

Département d'Electrotechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
d'ingénieur d'état en Electrotechnique

**PFE**

*Intitulé*

**Dimensionnement d'un système de pompage hybride (Photovoltaïque/éolien)  
complètement autonome destiné à l'irrigation dans un site isolé**

**Présenté par :**

FAKED Hocine

**Sous la direction de :**

Mr : BAKELLI Yahia

Mr : KAABECHE Abdelhamid

Mr : BOUGHRARA Kamel

**Présenté et soutenu le 07/07/2021**

**Composition du jury :**

**Président :**

**A. HELLAL**

**Professeur à l'ENP**

**Promoteurs :**

**Y.BAKELLI**

**Docteur d'état au CDER**

**A.KAABECHE**

**Docteur d'état au CDER**

**Co-promoteur :**

**K.BOUGHRARA**

**Professeur à l'ENP**

**Examineur :**

**R. BELKACEMI**

**Docteur d'état à l'ENP**

**ENP 2021**



Département d'Electrotechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
d'ingénieur d'état en Electrotechnique

**PFE**

*Intitulé*

**Dimensionnement d'un système de pompage hybride (Photovoltaïque/éolien)  
complètement autonome destiné à l'irrigation dans un site isolé**

**Présenté par :**

FAKED Hocine

**Sous la direction de :**

Mr : BAKELLI Yahia

Mr : KAABECHE Abdelhamid

Mr : BOUGHRARA Kamel

**Présenté et soutenu le 07/07/2021**

**Composition du jury :**

**Président :**

**A. HELLAL**

**Professeur à l'ENP**

**Promoteurs :**

**Y.BAKELLI**

**Docteur d'état au CDER**

**A.KAABECHE**

**Docteur d'état au CDER**

**Co-promoteur :**

**K.BOUGHRARA**

**Professeur à l'ENP**

**Examineur :**

**R. BELKACEMI**

**Docteur d'état à l'ENP**

**ENP 2021**



## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à :*

*Ma chère mère Lynda qui représente pour moi la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi,*

*Mon cher père HACHIMI qui a consacré toute sa vie à mon éducation,*

*Mon frère Yanis et ma sœur Céline qui n'ont jamais cessé de m'encourager,*

*Mon meilleur ami Massil qui a toujours été là dans les moments difficiles pour me tirer vers le haut.*

*Mes amis et toutes les personnes qui m'aiment.*

## Remerciements

Avant tout remerciement, louange à dieu, en tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, de m'avoir donné la force ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés et de franchir tous les obstacles.

Ma plus grande gratitude va ensuite à mes encadreurs, Monsieur Yahia BAKELLI et Monsieur Abdelhamid KAABECHE pour leur disponibilité et la confiance qu'ils m'ont accordée.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à Monsieur Abdelhafid HELLAL professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens également à remercier Monsieur Rabie BELKACEMI Docteur d'état à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger d'avoir accepté de juger ce mémoire.

Ces remerciements ne sauraient être complets si je ne citais les personnes qui m'ont encouragé et soutenu durant toutes ces années :

Je tiens en premier lieu à remercier mes chers parents qui ont éclairé mon chemin et qui m'ont encouragé et soutenu, c'est grâce à leurs encouragements que j'ai pu mener ce travail à son aboutissement, qu'ALLAH les protège et les garde aussi longtemps parmi nous et pour nous.

Je tiens aussi à remercier mon frère Yanis, ma sœur Céline, mes grands-parents et tous les membres de ma famille qui m'ont vivement aidé durant la préparation de ce mémoire.

Je remercie enfin toutes les personnes qui m'ont aidé de près et de loin lors de la réalisation et l'élaboration de ce travail.

يعد التحجيم خطوة أساسية في تحسين أنظمة الطاقة المتجددة، نظرًا لطبيعتها المتقطعة، والتي تعتمد كليًا على الظروف الطبيعية. تحقيقًا لهذه الغاية ، نقدم في هذا العمل منهجية لإيجاد الحجم الأمثل لنظام الضخ الهجين (الطاقة الكهروضوئية / طاقة الرياح) بناءً على معيارين ، وهما: معيار الموثوقية على أساس مفهوم احتمال عجز في المياه (LWSP) و معيار التكلفة على أساس تكلفة خلال دورة الحياة (LCC). المعلومات المقدمة في عملية التحجيم الأمثل هي : طاقة المولد الكهروضوئي ، طاقة مولد الرياح وسعة التخزين لخزان المياه. أجريت هذه الدراسة في موقع تميمون بهدف ري حقل من النخيل بمساحة هكتار واحد. يتم تقديم نتائج المحاكاة المتعلقة بتكوينات النظام المختلفة وكذلك التكاليف المقابلة لها على الفور.

