechar. Cette variation dans la valeur de débit d'une région à une autre s'explique par la variation des vitesses des différentes régions d'où on a toujours un plus grand débit dans les régions où les vitesses sont les plus grandes.

6. Conclusion

On peut dire que d'une manière générale chaque pompe est convenable à une distance bien définie, l'augmentation de la hauteur manométrique nous conduit à augmenter les nombres d'étages des pompes utilisés afin d'obtenir un débit journalier de la quantité d'eau pompée le plus grand possible d'où la pompe de 19 étages devrait être adéquate pour une distance de plus de 80m.

Le gisement éolien agit d'une manière directe sur le débit, où pour des régions plus ventées (ont une vitesse grande) on peut avoir un débit plus grand que celui d'une autre région ayant une vitesse du vent plus petite.

On constate que le choix de la pompe dépend essentiellement de la hauteur manométrique.

Chapitre VI

Estimation de la puissance fournie par les différents aérogénérateurs

Nous présentons dans ce chapitre une évaluation des besoins énergiques d'une maison moyenne de type F3 implantée dans quatorze sites différents. Ensuite, nous analysons la couverture de ces besoins par l'utilisation d'aérogénérateurs de moyenne puissance.

V.I.1. Introduction

Donner une estimation de la puissance produite par un aérogénérateur permettant de choisir parmi les systèmes existants celui qui s'adaptera le mieux aux besoins énergétiques et au régime du vent de la région d'application. A cet effet, nous proposons une méthode de calcul de la puissance de production des différents aérogénérateurs. Cette méthode a été appliquée aux quatorze sites d'Algérie.

V.I.2. Dimensionnement de l'aérogénérateur

Le système éolien de base comprend une turbine (un rotor à pales, une boîte d'engrenages et une génératrice), une tour et les autres composants du système (ACS). Les ACS peuvent être de différentes sortes et les différents aérogénérateurs utilisés dans notre étude sont présentés au chapitre III. Ainsi, notre base de données est constituée de plusieurs éoliennes ayant chacune sa propre puissance nominale ainsi que sa courbe de caractéristiques, et comme le choix de la machine ne se fait pas directement à partir de cette dernière on a utilisé une approche donnée par la formule suivante [24]:

$$P = \int_{V_{in}}^{V_{out}} p(v) f(v) dv \quad (VI.1)$$

Avec :

V_{in} et V_{out} sont respectivement les vitesses de début de production et vitesse d'arrêt de l'aérogénérateur

$P(v)$ est la courbe de puissance électrique fournie par l'aérogénérateur en fonction de la vitesse du vent. Généralement, elle est donnée par le constructeur.

$F(v)$ qui est la probabilité de distribution des vitesses du vent définie par la loi de Weibull (III.1), dépend des paramètres météorologiques du site.

Cette méthode est sensible aux vitesses moyennes du vent à différentes altitudes et aux courbes de puissance de production d'aérogénérateurs (donnée constructeur).

Pour faire l'étude de la possibilité d'équiper un site d'un aérogénérateur, dans le but d'optimiser la puissance fournie par les aérogénérateurs et de choisir rapidement et de manière automatique, on a constitué un outil informatique qui contient une base de données faite par l'accès présentée dans le chapitre II. Cette dernière est commandée par une interface constituée de plusieurs fenêtres qui permettent d'accéder et de sauvegarder dans la base de données.

Le principe de notre application est schématisé dans les étapes suivantes :

Une connaissance fine du potentiel par la répartition en fréquence des classes du vent et le nombre d'heures théorique de fonctionnement. Il est extrêmement important d'évaluer méthodiquement et rationnellement la quantité d'énergie éolienne disponible. La sous-estimation ou la sur-estimation des ressources éoliennes d'un endroit donné peut s'avérer très coûteuse. On peut procéder de plusieurs manières pour évaluer la quantité d'énergie éolienne. En effet, à partir des relevés tri-horaires de trois stations météorologiques implantées en triangle autour du point où doit être installé le système, et faire ainsi l'évaluation de l'énergie disponible dans le site. Une autre méthode d'évaluation de cette énergie, consiste à faire une campagne de mesure (Anémomètre enregistreur en location) placé sur le lieu de l'installation et de faire des relevés réguliers pendant au moins trois mois (idéal 1 an).

1- L'évaluation du besoin énergétique : la deuxième étape consiste à déterminer la consommation totale annuelle des systèmes électriques qui seront alimentés par l'aérogénérateur.

2- Après avoir déterminé les paramètres caractérisants notre site d'application, la troisième étape consiste à estimer la puissance électrique produite par chaque aérogénérateurs en se basant sur l'équation (VI.1).

3- Dans cette étape on doit calculer la différence pour chaque valeur mesurée précédemment avec la valeur de consommation calculée dans la deuxième étape.

4- En dernière étape un programme intégré nous fait la sélection d'aérogénérateur qui se rapproche de notre exigence en terme d'énergie électrique.

Toutes ces informations seront traitées sur ordinateur et permettront ainsi de choisir la machine correspondante aux besoins envisagés.

L'implantation des éoliennes requiert un environnement dégagé de tout obstacle dans un rayon de 50 à 100 m dans la direction des vents dominants (Nord, Nord-Est, Nord-Ouest dans la zone du projet).

VI.3. Application

VI.3.1 L'interface graphique

Notre application est présentée par l'interface qui est constituée par les fenêtres suivantes :

1- Au lancement de notre application, la première fenêtre donnée par la figure (VI.1 et VI.2), contient le menu principal, qui permet d'accéder aux opérations d'estimation. L'accès au menu principal est sécurisé par un mot de passe.

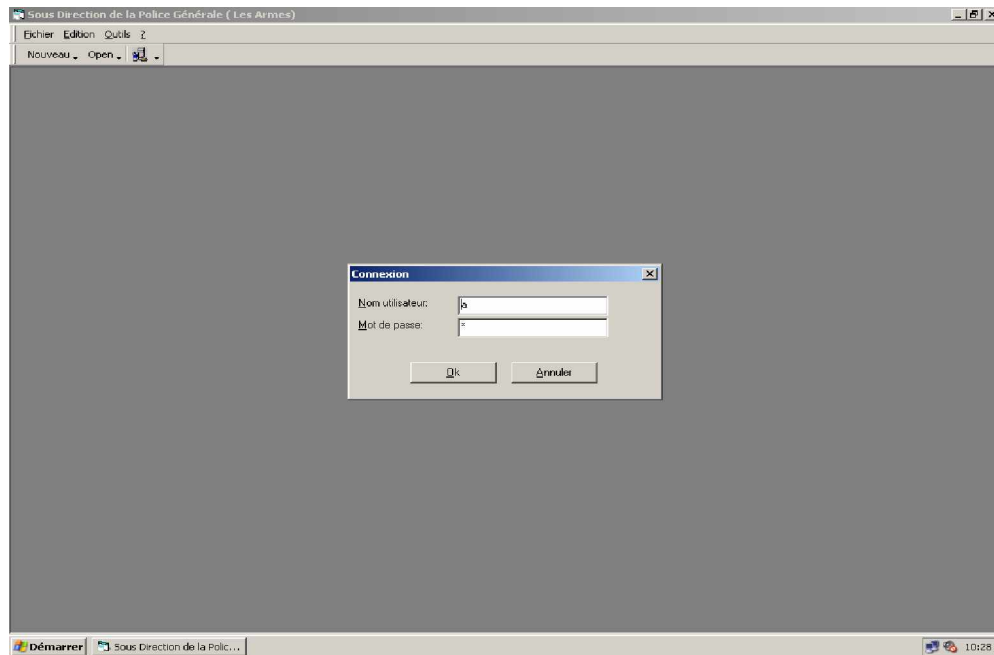


Fig.VI.1 : la première fenêtre.

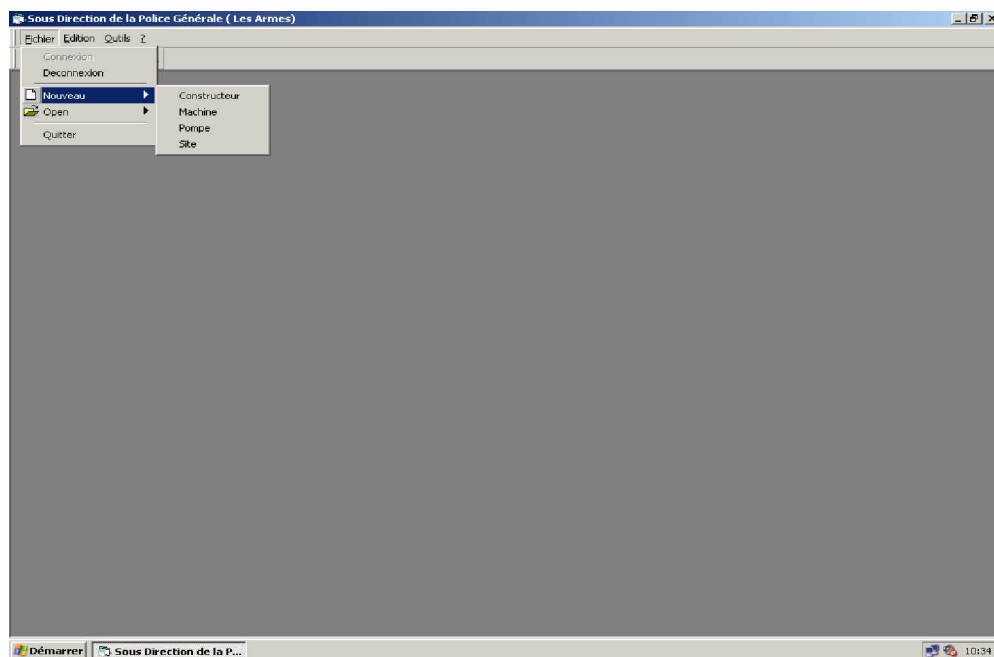


Fig.VI.2 : la barre d'outil.

2- L'alimentation de la base de données se fait par deux fenêtres représentées sur les figures (VI.3-VI.6) La première permet d'introduire le nom d'un nouveau constructeur, la deuxième pour introduire les une nouvelle machine avec ces caractéristiques, la troisième permet d'introduire les données de site et la dernière pour introduire une nouvelle pompe.