الكلمات المفتاحية: نظام ضخ المياه ، النظام الهجين ، الحجم الأمثل للنظام الهجين ، احتمالية عجز المياه (LWSP) ، تكلفة خلال دورة الحياة (LCC).

### Abstract :

Sizing is an essential step in the optimization of renewable energy systems due to their intermittent nature which depends entirely on natural conditions. To this end, we present in this work a methodology for optimizing the sizing of a hybrid pumping system (photovoltaic/wind) based on two criteria: the reliability criterion based on the concept of the Loss Water Supply Probability (LWSP) and the cost criterion based on the Life Cycle Cost (LCC). The sizing parameters introduced in the optimization process are the PV generator power, the wind generator power and the water storage capacity. This study is established for the site of Timimoune for the purpose of irrigating a crop of date palms with an area of 1 ha. The simulation results related to the different system configurations and their corresponding costs are promptly presented.

Key words: Water pumping system, hybrid system, optimal sizing of a hybrid system, Loss Water Supply Probability (LWSP), Life Cycle Cost (LCC).

### Résumé :

Le dimensionnement est une étape indispensable dans l'optimisation des systèmes à énergies renouvelables et ce, du fait de leur nature intermittente qui dépend entièrement des conditions naturelles. A cet effet, nous présentons dans ce travail une méthodologie d'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage hybride (photovoltaïque/éolien) basée sur deux critères à savoir : le critère de fiabilité basé sur le concept de la probabilité de perte en eau (LWSP) et le critère de coût basé sur le coût de cycle de vie (LCC). Les paramètres du dimensionnement introduits dans le processus d'optimisation sont : la puissance du générateur PV, la puissance de l'aérogénérateur et la capacité de stockage du réservoir d'eau. Cette étude est établie pour le site de Timimoune dans le but de l'irrigation d'une culture de palmiers dattiers d'une surface de 1 ha. Les résultats de la simulation relatifs aux différentes configurations du système ainsi que leurs coûts correspondant sont promptement présentés.

Mots clé : Système de pompage, système hybride, dimensionnement optimal du système hybride, Probabilité de déficit en eau (LWSP), coût sur la durée de vie (LCC).

## Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

<b>Introduction générale</b> .....	13
<b>Chapitre 1 Situation Energétique et Ressources en eau</b> .....	15
1.1. Introduction .....	15
1.2. Les fondements des énergies renouvelables .....	15
1.2.1. Définition des énergies renouvelables.....	15
1.2.2. Les différents types des énergies renouvelables.....	16
1.3. Production d'électricité mondiale d'origine renouvelable .....	22
1.3.1. Production d'électricité d'origine renouvelable en Algérie .....	23
1.4. Potentiel des énergies renouvelables en Algérie .....	23
1.4.1. Potentiel solaire.....	24
1.4.2. Potentiel éolien.....	26
1.5. Programme des énergies renouvelables en Algérie .....	27
1.6. Recherche et développement .....	28
1.7. Ressources en eaux en l'Algérie .....	28
1.7.1. Dessalement de l'eau de mer .....	30
1.7.2. Gestion intégrée et durable de l'eau .....	30
1.7.3. Ressources en eaux du Sahara.....	31
1.8. Conclusion.....	32
<b>Chapitre 2 Modélisation énergétique des composants du système hybride de pompage</b> .....	33
2.1. Introduction .....	33
2.2. Définition des systèmes hybrides : .....	33
2.3. Le générateur photovoltaïque.....	33
2.3.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	33
2.3.2. Présentation du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque.....	34
2.3.3. Simulation du module PV KC200GT .....	35
2.3.4. Modèle à quatre paramètres.....	35
2.3.5. Caractéristiques du module photovoltaïque : L'influence de l'ensoleillement et de la température sur le générateur PV .....	36
2.4. Le générateur éolien.....	39
2.4.1. Définition de l'énergie éolienne .....	39
2.4.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne .....	39

2.4.3.	Les différents types d'éoliennes .....	39
2.4.4.	Les éoliennes à axe vertical .....	40
2.4.5.	Les éoliennes à axe horizontal.....	40
2.4.6.	Constitution d'une éolienne horizontale .....	40
2.4.7.	Modélisation du générateur éolien .....	41
2.4.8.	Courbe de puissance d'une éolienne .....	42
2.4.9.	Approximation de la courbe de puissance de l'éolienne .....	42
2.5.	Groupe moteur-pompe : GRUNDFOS SP14-8.....	44
2.5.1.	Modélisation du groupe moteur-pompe Grundfos SP14-8.....	44
2.6.	Conclusion.....	45
<b>Chapitre 3 Dimensionnement et optimisation du système de pompage hybride.....</b>		<b>47</b>
3.1.	Introduction .....	47
3.2.	Définition du dimensionnement .....	47
3.2.1.	Méthodes de dimensionnement et d'optimisation du système .....	47
3.3.	Méthodologie d'optimisation utilisée .....	48
3.4.	Modèle de la fiabilité selon le concept de LWSP.....	49
3.5.	Le déficit en eau LWS(t) .....	51
3.6.	Modèle économique.....	53
3.7.	Coût de cycle de vie .....	53
3.7.1.	Coût d'investissement initial .....	53
3.8.	Coût des composants.....	54
3.8.1.	Coût du générateur photovoltaïque .....	54
3.8.2.	Coût du générateur éolien .....	55
3.8.3.	Coût du convertisseur .....	55
3.8.4.	Coût du réservoir d'eau.....	55
3.8.5.	Coût d'installation.....	55
3.9.	Coût de maintenance du système .....	56
3.9.1.	Coût de la maintenance sur la durée de vie .....	56
3.10.	Coût de remplacement des composants .....	57
3.11.	Conclusion .....	57
<b>CHAPITRE 4 Simulation et analyse des résultats.....</b>		<b>59</b>
4.1.	Introduction .....	59
4.2.	Résultats relatifs au modèle de fiabilité .....	62
4.2.1.	Impacts de la capacité de stockage et du taux de défaillance pour une hauteur donnée sur les dimensions du système.....	62
4.2.2.	Influence du choix de la valeur de LWSP et de la capacité de stockage pour une hauteur donnée sur les dimensions du système .....	65



4.2.3.	Influence du choix de la valeur de LWSP et de la hauteur pour une capacité de stockage donnée sur les dimensions du système .....	71
4.3.	Résultats de l'application correspondant au modèle économique.....	77
4.3.1.	Influence de la capacité de stockage et du taux de défaillance LWSP pour une hauteur donnée sur le coût du système .....	77
4.3.2.	Influence du choix de la valeur de LWSP et de la hauteur pour une capacité de stockage donnée sur les dimensions du système .....	78
4.4.	Résultats du dimensionnement optimal du système .....	93
4.5.	Conclusion .....	94
<b>Conclusion générale</b> .....		<b>95</b>
<b>Références:</b> .....		<b>96</b>
<b>Annexes</b> .....		<b>99</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> Répartition du potentiel solaire en Algérie. [12].....	24
<b>Tableau 2</b> Bassins hydrographiques en Algérie[17] .....	30
<b>Tableau 3</b> Données techniques de l'éolienne 48 Volts 1000 Watts complète nouvelle génération. ...	43
<b>Tableau 4</b> coefficients du polynôme d'approximation de la courbe de puissance. ....	44
<b>Tableau 5</b> Valeurs des coefficients du modèle exponentiel modifié.....	45
<b>Tableau 6</b> Coût unitaire, durée de vie des composants du système et les taux d'inflation et d'intérêt utilisés .....	77
<b>Tableau 7</b> Les couples optimaux pour différentes LWSP et capacités de stockage, pour les Différentes hauteurs prises. ....	93

## Liste des figures

### Chapitre 01 : Situation Energétique et Ressources en eau dans le monde et en Algérie

<b>Figure 1.1</b> Les énergies renouvelables.....	17
<b>Figure 1. 2</b> Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique .....	17
<b>Figure 1. 3</b> Énergie solaire thermique.....	18
<b>Figure 1.4</b> Eolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b).....	19
<b>Figure 1. 5</b> Schéma montrant la composition d'une éolienne .....	19
<b>Figure 1. 6</b> Energie Biomasse .....	20
<b>Figure 1. 7</b> Energie géothermique .....	21
<b>Figure 1. 8</b> Energie marine .....	21
<b>Figure 1. 9</b> Evolution de la capacité mondiale d'énergie solaire photovoltaïque de 2006 à 2016. [9] ..	22
<b>Figure 1. 10</b> Evolution de la capacité mondiale d'énergie éolienne de 2006 à 2016. [9] .....	23
<b>Figure 1. 11</b> Carte de l'Irradiation Globale Annuelle Moyenne (Période 2002-2011) [13].....	25
<b>Figure 1. 12</b> Carte de l'Irradiation Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011) [13] .....	25
<b>Figure 1. 13</b> Ensoleillement annuel [14] .....	26
<b>Figure 1. 14</b> Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010) [13]. ....	27
<b>Figure 1. 16</b> Localisation géographique des bassins [14].....	30
<b>Figure 1. 17</b> Carte représentant les nappes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal.....	32