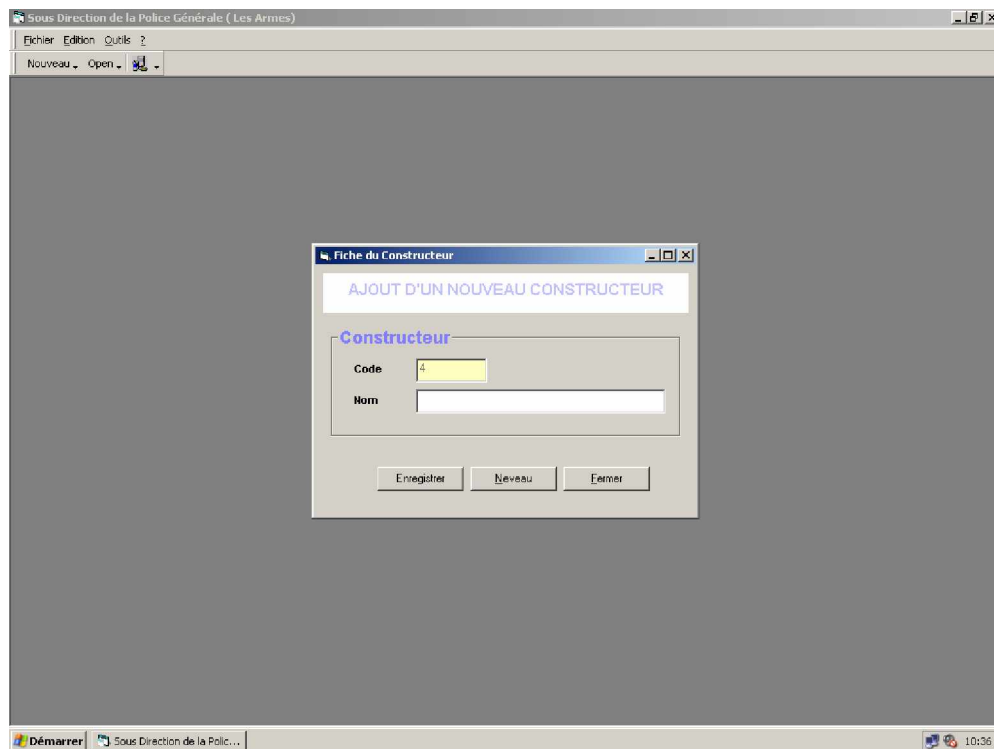


Fig.VI.3 : ajout d'un nouveau constructeur.

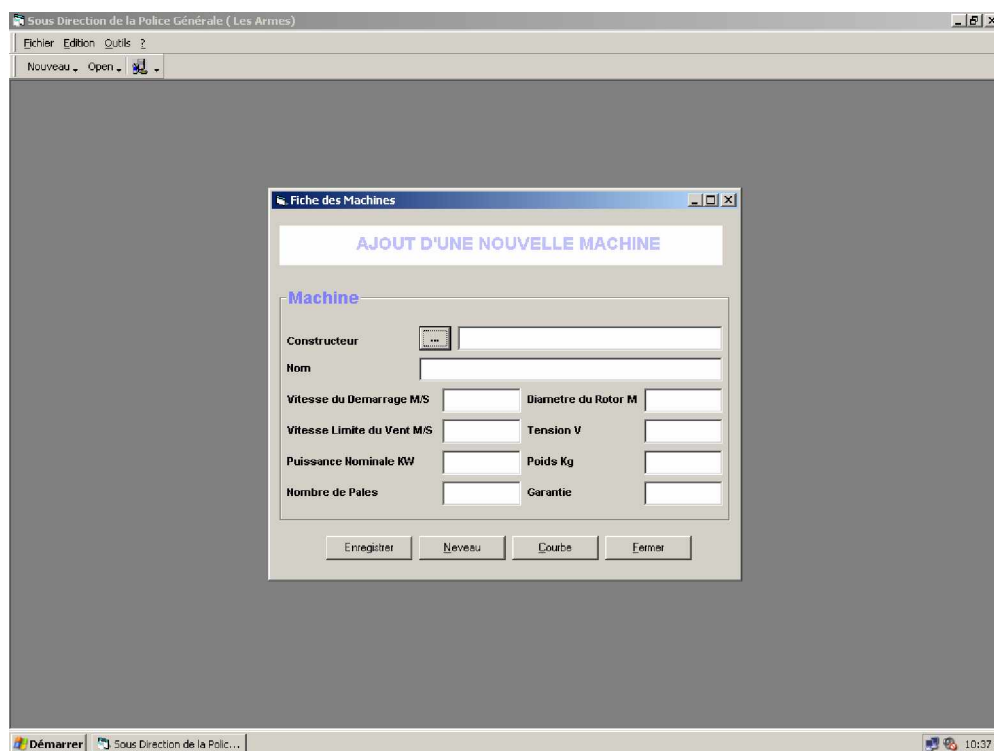


Fig.VI.4 : ajout d'une nouvelle machine.

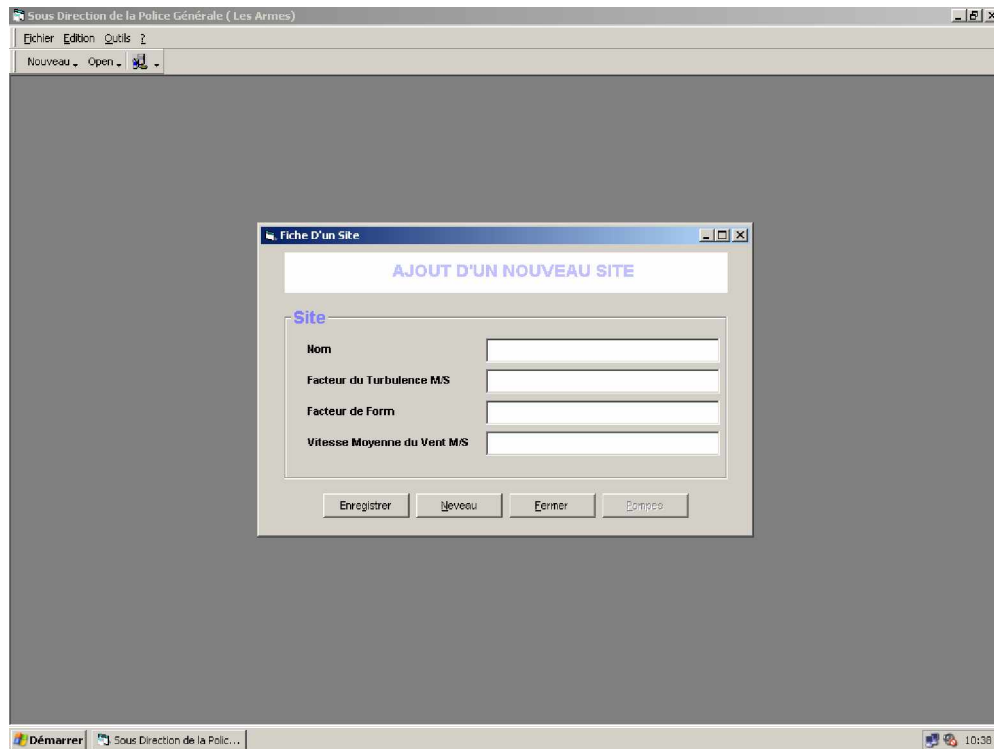


Fig.VI.5 : ajout d'un nouveau site.

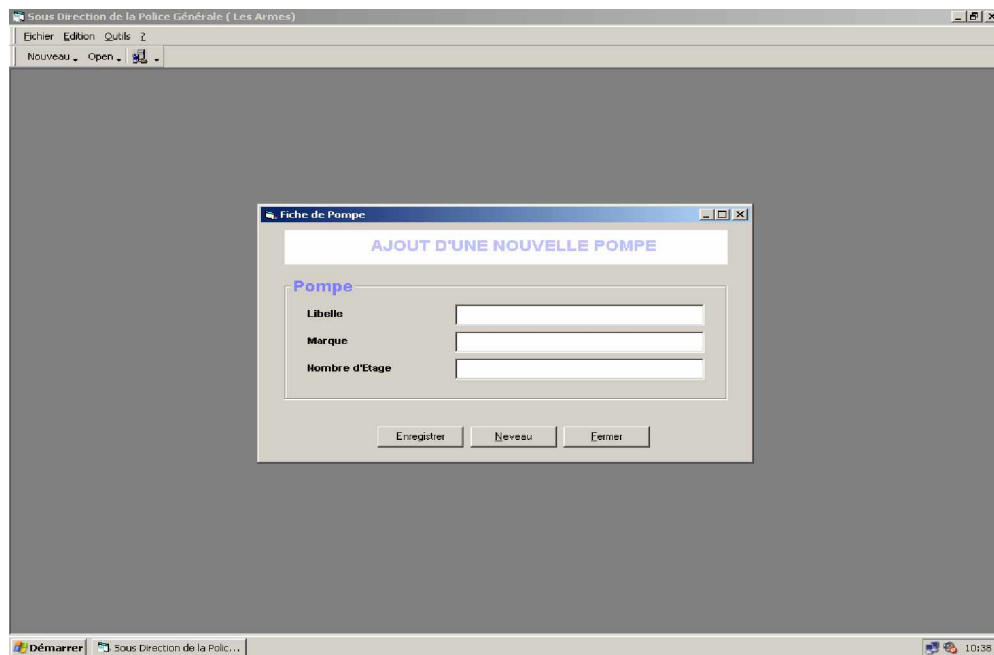


Fig.VI.6 : ajout d'une nouvelle pompe.

3- L'exploitation de cette base de données se fait par la dernière fenêtre où on doit choisir le site dans le premier champ et fixer la hauteur manométrique ainsi que la valeur de consommation désirée. L'affichage du résultat final se fait sur cette fenêtre.

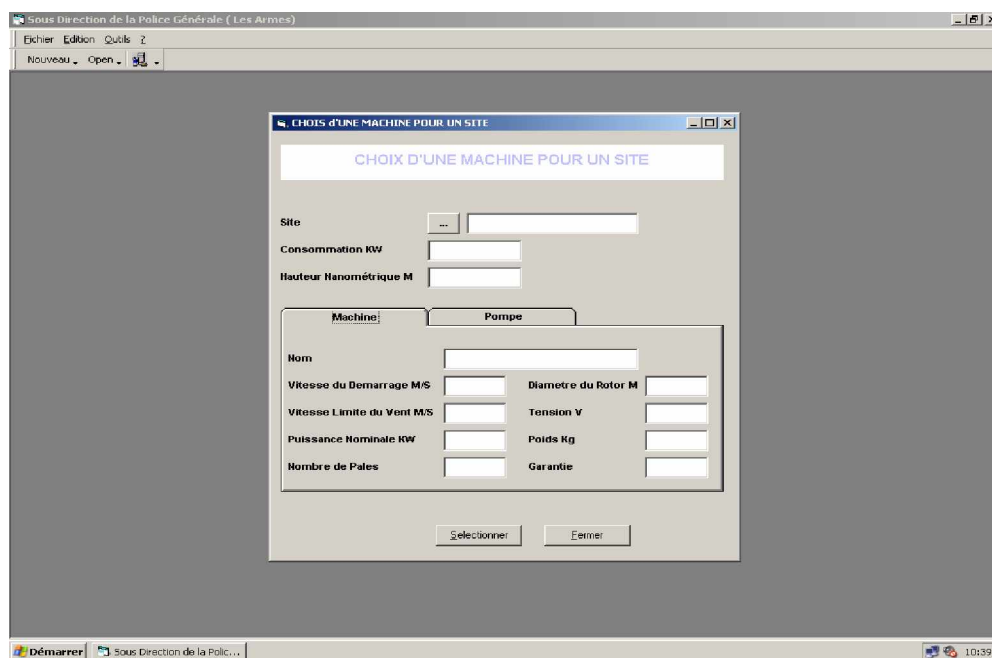


Fig.VI.7 : caractéristiques de la machine choisie.