### Chapitre 02 : Modélisation des composants énergétiques du système

<b>Figure 2. 1</b> Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque. ....	34
<b>Figure 2. 2</b> Bloc correspondant à un modèle PV .....	35
<b>Figure 2. 3</b> La modélisation du panneau photovoltaïque KC200GT dans l'environnement SIMULINK sur MATLAB. ....	36
<b>Figure 2. 4</b> Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C .....	37
<b>Figure 2. 5</b> Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C .....	37
<b>Figure 2. 6</b> Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de températures à éclaircment constant 1000 .....	38
<b>Figure 2. 7</b> Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de températures à éclaircment constant 1000 W/m2 .....	38

<b>Figure 2. 8</b> Schéma global et les différentes conversions d'énergie incluent dans le système éolien [13].....	39
<b>Figure 2. 9</b> Aérogénérateur à axe verticale.....	40
<b>Figure 2. 10</b> Eolienne à axe horizontal.....	40
<b>Figure 2. 11</b> Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal [10]. .....	41
<b>Figure 2. 12</b> Courbe de puissance de l'Eolienne 48 Volts 1000 Watts complète nouvelle génération. 42	
<b>Figure 2. 13</b> La puissance de sortie de l'Eolienne 48 Volts 1000 Watts complète nouvelle génération. ....	44
<b>Figure 2. 14</b> Courbe représentant les caractéristiques de la pompe GRUNDFOS SP14-8 .....	45

### Chapitre 03 : Dimensionnement et optimisation du système de pompage hybride.

<b>Figure 3. 1</b> Schéma synoptique du système hybride de pompage de l'eau.....	48
<b>Figure 3. 2</b> Organigramme du modèle de dimensionnement optimal selon l'approche basée sur les bilans des débits d'eau.....	52
<b>Figure 3. 3</b> Historique des prix des cellules photovoltaïques. [36].....	54
<b>Figure 3. 4</b> Coût de l'énergie éolienne. [37].....	55
<b>Chapitre 04 : Simulation et analyse des résultats.</b>	

<b>Figure 4. 1</b> Profil horaire de consommation en eau adopté .....	59
<b>Figure 4. 2</b> Valeurs moyennes horaires des conditions météorologiques : (a) l'irradiation solaire sur le plan horizontal, (b) la vitesse du vent et (c) la température ambiante .....	60
<b>Figure 4. 3</b> Puissance horaire durant une année : (a) module PV, (b) l'éolienne.....	61
<b>Figure 4. 4</b> Configuration du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour h= 20 m :) 1 jr d'autonomie, b) 2 jrs d'autonomie et c) 3 jrs d'autonomie .....	62
<b>Figure 4. 5</b> Configuration du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour une hauteur de 30 mètres : a) 1 jr d'autonomie, b) 2 jrs d'autonomie et c) 3 jrs d'autonomie...63	
<b>Figure 4. 6</b> Configuration du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour une hauteur de 40mètres : a) 1 jr d'autonomie, b) 2 jrs d'autonomie et c) 3 jrs d'autonomie ...64	
<b>Figure 4. 7</b> Configuration du système en fonction de LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 20 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c)LWSP=1% et d) LWSP= 5%.....	66
<b>Figure 4. 8</b> Configuration du système en fonction de LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 30 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c)LWSP=1% et d) LWSP= 5%.....	68
<b>Figure 4. 9</b> Configuration du système en fonction de la LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 40 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c)LWSP=1% et d) LWSP= 5%.....	70
<b>Figure 4. 10</b> Configuration du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de 1 journée d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c)LWSP=1% et d) LWSP= 5%.....	72
<b>Figure 4. 11</b> Configuration du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de 2 jours d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c)LWSP=1% et d) LWSP= 5%.....	74
<b>Figure 4. 12</b> Configuration du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de 3 jours d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c)LWSP=1% et d) LWSP= 5%.....	76

<b>Figure 4. 13</b> Configuration et Coût du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour une hauteur de 20 mètres : a) 1 jr d'autonomie, b) 2 jrs d'autonomie et c) 3 jrs d'autonomie. ....	78
<b>Figure 4. 14</b> Configuration et Coût du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour une hauteur .....	79
<b>Figure 4. 15</b> Configuration et Coût du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour une hauteur de 40 mètres : a) 1 jr d'autonomie, b) 2 jrs d'autonomie et c) 3 jrs d'autonomie .....	80
<b>Figure 4. 16</b> Configuration et Coût du système en fonction de LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 20 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%. ....	82
<b>Figure 4. 17</b> Configuration et Coût du système en fonction de LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 30 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%. ....	84
<b>Figure 4. 18</b> Configuration et Coût du système en fonction de la LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 40 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%. ....	86
<b>Figure 4. 19</b> Configuration et Coût du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de 1 journée d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%. ....	88
<b>Figure 4. 20</b> Configuration et Coût du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de 2 jours d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%. ....	90
<b>Figure 4. 21</b> Configuration et Coût du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de jours d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%. ....	92

## Liste des abréviations

I	: Le courant de cellule	(A)
V	: La tension de cellule	(V)
I <sub>p</sub>	: Le photo-courant de la cellule	(A)
R <sub>s</sub>	: La résistance série de la cellule	(Ω)
R <sub>sh</sub>	: La résistance shunt de la cellule	(Ω)
T	: La température de la cellule	(°K)
q	: La charge de l'électron	(C)
I <sub>0</sub>	: Le courant de saturation	(A)
K	: Constante de Boltzmann	
n	: Le facteur de non idéalité de la diode.	
<i>PV</i>	: <i>Photovoltaïque</i>	
E	: Ensoleillement dans le plan des panneaux	(W/m <sup>2</sup> )
T	: Température de jonction des cellules	(°C)
NOCT	: La température nominale des cellules en opération	
LWSP	: La probabilité de déficit en eau	
LWS (t)	: Le déficit en eau horaire.	
P <sub>prod</sub>	: Puissance produite par le système	(W)
P <sub>PV</sub> (t)	: Puissance issue du module PV à l'instant t	(W)
N <sub>PV</sub>	: Le nombre de module PV	
N <sub>w</sub>	: Le nombre d'aérogénérateurs	
P <sub>w</sub> (t)	: La puissance issue de générateur éolien à l'instant t	(W)
η <sub>conv</sub>	: Le rendement de conversion.	
SOC(t)	: Etat de remplissage du réservoir au temps t	
Q(t)	: Quantité d'eau pompée à l'instant t	(m <sup>3</sup> )
Q <sub>L</sub> (t)	: Quantité d'eau demandée à l'instant t	(m <sup>3</sup> )
LCC	: Coût de cycle de vie	(\$)
IC <sub>cap</sub>	: Coût d'investissement initial	(\$)
C <sub>m</sub>	: coût de maintenance	(\$)
C <sub>r</sub>	: coût de remplacement	(\$)

CPV : la taille du générateur PV	(W)
$C_{Unit, PV}$ : Le prix unitaire du module PV	(\$/W)
Cw : La taille du générateur éolien	(W)
$C_{unit, w}$ : Le prix unitaire du Watt éolien	(\$/W)
Ctank : la capacité du réservoir	(m <sup>3</sup> )
$C_{Unit, tank}$ : Le prix unitaire du m <sup>3</sup> bâti (\$/m <sup>3</sup> ) du réservoir	
Cmotpump : la puissance nominale de l'ensemble moteur-pompe	(W)
$C_{Unit, motpump}$ le prix unitaire du W de l'ensemble moteur-pompe	(\$/W)
Cconv : la puissance nominale du convertisseur	(W)
$C_{Unit, conv}$ : Le prix unitaire du W du convertisseur	(\$/W)
C0 : coût total constant	
$C_{O\&M}$ : coût de maintenance sur la durée de vie	(\$)
$C_{m0}$ : Coût de la maintenance du système pendant la première année	(\$)
$e$ : Taux d'inflation des coûts de service	
$d$ : Taux d'intérêt annuel fixe	
N : Durée de vie du système	
Nrep : est le nombre de remplacements du composant sur la durée de vie du système.	
Nc : durée de vie du composant du système.	

## Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles en raison de la vaste exploitation ainsi qu'aux problèmes environnementaux issues des émissions des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, d'autres ressources énergétiques alternatives ont été développées car actuellement, la plus grande part des gisements énergétiques mondiaux est consacrée à la production d'électricité.

Les énergies renouvelables représentent une alternative écologique aux combustibles fossiles et au nucléaire de par leur caractère inépuisable, non polluant et très adaptés à la production décentralisée et elles sont d'origine naturelle. Leurs développements et exploitation permettraient d'approvisionner en électricité les sites isolés, ne pouvant être connectés aux réseaux électriques, et permettraient d'éviter d'investir des sommes colossales pour la création de nouvelles lignes électriques synonyme d'un échec financier.