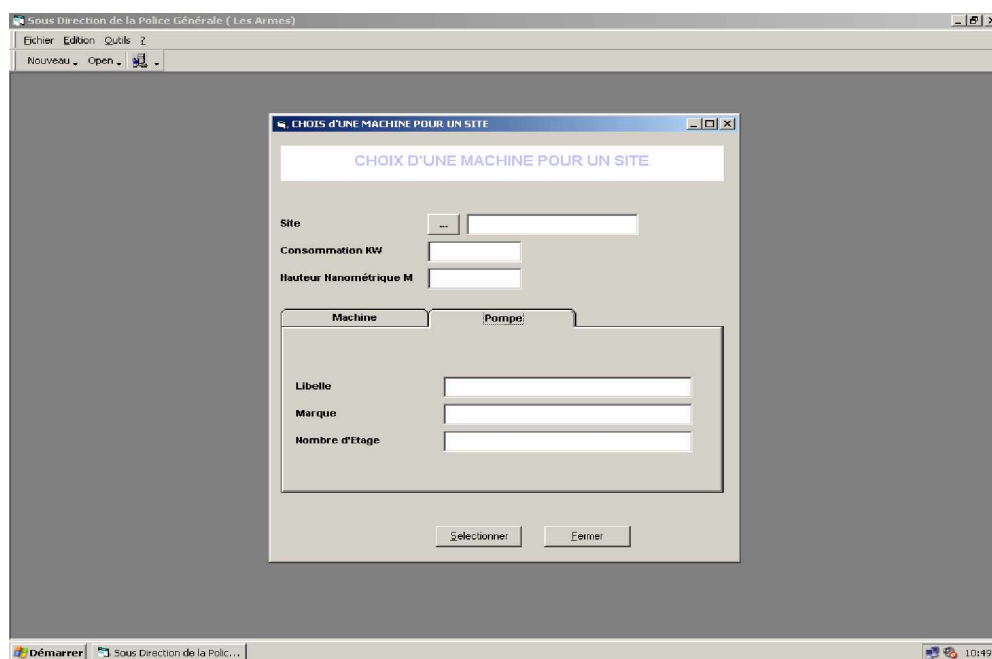


Fig.VI.8 : choix de la pompe.

VI.3.2 L'organigramme

L'organigramme qui résume notre application est représenté sur la figure (V.9) :

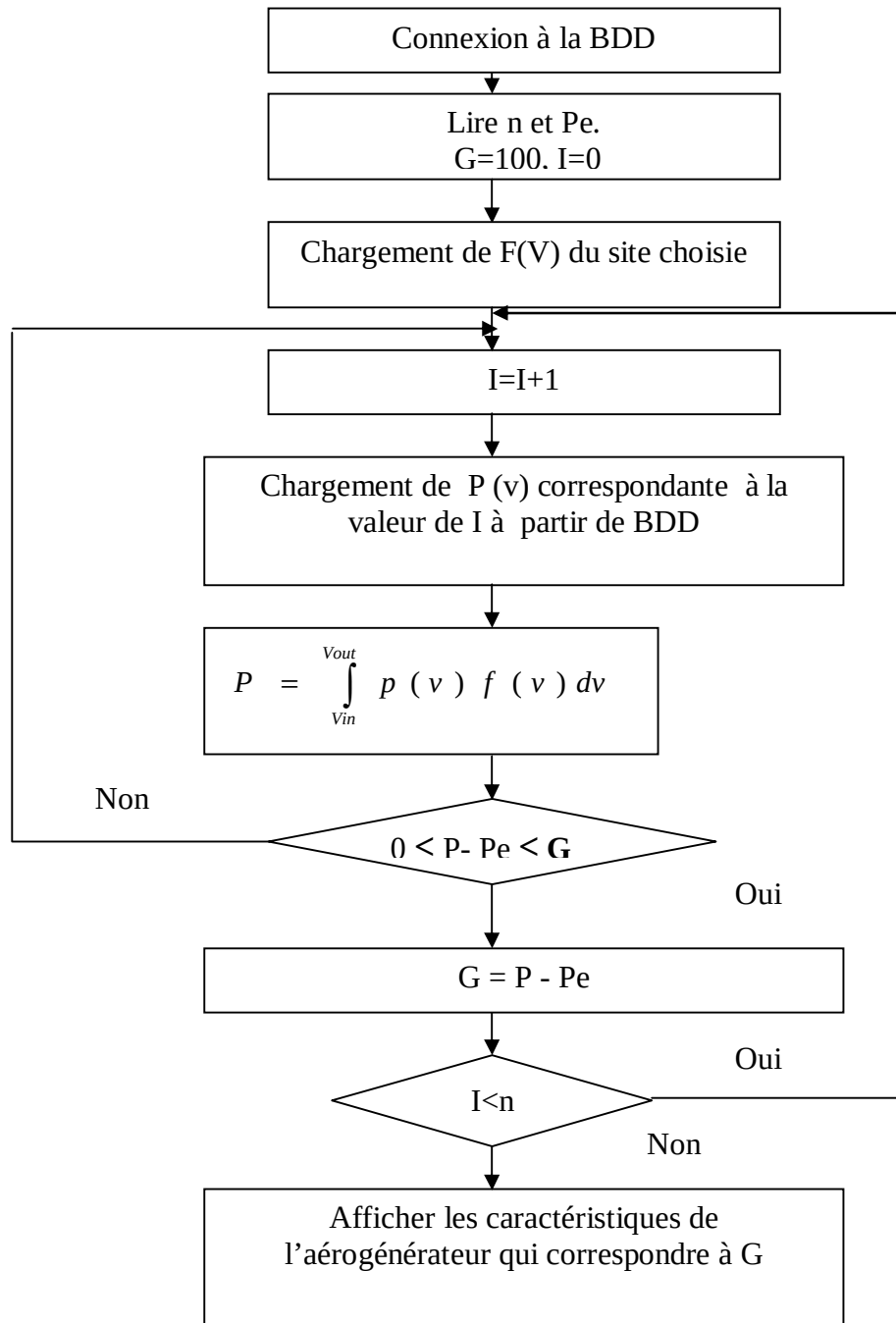


Fig.VI.9 : Organigramme pour la détermination l'aérogénérateur adéquat.

Afin d'optimiser nos résultats, nous avons choisi de travailler sur quatorze sites implantés principalement dans le sud-ouest de notre pays. Ses sites présentent toutes les caractéristiques de sites-candidats à l'exploitation de cette énergie.

VI.3.3 L'évaluation du besoin énergétique

Avant l'estimation d'énergie par chaque aérogénérateur il est nécessaire de déterminer la quantité d'énergie dont on a besoin au cours d'une année pour faire fonctionner tous les électroménagers et l'équipement que notre système éolien doit alimenter.

Pour l'évaluation de ces besoins en énergie électrique, nous devons disposer de deux types de renseignements. En premier lieu, il faut déterminer la durée de fonctionnement des appareils électroménagers, puis la quantité d'énergie que consomme chacun d'eux [25].

- Besoin énergétique d'une maison de type F3

Les besoins énergétiques d'une maison de trois pièces/cuisine sont considérés dans le tableau VI.1. Par souci d'économie d'énergie, l'éclairage est réalisé par ampoule et tube fluorescent et la mise en veille de certains appareils domestiques est à bannir.

Les valeurs du tableau V.1 ne sont que des moyennes et peuvent varier d'une marque à une autre.

Equipements	Puissance [w]	Nombre d'heures de fonctionnement par jour	Nombre de Jours D'utilisation Par année	Consommation Journalière [kWh]	Consommation Annuelle [kWh]
Téléviseur 55 cm	90	6	365	0.54	197.1
Réfrigérateur	200	8	365	2.8	1022
Robot cuisine	600	0.16	26	0.096	2.496
Fer à repasser	1200	0.25	52	0.3	15.6
Chaîne Hi-fi	50	2	200	0.1	20
Ordinateur	200	2	200	0.4	80
Magnétoscope	50	3	40	0.15	6
Démodulation	15	6	365	0.09	32.85
Radio réveil	3	24	365	0.072	26.28
Perceuse	500	0.16	10	0.08	0.8
Eclairage salon	2×24	3	365	0.144	52.56
Eclairage deux chambres	2×24	2	365	0.096	35.4
Eclairage couloir	13	4	365	0.052	18.98
Eclairage Salle de bain	13	2.5	365	0.0325	11.86
Eclairage cuisine	13	4	365	0.052	18.98
Eclairage garage	13	0.16	365	0.0208	7.592
Eclairage jardin	13	6	365	0.078	28.47
Consommation totale				5.1	1576.6

Tableau VI.1 : consommation énergétique d'une maison de type F3.

VI.3.4 Estimation de la puissance fournie par les différents aérogénérateurs

La production énergétique annuelle des différents aérogénérateurs est évaluée en utilisant le modèle de distribution de Weibull. Cette évaluation est accomplie pour différentes hauteurs 20m, 40m, 60, 80m et pour quatorze site, chaque site est caractérisé par :

- Sa vitesse moyenne.
- Hauteur de l'anémomètre.
- Facteur de forme et facteur d'échelle.

Les figures (V.10, V.11, V.12, V.13 et V.14) représentent la production énergétique annuelle des aérogénérateurs de Tamanrasset, Guelma, Touggourt, El-Oued et Tindouf respectivement. Celle-ci indiquent la production énergétique annuelle des aérogénérateurs de types (1) Bergey 1kw , (2) INCLIN 250, (3) INCLIN 1500, (4) INCLIN 600, (5) INCLIN 3000 NEO, (6) FORTIS ESPADA, (7) Bergey Scirocco, (8) Bergey BWCEXCEL et (9) Bergey BWC 1000 pour les quatre différentes hauteurs du pylône. Les résultats concernant les 10 autres sites sont représentés en Annexe C.

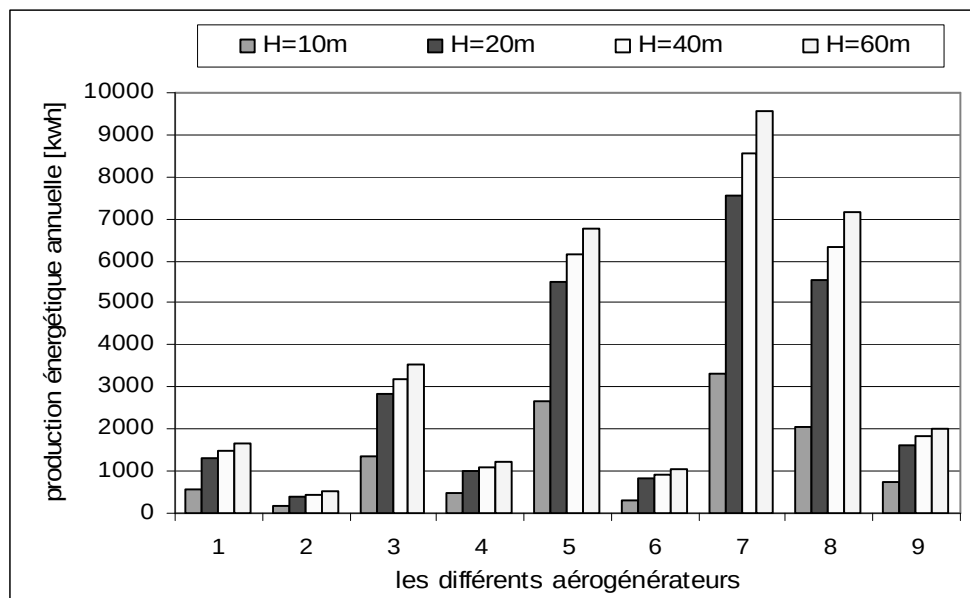


Fig.V.10 : Production énergétique annuelle des aérogénérateurs pour le site de Tamanrasset à différentes altitudes.

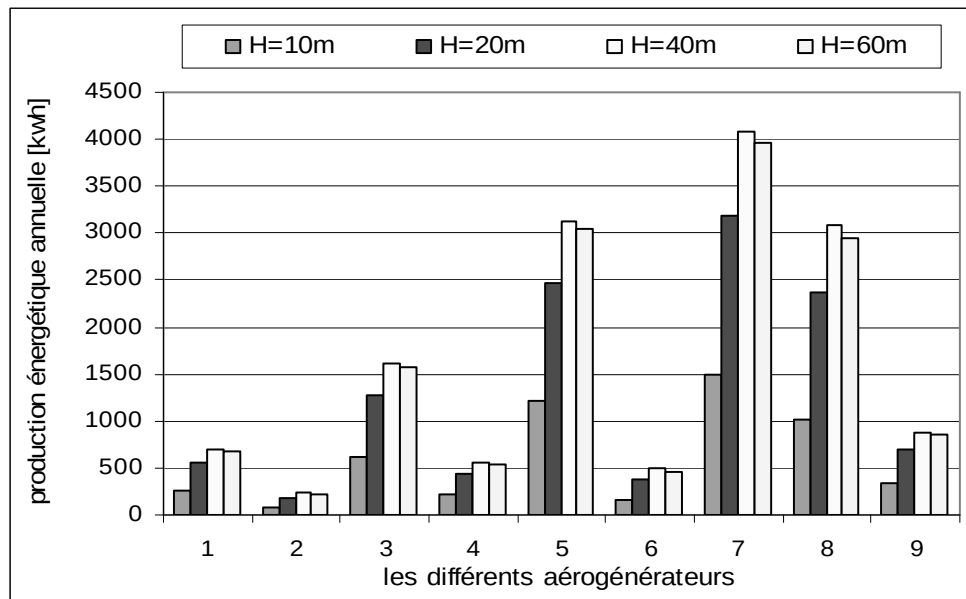


Fig.V.11 : Production énergétique annuelle des aérogénérateurs pour le site de Guelma à différentes altitude.

Sur ces figures, nous remarquons que pour les aérogénérateurs 5, 7 et 8, la production électrique est assez importante pour les hauteurs (20, 40 et 60m) comparées à la demande qui vaut 1576,6kWh. Elle dépasse le double des besoins énergétiques pour l'aérogénérateur 7 et arrive au double pour les aérogénérateurs 5 et 8 à 20m.

Nous remarquons également que à 40m les besoins énergétiques annuelles de l'habitation ne sont couverts qu'à moitié par l'aérogénérateur 9 (48% pour H=20 et 57% pour H=40m).

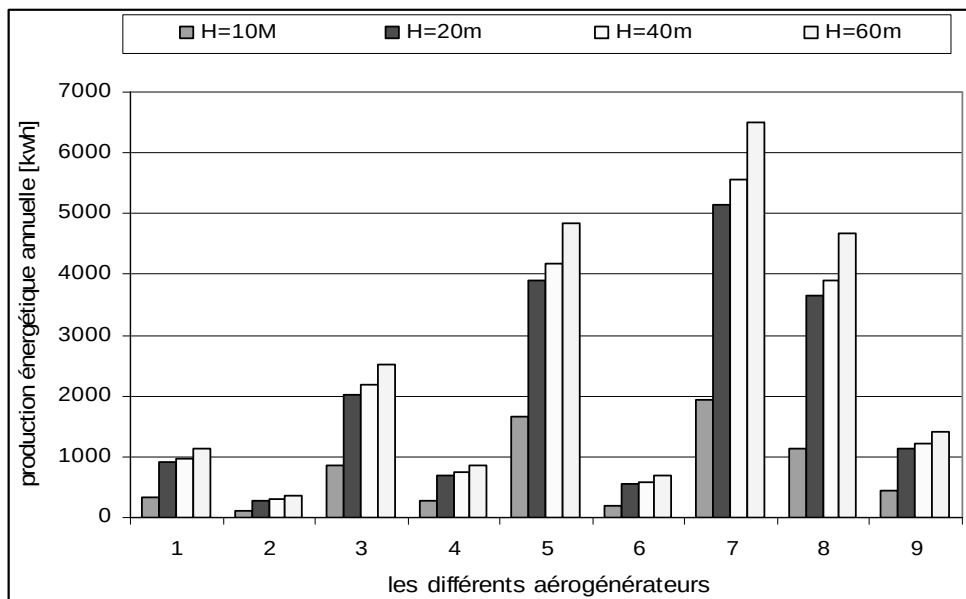


Fig.V.12 : Production énergétique annuelle des aérogénérateurs pour le site de Touggourt à différentes altitude.

Pour une vitesse du vent moyenne de 3.920 m/s, la production de l'aérogénérateur 1 reste insuffisante pour les mâts de 10, 20, 40 et 60m ; par contre l'aérogénérateur 5 arrive à satisfaire la demande dès que la hauteur du mât passe à 10m.

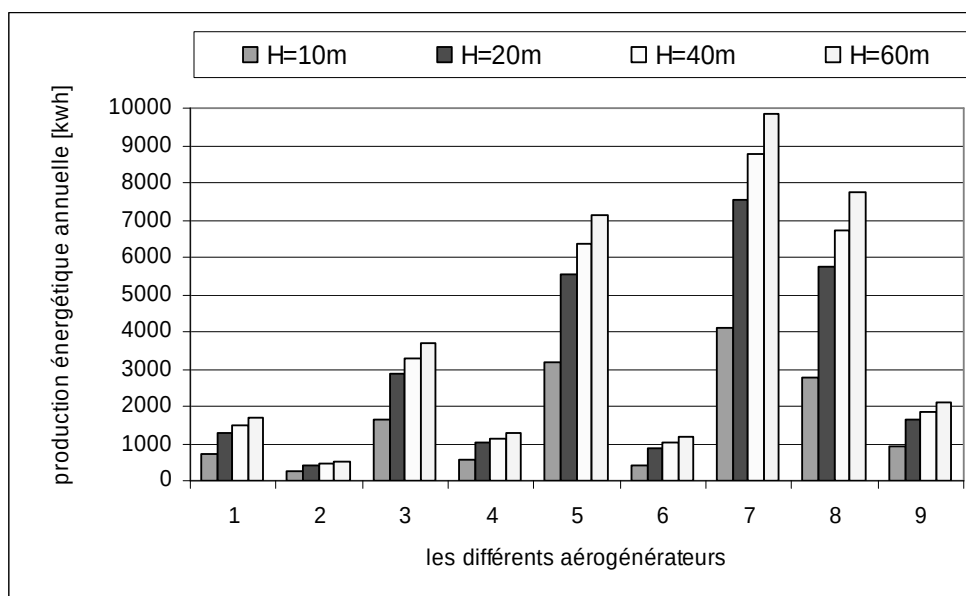


Fig.V.13 : Production énergétique annuelle des aérogénérateurs pour le site de El-Oued à différentes altitude.

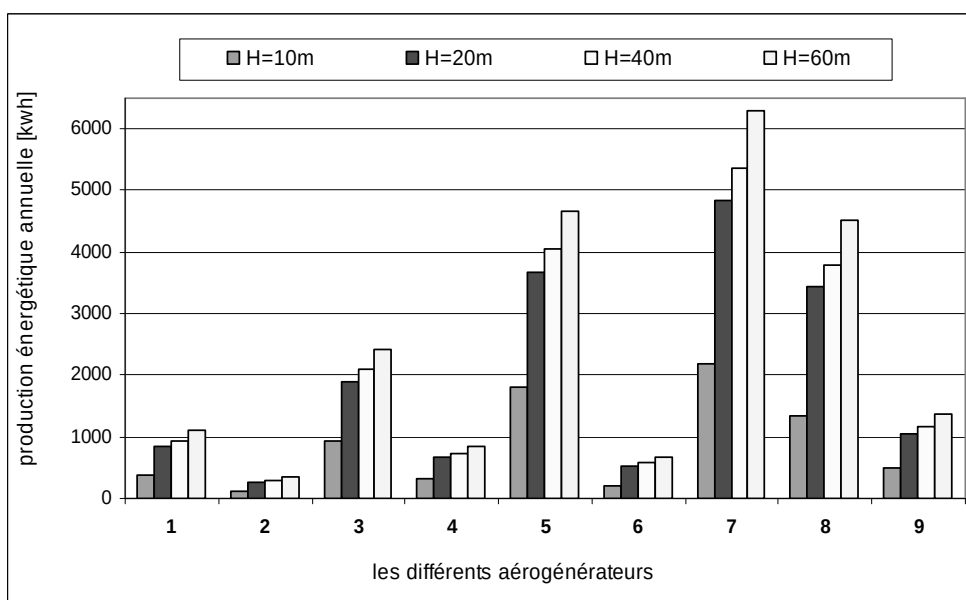


Fig.V.14 : Production énergétique annuelle des aérogénérateurs pour le site de Tindouf à différentes altitude.

Pour le site de Tindouf qui a une vitesse moyenne de 5.810m/s, les aérogénérateurs 1 et 9 n'arrivent pas à satisfaire la demande et cela pour toutes les hauteurs et la demande est totalement couverte par l'aérogénérateur 3 à 20m et par l'aérogénérateur 5 à 10m. Pour les autres aérogénérateurs en marque soit un excédent ou une faible production.

pour le site de El-Oued qui à une vitesse moyenne assez faible qui vaut 3,54 m/s la production reste insuffisante pour l'aérogénérateur 1 à (10,20 et 40m) et arrive à satisfaire la demande que à 60m, pour l'aérogénérateur 3 à 10m et l'aérogénérateur 9 à 40 et 60m.

On remarque aussi que la production énergétique annuelle est plus importante à Tindouf qu'à El-Oued pour tous les aérogénérateurs et aux différentes hauteurs.