Les ressources d'énergie renouvelables ont tendance à être aléatoire et dépendent des forces de la nature, c'est ce qui a fait que le système autonome utilisant une seule source d'énergie renouvelable nécessite une grande capacité de stockage afin de satisfaire les besoins de la charge en énergie ou en eau et d'assurer une meilleure fiabilité. L'utilisation des systèmes hybrides, combinant plusieurs sources d'énergie, permet d'une part, de réduire les besoins de stockage et d'atténuer les fluctuations de la production causées par la nature aléatoire de ces ressources et, d'autre part, de constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour la génération d'énergie électrique dans les régions isolées.

Les systèmes autonomes, associant un générateur photovoltaïque (PV), un générateur éolien et des réservoirs d'eau, peuvent constituer une excellente alternative pour y remédier aux problèmes rencontrés par les agriculteurs dans les régions isolées, notamment au sud Algérien.

L'objectif de ce mémoire est la modélisation et le dimensionnement d'un système hybride (PV+ éolien) alimentant un site isolé dans une région du sud Algérien (Timimoune, Adrar) destiné à l'irrigation d'un champ de palmier dattier d'une surface de 1 ha.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

**Le chapitre 1** : résume un état de l'art sur les systèmes à énergie renouvelable et la situation énergétique actuelle concernant la production d'électricité à partir des énergies renouvelables dans le monde et en l'Algérie, et présentant aussi les ressources en eau dont dispose l'Algérie et en particulier le sud (Sahara), ainsi que les efforts déployés pour la promotion et le développement de telles ressources.

**Le chapitre 2** : dédié à la présentation et la modélisation de tous les composants de notre système hybride (module PV, l'éolienne et la motopompe).

**Le chapitre 3** : présente la méthodologie proposée pour l'optimisation du dimensionnement de notre système de pompage hybride. Cette approche est basée sur deux critères : le critère de fiabilité de l'alimentation en eau, développé selon le concept technique de la probabilité de perte en eau (LWSP) et le modèle économique basé sur la notion du coût du système sur sa

durée de vie, considéré comme parmi les meilleurs indicateurs de rentabilité économique de tels systèmes à énergies renouvelables.

Les paramètres entrants dans le dimensionnement du système hybride de pompage sont essentiellement : la puissance crête du générateur PV utilisé, la puissance nominale de l'aérogénérateur et la capacité de réservoir d'eau.

**Le chapitre 4 :** A l'issue de ce chapitre nous présenterons, l'ensemble des résultats de simulation obtenus au cours de cette étude. Ces résultats sont issus de l'application de la méthodologie proposée pour l'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage hybride pour satisfaire une demande en eau dans une région saharienne durant une année (8760 heures).

Nous présentons aussi les résultats relatifs à l'analyse et à l'évaluation technico-économique du système de pompage hybride PV/ éolien.

Le système est simulé en utilisant des données radiométriques liées aux sites de Timimoune (Adrar). Ce système est destiné à alimenter en eau une culture de palmier d'une surface d'un hectare 1 ha (environs 123 palmiers) pour différents niveaux de fiabilité, capacités de stockage et plusieurs hauteurs manométriques.

Enfin, la dernière partie de cette thèse présente, une synthèse des travaux effectués ainsi que les résultats obtenus.

La conclusion générale porte sur les principaux résultats obtenus puis les perspectives de développement futur.



# Chapitre 1

## Situation Energétique et Ressources en eau

### 1.1. Introduction

Le degré de développement d'une société se traduit dans un certain nombre de besoins liés au mode de vie de sa population : Nourriture, santé, loisirs, culture, environnement...etc. Ces besoins requièrent pour la plupart une aptitude croissante dans la production d'une énergie nécessaire pour maintenir ce mode de vie. Cette énergie, à des degrés divers, est soit consommée directement par des utilisateurs soit nécessaire pour la production de ces biens et services. Ainsi, la disponibilité d'énergie est une pré-obligation pour le développement socioéconomique et industriel d'un pays.

En effet, les besoins énergétiques sont en plein évolution, leurs satisfactions dépendaient essentiellement des énergies fossiles, mais aujourd'hui le défi est de taille, ces ressources se raréfient et la sonnette d'alarme en terme environnementale est tirée. Il y a quelques décennies, le réchauffement climatique à titre d'exemple s'est manifesté par la désertification de plusieurs régions dans le monde, y compris le Sahel où la capacité de production agricole de plusieurs centaines de milliers de personnes est affectée. Afin d'y remédier, les chercheurs ont essayé de trouver des alternatives en terme énergétique, et ont pu développer une autre forme d'énergie dite « Energie renouvelable », cette dernière pourra contrer la désertification et répondre aux besoins en énergie des applications agricoles notamment l'irrigation des terres.