Pour le site de Guelma qui à une vitesse moyenne de 2.480m/s la demande est satisfaite à une hauteur de 10 m pour l'aérogénérateur 5 avec 1200kWh. Pour le même site la demande est satisfaite pour l'aérogénérateur 3 à partir de 40 m. Par contre pour l'aérogénérateur 5, on a un excès de production à partir de 20m.

VI.4. Stockage de l'énergie produit

On ne peut pas compter sur le vent. Donc pour combler cette lacune, il faut équiper certains systèmes d'un ensemble de batteries qui stockent l'électricité, ou utiliser l'appoint d'une génératrice diesel, à essence ou au propane qui compensera l'absence de vent.

Afin de stabiliser l'alimentation électrique, il est impératif d'utiliser des batteries de stockage. Elles permettent aussi de couvrir les besoins électriques lors des périodes de pénurie. En général la période de pénurie est estimée à 3 jours au maximum.

Les coûts de stockage en batterie et de transformation sont assez élevés et portent à 60-80 centimes le kilowatt/heure ; toutefois cette solution est compétitive par rapport au prix de l'électricité fournie par les groupes électrogènes diesel fonctionnant au fioul. On peut donc les recommander pour les sites isolés des réseaux.

Lorsque les besoins sont relativement importants, il est préférable d'avoir recours à des systèmes hybrides associant une éolienne, une installation solaire photovoltaïque et un groupe diesel. Ces systèmes sont intéressants à partir de quelques centaines de watts, c'est-à-dire pour des petits réseaux collectifs.

VI.5. Conclusion

La présente étude nous a permis d'analyser la possibilité d'alimenter en énergie électrique une habitation isolée par un aérogénérateur de petite puissance totalement autonome.

Les calculs ont montré qu'à partir d'une vitesse du vent moyenne de 5.810m/s, les besoins énergétiques d'un F3 typique sont largement couvert par les aérogénérateurs 3 à 20m et 5 à 10m.

Pour une vitesse inférieure à 3 m/s, le déficit énergétique peut être rattrapé par l'augmentation de la hauteur du pylône. En effet une rallonge de 10 mètres peut engendrer une augmentation de 20 à 30% de la production énergétique annuelle. Ainsi, l'énergie du vent doit être captée à des hauteurs supérieures à la hauteur de mesure de 10m afin d'échapper aux problèmes de turbulences dus à la nature de la surface et aux obstacles environnants.

De là, on voit bien l'importance et l'intérêt de l'évaluation préliminaire des ressources éoliennes avant d'envisager toute exploitation de cette énergie.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons analysé la faisabilité d'un système éolien où on a étudié la possibilité d'alimenter en énergie électrique une habitation isolée par un aérogénérateur de petite puissance totalement autonome.

Cette étude a été appliquée sur quatorze sites situés en Algérie. D'après les résultats obtenus nous avons constaté que le choix de l'aérogénérateur adéquat pour l'alimentation dépend du régime du vent pour différents sites d'installation.

Les calculs ont montré qu'à partir d'une vitesse du vent moyenne de 5.810m/s, les besoins énergétiques d'un F3 typique sont largement couverts par les aérogénérateurs 3 à 20m et 5 à 10m.

Pour une vitesse inférieure à 3 m/s, le déficit énergétique peut être rattrapé par l'augmentation de la hauteur du pylône. En effet une rallonge de 10 mètres peut engendrer une augmentation de 20 à 30% de la production énergétique annuelle. Ainsi, l'énergie du vent doit être captée à des hauteurs supérieures à la hauteur de mesure (10m) et cela afin de contourner les problèmes de turbulences dus à la nature de la surface et aux obstacles environnants.

En effet, d'après la première partie de notre travail qui concerne la méthode du choix d'une pompe, nous pouvons dire que d'une manière générale chaque pompe est convenable à une distance bien définie. L'augmentation de la hauteur manométrique nous conduit à augmenter les nombres d'étages des pompes utilisés afin d'obtenir un débit journalier de la quantité d'eau pompée le plus grand possible d'où le choix de la pompe de 19 étages considérée comme étant la plus adéquate pour une distance de plus de 80m. De plus, il a été noté que le choix de cette pompe dépend essentiellement de la hauteur manométrique.

D'un autre côté, on a constaté que le gisement éolien agit d'une manière directe sur le débit et la puissance produite. En effet, pour des régions plus ventées (ont une vitesse grande) peut engendrer un débit plus grand que celui d'une autre région ayant une vitesse du vent plus petite.

En conclusion, nous pouvons dire qu'avant d'envisager toute exploitation des énergies renouvelables, il est primordial qu'une évaluation préliminaire des ressources éoliennes soit prise en considération.

Enfin et comme perspective, nous pouvons contribuer dans l'élaboration de bases de données pour les ressources des énergies renouvelables.

Annexe : A

mois/station	Janv	Fevr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Ann
GUELMA													
V	2.290	2.410	2.450	2.580	2.380	2.640	2.640	2.480	2.480	2.290	2.460	2.660	2.480
K	0.627	0.735	0.698	0.803	0.877	0.942	0.931	0.912	0.826	0.733	0.764	0.725	0.826
c	0.986	1.209	1.208	1.433	1.337	1.609	1.594	1.435	1.381	1.140	1.295	1.378	1.385
M'SILA													
V	3.980	4.380	4.450	5.370	4.890	5.270	4.760	4.900	4.340	4.160	3.930	4.390	4.570
K	1.072	1.101	1.085	1.188	1.164	1.424	1.270	1.264	1.219	1.129	1.000	1.082	1.188
c	2.856	3.261	3.327	4.213	3.830	4.282	3.797	4.005	3.306	3.075	2.745	3.211	3.470
TAMANRASSET													
V	3.850	4.290	5.170	5.330	5.010	5.070	5.040	4.830	4.790	4.220	3.600	3.370	4.550
K	1.037	1.063	1.157	1.118	1.229	1.260	5.040	4.830	1.199	1.061	1.026	0.952	1.168
c	2.635	3.095	3.956	4.107	3.809	3.954	3.887	3.719	3.933	3.021	2.428	2.188	3.340
SIDI BELABBES													
V	3.340	3.030	3.330	3.560	3.370	3.240	3.040	2.980	2.930	2.820	3.140	3.340	3.180
K	0.871	0.772	0.975	1.017	1.085	1.088	0.905	1.019	1.014	0.923	0.922	0.855	0.963
c	2.143	1.792	2.222	2.448	2.313	2.163	1.968	1.907	1.876	1.750	2.015	2.110	2.086
DJELFA													
V	4.490	4.270	4.690	4.950	4.490	4.140	3.960	3.590	3.680	3.900	4.340	4.470	4.270
K	1.115	1.135	1.222	1.206	1.217	1.195	1.101	1.006	1.080	1.166	1.066	1.159	1.147
c	3.421	3.261	3.731	4.026	3.473	3.138	2.926	2.542	2.695	2.941	3.276	3.426	3.251
TOUGOURT													
V	3.060	3.440	4.260	4.810	5.030	5.040	4.190	3.700	3.860	3.300	3.290	3.000	3.920
K	0.922	0.903	1.015	1.179	1.258	1.240	1.211	0.956	1.047	1.058	0.986	0.951	1.089
c	1.878	2.119	2.619	3.267	3.289	3.176	2.635	2.151	2.585	2.319	2.131	1.851	2.517
EL-OUED													
V	2.950	3.240	3.690	4.290	4.250	4.160	3.600	3.270	3.580	3.350	3.170	2.900	3.540
K	0.895	0.900	1.026	1.126	1.204	1.323	1.144	1.057	0.992	0.930	0.837	0.900	1.042
c	1.918	2.254	3.055	3.698	3.969	3.982	3.121	2.609	2.712	2.140	2.065	1.867	2.780
BECHAR													
V	3.940	4.030	5.230	5.580	6.070	5.640	5.200	5.260	5.070	4.380	4.010	3.680	4.840
K	0.970	1.052	1.222	1.303	1.438	1.391	1.382	1.373	1.291	1.216	1.078	0.982	1.227
c	2.803	2.953	4.223	4.774	5.391	4.786	4.386	4.498	4.169	3.444	3.027	2.636	3.874
TINDOUF													
V	4.990	5.550	5.660	6.930	7.160	7.210	5.720	5.540	5.990	5.390	4.560	4.770	5.810
K	1.337	1.313	1.432	1.470	1.591	1.756	1.499	1.566	1.648	1.377	1.352	1.375	1.477
c	4.066	4.658	4.763	6.174	6.270	6.475	4.842	4.696	5.101	4.555	3.641	3.901	4.873
IN-AMENAS													
V	4.160	4.770	5.750	5.780	6.120	5.380	5.160	4.930	4.660	4.820	3.920	3.670	4.930
K	1.121	1.089	1.354	1.301	1.369	1.439	1.444	1.383	1.315	1.272	1.164	1.114	1.273
c	3.038	3.614	4.810	4.769	5.098	4.456	4.225	3.915	3.723	3.807	2.848	2.599	3.878
DJANET													
V	3.020	3.450	4.310	4.690	4.930	4.700	4.850	4.610	4.420	3.490	2.870	2.870	4.020
K	0.860	0.982	1.040	1.124	1.182	1.150	1.270	1.154	1.193	1.049	0.988	0.913	1.078
c	1.869	2.346	3.171	3.592	3.855	3.669	3.727	3.482	3.322	2.398	1.828	1.761	2.896
IN-SALAH													
V	4.910	5.570	5.900	5.640	5.600	5.200	6.330	6.180	5.050	4.810	4.500	4.720	5.370
K	0.945	1.116	1.038	1.065	1.027	1.003	1.295	1.342	1.115	1.054	0.966	0.835	1.113
c	3.497	4.138	1.486	4.122	4.108	3.886	5.084	1.935	3.711	3.438	3.108	3.217	3.957
ADRAR													
V	6.450	7.080	7.520	7.051	7.040	6.750	6.990	7.080	6.770	6.560	6.080	6.190	6.850
K	1.818	1.888	1.792	1.829	1.761	1.687	1.829	1.793	1.721	1.753	1.800	1.833	1.774
c	6.245	6.600	6.995	7.309	6.452	6.125	3.661	6.506	6.193	5.929	5.506	5.617	6.335
AIN-SEFRA													
V	3.030	2.950	3.620	3.980	4.060	3.970	3.460	3.350	3.410	2.890	2.700	2.580	3.340
K	0.852	0.844	0.919	1.026	1.065	1.103	1.017	1.020	0.956	0.817	0.802	0.790	0.976
c	1.876	1.787	2.427	2.826	2.916	2.869	2.361	2.276	2.307	1.706	1.529	1.432	2.232

Tableau : La variation mensuelle et annuelle de la vitesse du vent et de paramètres K et c

Annexe : B

	pompe de Grundfos 10-7			pompe de Grundfos 10-10			
<u>Tamenrasset</u>	<u>H=20</u>	<u>H=40m</u>	<u>H=60m</u>	<u>H=20</u>	<u>H=40m</u>	<u>H=60m</u>	<u>H=80m</u>
Janv	22,9853	9,3286	2,967	17,4202	12,9635	7,5239	4,5662
Févr	26,7808	10,8871	3,4425	20,126	14,9612	8,6945	5,3174
Mars	34,1546	13,935	4,3787	25,3996	18,8758	10,9964	6,7901
Avr	35,0953	14,2585	4,4475	25,9545	19,2049	11,1648	6,929
Mai	32,8472	13,4833	4,2884	24,6602	18,4489	10,7809	6,5992
Juin	33,383	13,7309	4,3783	25,096	18,8075	11,0027	6,7266
Juil	33,0382	13,6041	4,35	24,895	18,6831	10,9359	6,6713
Août	31,2216	12,7817	4,0591	23,4479	17,5116	10,2179	6,2524
Sept	30,7951	12,6191	4,0187	23,1841	17,3372	10,1212	6,1792
Oct	26,1724	10,6392	3,3681	19,6981	14,6482	8,512	5,1986
Nov	20,7323	8,4006	2,6824	15,8084	11,7694	6,823	4,1181
Déc	19,6073	7,9192	2,5133	14,8835	11,0422	6,3906	3,8734
Ann	28,5956	11,6963	3,7299	21,5973	16,1444	9,4136	5,7304
<u>El-oued</u>	<u>H=20</u>	<u>H=40m</u>	<u>H=60m</u>	<u>H=20</u>	<u>H=40m</u>	<u>H=60m</u>	<u>H=80m</u>
Janv	14,7453	5,9057	1,9968	11,3173	8,3649	5,102	3,3012
Févr	17,1502	6,8868	2,3015	13,0504	9,6429	5,8568	3,7886
Mars	19,0407	7,6799	2,6129	14,607	10,851	6,6527	4,3126
Avr	23,2882	9,4559	3,2179	17,7999	13,2732	8,1571	5,295
Mai	21,7254	8,8103	3,0714	16,842	12,5998	7,8221	5,0864
Juin	18,584	7,4322	2,6985	14,8121	11,0785	6,968	4,5363
Juil	15,8991	6,3527	2,2547	12,5482	9,3389	5,8132	3,7749
Août	14,3544	5,7273	2,0123	11,2826	8,3747	5,187	3,3639
Sept	18,6	7,4938	2,5363	14,2341	10,5583	6,4561	4,1825
Oct	17,5951	7,0734	2,3738	13,415	9,9253	6,0418	3,91
Nov	17,5752	7,0439	2,3156	13,254	9,7583	5,8804	3,798
Déc	14,1971	5,6812	1,9291	10,9295	8,0794	4,9355	3,1939
Ann	17,3222	6,9681	2,4004	13,4043	9,9623	6,1352	3,9791
<u>Sidi-Belasses</u>	<u>H=20</u>	<u>H=40m</u>	<u>H=60m</u>	<u>H=20</u>	<u>H=40m</u>	<u>H=60m</u>	<u>H=80m</u>
Janv	18,0106	6,3353	2,357	13,6173	8,8899	5,9887	3,8104
Févr	17,0633	6,1064	2,1896	12,7939	8,4671	5,5578	3,5379
Mars	16,1298	5,4289	2,1718	12,4378	7,8573	5,5544	3,5242
Avr	17,4709	5,8817	2,3622	13,4683	8,5126	6,0344	3,8306
Mai	14,2396	4,5181	1,9587	11,2433	6,8216	5,0656	3,1986
Juin	12,8657	3,9965	1,7712	10,2428	6,1264	4,6062	2,9017
Juil	14,9277	5,0749	1,9899	11,4638	7,2923	5,0874	3,2281
Août	11,8966	3,7475	1,6255	9,4267	5,685	4,2207	2,6604
Sept	11,5186	3,6137	1,5733	9,1423	5,4975	4,09	2,5766
Oct	12,5844	4,1503	1,6942	9,7927	6,0923	4,3599	2,7586
Nov	15,4751	5,2611	2,066	11,883	7,5599	5,2796	3,3508
Déc	18,2378	6,4506	2,3755	13,753	9,0173	6,0318	3,8389
Ann	14,9933	5,0086	2,0206	11,600	7,2872	5,1784	3,2828
<u>In Amenas</u>	<u>H=20</u>	<u>H=40m</u>	<u>H=60m</u>	<u>H=20</u>	<u>H=40m</u>	<u>H=60m</u>	<u>H=80m</u>
janv	10,1288	3,6876	1,3598	8,4104	5,8312	3,4684	1,235
févr	18,8999	7,5076	2,6196	14,6373	10,3876	6,1731	4,021
mars	25,6065	10,2355	3,6351	19,9023	14,2647	8,5703	5,256
avr	26,0924	10,4815	3,685	20,1364	14,4166	8,6302	4,598
mai	26,6078	10,6291	3,7997	20,741	14,8976	8,9789	5,112
juin	19,4389	7,4611	2,7373	15,6345	11,1159	6,7072	4,365
juil	19,4579	7,4463	2,7396	15,6859	11,1492	6,7315	3,251
août	14,6716	5,4343	2,0151	12,0671	8,4666	5,0809	2,568
sept	12,7656	4,6546	1,7302	10,5967	7,3852	4,4157	2,121
oct	16,1924	6,2074	2,2531	12,9981	9,1923	5,5124	3,121
nov	8,9807	3,2621	1,1997	7,4652	5,1615	3,0631	1,568
déc	10,1772	3,7947	1,3801	8,3124	5,7956	3,4477	2,001
janv	16,8568	6,4893	2,3513	13,4914	9,5554	5,7324	2,369

Tableau : Les valeurs mensuelles et annuelles du débit de l'eau pompé

Annexe : B

	pompe de Grundfos 10-7			pompe de Grundfos 10-10			
Ain-Sefra	H=20	H=40m	H=60m	H=20	H=40m	H=60m	H=80m
janv	22,5687	8,9244	2,8209	17,1401	12,8863	7,4048	4,89
févr	21,9089	8,6621	2,7397	16,655	12,5217	7,1948	5,11
mars	27,4739	10,8828	3,4279	20,7389	15,5981	8,9711	5,23
avr	30,3529	12,1606	3,863	22,9844	17,4177	10,0791	6,23
mai	30,9573	12,4626	3,9763	23,4934	17,8621	10,3641	6,58
juin	29,665	12,0237	3,8723	22,6745	17,3283	10,0937	6,81
juil	24,8473	10,0099	3,2254	19,0916	14,5436	8,4443	5,63
août	23,5257	9,4898	3,0709	18,1597	13,8528	8,0497	6,12
sept	25,1038	10,0341	3,2005	19,1453	14,4995	8,381	5,23
oct	21,689	8,5452	2,6928	16,4475	12,3346	7,074	5,02
nov	20,1051	7,9243	2,503	15,2913	11,4739	6,582	4,12
déc	19,1506	7,546	2,3856	14,586	10,9444	6,2773	4,32
Ann	24,0938	9,6654	3,1015	18,4709	14,0293	8,1264	5,65
Adrar	H=20	H=40m	H=60m	H=20	H=40m	H=60m	H=80m
janv	73,3302	29,7866	9,1118	53,5723	40,3658	23,0169	20,36
févr	81,3544	32,7634	9,982	58,7612	44,0899	25,2638	22,45
mars	81,286	32,0177	9,6645	58,3857	43,2966	24,6959	21,81
avr	79,4384	31,8145	9,6709	57,4079	42,9464	24,5453	21,69
mai	77,3601	30,7704	9,3273	55,9205	41,6797	23,7531	20,69
juin	73,0225	29,0259	8,7974	53,0106	39,4909	22,4304	19,98
juil	78,9445	31,6703	9,6341	57,1057	42,7579	24,4366	21,86
août	78,6076	31,338	9,508	56,7863	42,3778	24,1837	22,36
sept	74,1367	29,5638	8,9722	53,8082	40,155	22,8397	19,35
oct	73,0571	29,3827	8,9498	53,2245	39,8966	22,706	19,98
nov	68,3538	27,9157	8,5615	50,3581	38,0424	21,6062	19,11
déc	70,371	28,792	8,8368	51,7329	39,1211	22,2701	19,65
Ann	76,2486	30,5192	9,276	55,2771	41,3354	23,565	21,15
In Salah	H=20	H=40m	H=60m	H=20	H=40m	H=60m	H=80m
janv	36,744	14,6924	4,3044	27,2247	20,7195	11,2498	10,25
févr	43,7727	17,7846	5,2281	32,4115	24,9209	13,5898	12,36
mars	44,0755	17,4641	5,1366	32,4181	24,4596	13,3997	11,65
avr	43,2804	17,3671	5,1051	31,9534	24,344	13,2971	11,96
mai	42,2396	16,8422	4,9486	31,1553	23,6289	12,9074	10,56
juin	39,4503	15,838	4,6459	29,2081	22,2821	12,1215	10,23
juil	52,5582	21,5385	6,3653	38,7387	29,9032	16,4494	14,58
août	52,2524	21,7413	6,4251	38,6597	30,1774	16,5631	14,36
sept	39,7597	16,4428	4,8188	29,6843	23,1543	12,5228	10,54
oct	37,2986	15,336	4,4884	27,8571	21,6506	11,6885	9,89
nov	34,2492	13,9318	4,0722	25,5572	19,719	10,6345	9,56
déc	33,806	13,2753	3,8867	24,9626	18,7488	10,1928	8,98
Ann	42,296	17,2921	5,0781	31,407	24,2711	13,1981	10,69
Djanet	H=20	H=40m	H=60m	H=20	H=40m	H=60m	H=80m
Janv	20,5188	8,4971	2,6326	15,6945	12,3155	6,9178	4,58
Févr	22,8621	9,6418	3,0122	17,6078	14,0053	7,8976	5,68
Mars	30,9432	12,895	3,9969	23,4274	18,407	10,4213	9,12
Avr	34,3238	14,4171	4,4809	25,9673	20,5011	11,6478	9,89
Mai	36,6267	15,4724	4,8187	27,6955	21,9411	12,498	10,58
Juin	34,3356	14,507	4,5214	26,0372	20,6466	11,7448	9,87
Juil	35,3585	15,2773	4,8112	27,0294	21,7858	12,4563	10,56
Août	33,3676	14,1525	4,42	25,3751	20,187	11,4845	9,89
Sept	30,9009	13,3031	4,188	23,7473	19,1256	10,8892	8,98
Oct	22,1278	9,4663	2,9798	17,2228	13,862	7,8205	5,86
Nov	16,2401	6,9533	2,1959	12,8504	10,3903	5,8145	4,56
Déc	17,97	7,5746	2,3694	13,9626	11,127	6,244	4,25
Ann	27,6548	11,7352	3,6719	21,2071	16,9154	9,5841	8,69

Tableau : Les valeurs mensuelles et annuelles du débit de l'eau pompé.