D'après Global Energy Assessment, en 2013, les sources d'énergies renouvelables couvrent environ 20% de la consommation mondiale d'énergie [1]. De nos jours, différents types de systèmes d'énergies renouvelables sont utilisés dans les applications agricoles. Les principales sources d'énergies renouvelables sont l'hydraulique, l'éolien, la biomasse, la géothermique, le solaire, et l'énergie marine [2, 3].

Ce chapitre est donc dédié à l'état de l'art, où tous les concepts fondamentaux sur lesquels repose notre étude seront mis en évidence.

En premier lieu, nous allons définir de façon globale les énergies renouvelables, présenter par la suite ses différents types ainsi que les parts qu'elles représentent dans la Production d'électricité au niveau mondial et Algérien.

Nous examinons en second lieu, les différentes méthodes de dimensionnement d'un système hybride (photovoltaïque/ éolien) destiné à l'approvisionnement domestique en eau ou à l'irrigation, où nous étudierons particulièrement le cas d'un système avec réservoir de stockage en eau.

### 1.2. Les fondements des énergies renouvelables

#### 1.2.1. Définition des énergies renouvelables

« Les énergies renouvelables (EnR) sont des [sources d'énergie](#) dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du

*temps humain.* » Wikipédia. Elles proviennent des éléments naturels tels-que : Le soleil, Le vent, Les chutes d'eau, etc.

On parle généralement des énergies renouvelables qualifiées de « flux » par opposition aux énergies fossiles qualifiées de « stock » car elles sont limitées et non renouvelables à l'échelle du temps humain.

En outre, en 2018, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) montrent que 9 personnes sur 10 respirent un air contenant des niveaux élevés de polluants, et estiment que 7 millions de personnes meurent chaque année du fait de la pollution de l'air, causée par l'utilisation des combustibles fossiles. S'inscrivant dans ce contexte, une étude menée par le chercheur Gunnar Lederer en novembre 2019, stipule que la transition vers les énergies renouvelables autrement dites « énergies vertes » pourrait réduire jusqu'à 80% les impacts de la pollution d'ici 2050.

Le tableau ci-dessous présente les différents avantages et inconvénients des énergies renouvelables :

Avantage :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution du rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère</li> <li>- La production décarbonnée de l'électricité et de la chaleur, l'avantage majeure des EnR d'après les producteurs</li> <li>- Une source d'énergie inépuisable et plus accessible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût très élevé et rentabilité à long terme</li> <li>- La rareté des métaux</li> <li>- Dépendance sur béton surtout dans la production de l'énergie éolienne et hydroélectrique</li> <li>- Production intermittente</li> </ul>

### 1.2.2. Les différents types des énergies renouvelables

Ces énergies sont sous plusieurs types, ces derniers seront représentées de façon globale comme suit (figure I.1) :

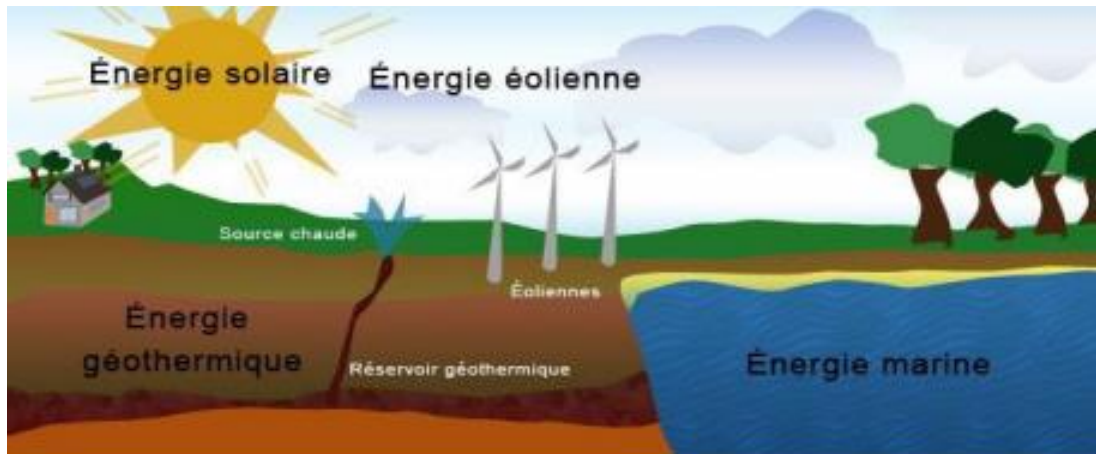


Figure 1.1 Les énergies renouvelables

### - L'hydraulique

L'énergie hydraulique désigne l'énergie fournie par le mouvement de l'eau sous ses plusieurs formes. Ce type d'énergie contribue dans la génération de l'énergie électrique. Cette dernière est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice (Figure 1.2).