Annexe : B

	Pompe de Grundfos 10-15				Pompe Grundfos 7S10-19			
Tamanrasset	H=20	H=40m	H=60m	H=80m	H=20m	H=40m	H=60m	H=80m
Janv	13,2092	10,613	8,0843	5,8983	10,2904	8,3129	6,8812	5,3507
Févr	15,0959	12,1373	9,2141	6,774	11,7626	9,4555	7,8076	6,1018
Mars	18,7858	15,1334	11,4459	8,5011	14,6439	11,7061	9,6406	7,5868
Avr	19,0751	15,3137	11,5261	8,5921	14,8632	11,8055	9,6833	7,6363
Mai	18,4328	14,9276	11,3786	8,3987	14,378	11,6114	9,6242	7,5476
Juin	18,7808	15,2343	11,6315	8,5814	14,6527	11,8576	9,8422	7,7178
Juil	18,6784	15,1678	11,6008	8,5455	14,5747	11,8216	9,8262	7,6986
Août	17,5445	14,1805	10,7978	7,9606	13,6812	11,0353	9,1378	7,159
Sept	17,3951	14,0732	10,7347	7,9005	13,5663	10,9675	9,0945	7,1179
Oct	14,8026	11,9023	9,0423	6,6391	11,534	9,2811	7,668	5,9877
Nov	12,0805	9,6983	7,4037	5,3724	9,4093	7,6255	6,3219	4,8982
Déc	11,3227	9,062	6,8916	5,0136	8,8154	7,1087	5,8748	4,5573
Ann	16,2749	13,1528	10,04	7,3652	12,6901	10,2722	8,5217	6,6547
El-oued	H=20	H=40m	H=60m	H=80m	H=20m	H=40m	H=60m	H=80m
Janv	8,7404	6,9505	5,5732	4,2933	6,7998	5,4926	4,7717	3,9145
Févr	9,9674	7,9392	6,3134	4,8648	7,7569	6,2401	5,3822	4,407
Mars	11,2477	9,0009	7,2418	5,5968	8,7592	7,1044	6,1899	5,0896
Avr	13,6201	10,9569	8,8105	6,8264	10,6155	8,6232	7,509	6,1801
Mai	13,0941	10,5491	8,6167	6,6896	10,2072	8,3678	7,3862	6,1087
Juin	11,8803	9,5412	7,9886	6,2075	9,2563	7,6821	6,9257	5,7676
Juil	9,9872	7,9742	6,5919	5,1006	7,7743	6,3952	5,703	4,7239
Août	8,9519	7,126	5,8562	4,5219	6,9649	5,7056	5,0626	4,183
Sept	10,9334	8,7383	7,0068	5,4106	8,5129	6,8884	5,9843	4,9145
Oct	10,2664	8,1866	6,5283	5,0337	7,9909	6,4412	5,5691	4,5643
Nov	10,0162	7,9619	6,2595	4,815	7,7932	6,2245	5,3155	4,337
Déc	8,4729	6,7345	5,4157	4,172	6,5911	5,3316	4,6435	3,812
Ann	10,4315	8,3386	6,7651	5,2293	8,1218	6,6156	5,8057	4,784
Sidi-Belasses	H=20	H=40m	H=60m	H=80m	H=20m	H=40m	H=60m	H=80m
Janv	10,3197	7,3316	6,4046	4,8617	8,0307	5,7684	5,4465	4,3916
Févr	9,6048	6,912	5,8763	4,4588	7,4707	5,4056	4,98	4,0068
Mars	9,6489	6,637	6,113	4,6304	7,5097	5,2937	5,2446	4,2393
Avr	10,4366	7,1902	6,6333	5,0299	8,1255	5,7341	5,6876	4,6012
Mai	8,966	5,9338	5,7723	4,3526	6,9755	4,8082	5,0034	4,0494
Juin	8,2529	5,3829	5,3171	3,9976	6,4172	4,3854	4,6272	3,7422
Juil	8,8584	6,127	5,5706	4,2167	6,892	4,8729	4,7731	3,8527
Août	7,5635	4,963	4,8424	3,6399	5,8794	4,0308	4,2082	3,3993
Sept	7,3516	4,8087	4,705	3,5339	5,7138	3,9098	4,0924	3,3048
Oct	7,6939	5,2002	4,8714	3,675	5,9829	4,1728	4,2007	3,3906
Nov	9,1784	6,3517	5,7786	4,376	7,1419	5,0514	4,9502	3,997
Déc	10,3901	7,4132	6,4263	4,8789	8,085	5,8218	5,4584	4,3992
Ann	9,0392	6,1794	5,7299	4,335	7,0335	4,9397	4,9247	3,9796
In Amenas	H=20	H=40m	H=60m	H=80m	H=20m	H=40m	H=60m	H=80m
janv	4.5698	3.4387	2.8621	1,658	6.5106	5.1090	4.392	2,154
févr	8.1918	6.2864	4.9417	2,365	10.2426	7.9248	6.554	4,365
mars	11.1112	8.6145	6.8623	4,103	14.0099	10.9464	9.127	5,986
avr	11.2796	8.7312	6.8914	3,989	14.0157	10.9021	9.031	6,260
mai	11.5621	8.9851	7.1960	4,589	14.6671	11.4970	9.620	6,650
juin	8.5984	6.6264	5.4512	2,311	11.5700	9.1408	7.799	5,120
juil	8.6177	6.6402	5.4764	2,458	11.6439	9.2089	7.870	4,980
août	6.5766	5.0069	4.1734	2,1487	9.2078	7.2756	6.263	4,360
sept	5.7547	4.3534	3.6432	1,956	8.1873	6.4609	5.576	3,690
oct	7.1583	5.4863	4.4782	2,132	9.5996	7.5381	6.399	4,110
nov	4.0556	3.0433	2.5289	1,154	5.7912	4.5335	3.893	1,580
déc	4.5482	3.4392	2.8238	1,321	6.2977	4.9229	4.196	2,100
janv	7.4391	5.7091	4.6508	2154	9.9216	7.7894	6.6034	4,45

Tableau : Les valeurs mensuelles et annuelles du débit de l'eau pompé.

Annexe : B

	pompe de Grundfos 10-15				pompe Grundfos 7S10-19			
Ain-Sefra	H=20	H=40m	H=60m	H=80m	H=20m	H=40m	H=60m	H=80m
janv	9,91	8,1598	6,3139	4,7486	7,7109	6,3806	5,3656	4,287
févr	9,6243	7,9247	6,135	4,6119	7,4881	6,2004	5,2162	4,1666
mars	12,0311	9,9096	7,6471	5,7686	9,366	7,721	6,4781	5,1833
avr	13,2852	11,029	8,5717	6,471	10,349	8,6144	7,2721	5,8281
mai	13,5515	11,2889	8,8052	6,6467	10,5588	8,8311	7,4781	5,9963
juin	13,0089	10,8964	8,5624	6,4518	10,1371	8,5637	7,2976	5,8525
juil	10,9292	9,1249	7,1718	5,3851	8,5103	7,1922	6,1291	4,9049
août	10,3649	8,667	6,8345	5,1226	8,0695	6,8506	5,8541	4,6822
sept	11,023	9,1462	7,1305	5,3634	8,5818	7,1738	6,0716	4,8574
oct	9,5236	7,821	6,0364	4,5395	7,4088	6,109	5,126	4,0936
nov	8,8381	7,2625	5,6159	4,2183	6,8745	5,6831	4,7762	3,8125
déc	8,4237	6,922	5,3562	4,0204	6,5515	5,4212	4,5586	3,6376
Ann	10,5955	8,8188	6,9082	5,1878	8,2487	6,94	5,8975	4,7171
Adrar	H=20	H=40m	H=60m	H=80m	H=20m	H=40m	H=60m	H=80m
janv	31,4856	25,9	19,3568	14,7643	24,6365	19,8826	16,2048	13,0446
févr	34,8765	28,571	21,3339	16,3911	27,2708	21,7485	17,7343	14,3183
mars	34,9217	28,2806	20,9957	16,1478	27,2587	21,4056	17,3796	14,0139
avr	34,0902	27,8452	20,7561	15,9285	26,6445	21,1941	17,2556	13,917
mai	33,2374	27,0505	20,122	15,4246	25,964	20,5811	16,7263	13,4745
juin	31,4118	25,5523	18,9924	14,5124	24,537	19,4969	15,8265	12,7278
juil	33,8775	27,6954	20,6518	15,8409	26,4818	21,0967	17,1798	13,8543
août	33,7554	27,5057	20,4765	15,7084	26,3733	20,9224	17,0161	13,7161
sept	31,8727	25,9716	19,323	14,7735	24,9032	19,8193	16,1022	12,957
oct	31,3959	25,6954	19,1551	14,6212	24,5472	19,6726	16,0033	12,8759
nov	29,3873	24,2363	18,1198	13,7443	23,0048	18,7197	15,2477	12,2461
déc	30,2289	24,955	18,6733	14,1901	23,6668	19,2494	15,6947	12,6188
Ann	32,7512	26,7407	19,9204	15,2506	25,5969	20,3964	16,5913	13,364
In Salah	H=20	H=40m	H=60m	H=80m	H=20m	H=40m	H=60m	H=80m
janv	16,0121	13,3609	9,6175	7,2794	12,4638	10,2662	8,0777	6,4571
févr	19,0307	16,0567	11,5847	8,7917	14,8285	12,3358	9,7288	7,7973
mars	19,1612	15,8513	11,4634	8,7048	14,9178	12,1213	9,5893	7,6745
avr	18,8198	15,7264	11,3559	8,6184	14,6575	12,0573	9,5202	7,6236
mai	18,3734	15,2803	11,0339	8,3715	14,3059	11,707	9,2448	7,3986
juin	17,1765	14,3703	10,3546	7,8453	13,3744	11,0374	8,6939	6,9556
juil	22,7762	19,3059	13,9933	10,664	17,7636	14,7914	11,7237	9,4233
août	22,6417	19,4179	14,0583	10,7119	17,668	14,9159	11,8041	9,4976
sept	17,3159	14,829	10,6527	8,0635	13,4957	11,4539	8,9871	7,2018
oct	16,2588	13,869	9,9536	7,5265	12,667	10,7141	8,3984	6,7232
nov	14,9437	12,6481	9,0723	6,8535	11,6359	9,7643	7,6502	6,1162
déc	14,7412	12,1308	8,7374	6,6107	11,4661	9,298	7,3233	5,8455
Ann	18,3993	15,6053	11,2423	8,5245	14,3378	12,0114	9,4562	7,5786
Djanet	H=20	H=40m	H=60m	H=80m	H=20m	H=40m	H=60m	H=80m
Janv	9,0304	7,7764	5,8943	4,5144	7,0255	6,0974	5,0242	4,09
Févr	10,0696	8,798	6,7114	5,1513	7,8383	6,9278	5,7387	4,6888
Mars	13,5403	11,6797	8,8623	6,8162	10,5487	9,1037	7,5133	6,1248
Avr	14,9987	13,0053	9,8912	7,6223	11,6914	10,1334	8,381	6,8427
Mai	15,9893	13,9161	10,6022	8,1817	12,4685	10,8406	8,98	7,3401
Juin	15,0088	13,0747	9,9651	7,6843	11,701	10,2024	8,4528	6,9096
Juil	15,4688	13,7116	10,5327	8,1462	12,0676	10,7528	8,9669	7,3644
Août	14,5976	12,7601	9,7397	7,5113	11,3803	9,9742	8,2732	6,7683
Sept	13,5585	12,0073	9,2175	7,1128	10,5701	9,445	7,8691	6,458
Oct	9,7762	8,6505	6,6348	5,0943	7,6096	6,8539	5,7012	4,6717
Nov	7,2316	6,43	4,9393	3,7759	5,6206	5,1422	4,2785	3,5052
Déc	7,9493	6,9587	5,3109	4,0658	6,1824	5,5073	4,5612	3,7255
Ann	12,1452	10,6445	8,1326	6,2583	9,4616	8,3614	6,9377	5,6762

Tableau : Les valeurs mensuelles et annuelles du débit de l'eau pompé.

Annexe : C

	H = 10m	H = 20m	H = 40m	H = 60m
Adrar				
Bergey 1kw	2271,7	3261,7	3603,7	3786,8
NCLIN 250	656,2	968,1	1083,8	1150,5
CLIN 1500	4592,8	6553,4	7278,4	7694
INCLIN 600	1607,5	2342	2613	2768,2
INCLIN 3000	8794	12645	14073	14894
FORTIS ESPADA	1312,7	2173,9	2504,1	2701,3
Bergey Scirocco	12924	19113	21296	22495
Bergey BWCEXCEL	9390	15751	18108	19476
Bergey BWC 1000	2726,3	3949,2	4383,4	4623
Djanet				
Bergey 1kw	671,6	1194,2	1483	1656,2
NCLIN 250	216930	371,2426	456,2698	506,93
CLIN 1500	1565,1	2619,9	3197	3538,4
INCLIN 600	531	906	1112,2	1234,8
INCLIN 3000	3020,8	5042,9	6150,8	6807,1
FORTIS ESPADA	374,9	724,2	920,4	1039,1
Bergey Scirocco	3778,4	6821,8	8510,8	9526,9
Bergey BWCEXCEL	2403	4870	6266,2	7121,1
Bergey BWC 1000	848,4	1477,2	1824,2	2031,7
M'sila				
Bergey 1kw	869,5	1649,1	1891,1	2016,7
NCLIN 250	275,4394	505,9752	575,5303	610,0531
CLIN 1500	1983,2	3529,3	3997,4	4230,4
INCLIN 600	675	1232,1	1400,6	1484,6
INCLIN 3000	3816	6791,3	7690,6	8137,2
FORTIS ESPADA	487,4	1041,4	1202,7	1279,5
Bergey Scirocco	4896	9494	10912	11641
Bergey BWCEXCEL	3178,1	7120,5	8308,8	8902,4
Bergey BWC 1000	1087,6	2024,5	2313,1	2461
Ain-saфра				
Bergey 1kw	450,9	1036,2	1213,6	1388,5
NCLIN 250	150,0735	326,4551	378,7443	431,046
CLIN 1500	1088	2301,4	2663,1	3018
INCLIN 600	367	795,6	923,1	1049,8
INCLIN 3000	2110	4437,2	5129,6	5811,6
FORTIS ESPADA	246,6377	640,7755	753,0996	874,9988
Bergey Scirocco	2527,9	5931,9	6956,2	7981,5
Bergey BWCEXCEL	1534	4252,4	5048,7	5902,1
Bergey BWC 1000	579	1288,4	1502,2	1713,3
Djelfa				
Bergey 1kw	899,9	1727,2	1940,4	2065,7

Annexe : C

NCLIN 250	283,8816	540,3661	603,3165	639,2717
CLIN 1500	2028	3739,6	4162,5	4403,6
INCLIN 600	694,3	1311,3	1463,4	1550,4
INCLIN 3000	3906,1	7209,6	8023,5	8487,2
FORTIS ESPADA	520,1	1166,8	1315,1	1398
Bergey Scirocco	5096	10033	11290	12026
Bergey BWCEXCEL	3430,2	7808,6	8880,1	9503,4
Bergey BWC 1000	1122,7	2130,6	2387,2	2536,8
Sidi-belabbes				
Bergey 1kw	397,2	870,5	1075,9	1199,8
NCLIN 250	133,7836	275,8383	336,7994	373,0754
CLIN 1500	972,4	1958,6	2380,9	2631,4
INCLIN 600	327,0592	673,2509	821,8338	910,2709
INCLIN 3000	1889	3777,7	4586,1	5065,4
FORTIS ESPADA	214,7207	520,0649	651,3301	729,854
Bergey Scirocco	2222,6	4955,5	6141,2	6856,7
Bergey BWCEXCEL	1317,3	3428,2	4348,3	4907,2
Bergey BWC 1000	513,4	1087,1	1335,1	1484
Bachar				
Bergey 1kw	1051,4	1685,1	1996,5	2267
NCLIN 250	327,6181	513,8271	604,8529	688,2346
CLIN 1500	2343,2	3588,5	4194,7	4739,4
INCLIN 600	802,4	1252,2	1471,8	1671,1
INCLIN 3000	4503,5	6901,1	8069,3	9125,9
FORTIS ESPADA	600,8	1049,1	1269	1486,8
Bergey Scirocco	5943	9684	11526	13163
Bergey BWCEXCEL	3995	7216	8815	10344
Bergey BWC 1000	1304,5	2064,6	2437,6	2767
InSalah				
Bergey 1kw	1157,2	1831,8	2168,4	2264,8
NCLIN 250	361,1863	577,8323	690,0068	715,7256
CLIN 1500	2546,6	3983	4721,1	4894,3
INCLIN 600	880,9	1400	1667,5	1730,1
INCLIN 3000	4904,4	7684,1	9116,6	9448,8
FORTIS ESPADA	708,1	1278,8	1587,6	1639,6
Bergey Scirocco	6618	10687	12743	13303
Bergey BWCEXCEL	4744	8472	10426	10881
Bergey BWC 1000	1433,4	2263,3	2681,8	2795,2
Ine Amenas				
Bergey 1kw	1071	1716	2034	2309
NCLIN 250	334	523	616	701
CLIN 1500	2387	3655	4273	4828
INCLIN 600	817	1275	1499	1702
INCLIN 3000	4587	7029	8219	9296

Annexe : C

FORTIS ESPADA	612	1069	1293	1514
Bergey Scirocco	6054	9864	11740	13408
Bergey BWCEXCEL	4069	7350	8979	10536
Bergey BWC 1000	1329	2103	2483	2818

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Benoudjit. *Etude pour la conception d'un banc d'essais pour énergie éolienne*. Thèse de Magister en Electrotechnique. Université de Batna. Juin 2004.
- [2] J Hladik. *Energétique éolienne, Chauffage éolien. Production d'électricité. Pompage*, Edition : Masson. France.1984.
- [3] O. V Marchenks, S.V. Solomin. *Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia*. Renewable Energy, 29, 1793-1809, 2004.
- [4] Guy Cunty. *Eoliennes et aérogénérateurs*, Guide de l'énergie éolienne. 1984.
- [5] T. Ackermann, L. Söder. *An Overview of Wind Energy-Status 2002*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 6, pp. 67-128, 2002.
- [6] C. Bourillon. *Wind Energy, Clean Power for Generations*. Renewable Energy, Vol. 16, pp. 948-953, 1999.
- [7] EWEA Publications, WIND FORCE 12: *A Blueprint To Achieve 12% of the World's Electricity from Wind Power by 2020*.in: <http://www.ewea.org/doc/WindForce12.pdf>
- [8] H. Camblong. *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable*. L'école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. 18 décembre 2003.
- [9] M. Kotner. *Renewable Energie World, Biomass, Wind power, Solar electricity, Small hydro, Wave energy, Solar thermal, Cogeneration, Geothermal*. July-August 2001.
- [10] G. Hoogers, L. Poter. *Renewable Energie World. Fuel cells. Rural energy. Distributed generation. Solar hot water. Achivments and potential*. News. January 1999.
- [11] Peter Fardy. *Renewable Energie World. Biomass. Wind power. Solar electricity. Small hydro. Solar thermal. Geothermal. Hydrogen*. July-August 2000.
- [12] M.H. Abderrazzak. *Energy production assesement of small wind farms*. Renewable Energy, 29, 2261-2272, 2004.
- [13] Francis Milsant, *Machines Electriques: machines synchrones et asynchrones. Commande électronique*. Edition : Berti, 1993.

- [14] S. Heier. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. Editeur: J. Wiley et Sons. Date de publication : 1998-11. ISBN 0-471-97143-X.
- [15] J.L.Rodríguez. *Análisis Dinámico y Diseño del Sistema de Control de Aeroturbinas de Velocidad Variable con Generador Asíncrono de Doble Alimentación*, Thèse de Doctorat. Université Carlos III de Madrid, 2000.
- [16] J.L.Rodriguez-Amenedo, S. Arnalte, J.C.Burgos. *Design Criteria of Variable Speed Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator*. European Wind Energy Conference Proceedings, Copenhagen, Vol. 1, pp.118-124, 2001.
- [17] E.A. Bossanyi. *The Design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines*. Wind Energy, Vol. 3, pp. 149-163, 2000.
- [18] F. Youcef Ettoumi, H. Sauvageot, and A. Adane. *Statistical bivariate modelling of wind using first-order markov chain and weibull distribution*. Renewable Energy, 28, 1787-1802, 2003.
- [19] Hofzullah Aksoy, Z. Fuat Toprak, A. Aytek, N. Erdem Ünal, *Stochastic generation of hourly mean wind speed data*. Renewable Energy, 29, 2111-2131, 2004.
- [20] F. Youcef Ettoumi. *Analyse et Modélisation Multiparamètres en Météorologie : Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie*. Thèse de Doctorat d'Etat. USTHB, Janvier 2002.
- [21] A. Hamidat. *Simulation des systèmes de pompage photovoltaïques destinés pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation*. Thèse de doctorat. CDER. Tlemcen 2003.
- [22] K. Ameer et O. Guerri, *Optimisations d'un système de pompage par aérogénérateur*. ENERSOL 01. Adrar 2001.
- [23] B.D. Vick and R.N. Clark. *Five Years of Experimental Testing with a 1,5 Kilowatt Wind Turbine*. USDA Agricultural Research Service. USA. 1998.
- [24] K. Ameer et S. Moussa. *Alimentation d'une Maison Isolée par un Aérogénérateur de 1kw*. CDER. Alger. 2005.
- [25] *Les systèmes éoliens autonomes, guide de l'acheteur*. Ressources naturelles Canada. 2000.