La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source a l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, des installations complexes, et des sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [4].

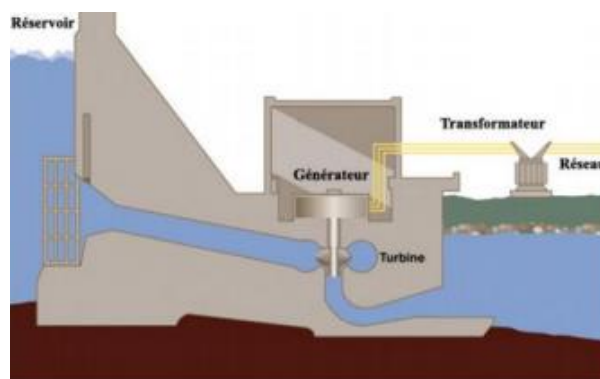


Figure 1.2 Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique

### - Le solaire

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous formes de lumière et de chaleur. Cette catégorie est connue par deux grands types d'énergies. La première, thermique se base sur la température qui permet essentiellement de faire chauffer l'eau afin de produire une

pression mesurable, on l'appelle aussi la production combinée de chauffage par plancher chauffant [5].

La deuxième, photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire (Figure 1.3).

On peut la considérer comme une énergie propre puisque sa production énergétique à partir des modules photovoltaïques n'engendre pas de déchets impliquant la pollution à la terre. Cette ressource a toutefois deux inconvénients, la production est invariablement liée aux conditions climatiques et une surface considérable est nécessaire pour produire de grande quantité d'énergie, puisque le rendement des panneaux photovoltaïques est relativement faible [4].



Figure 1. 3 Énergie solaire thermique.

### - L'éolienne

L'énergie éolienne est un type d'énergie généré à base de vent. Ce type n'est pas produit à la demande mais de manière intermittente en raison des conditions météorologiques, afin de pouvoir palier aux indisponibilités de cette énergie lors de certaines périodes, des installations de production ou de stockage devront être mise en place.

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Par la suite, cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Les coûts d'investissements sont relativement élevés, surtout pour le « offshore », mais l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est petit. Dans certaines régions, les éoliennes posent quand même quelques problèmes, liés au bruit de basse fréquence, désagréable pour les personnes qui habitent à côté. [6]

Les petites éoliennes peuvent être à axe vertical ou axe horizontal (Fig. 1.4)

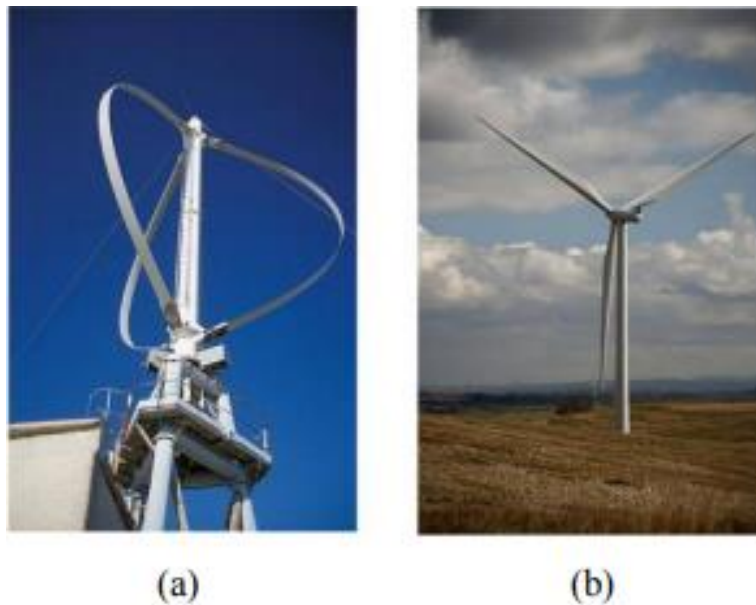


Figure 1.4 Eolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b)

Nous pouvons schématiser une éolienne comme suit :

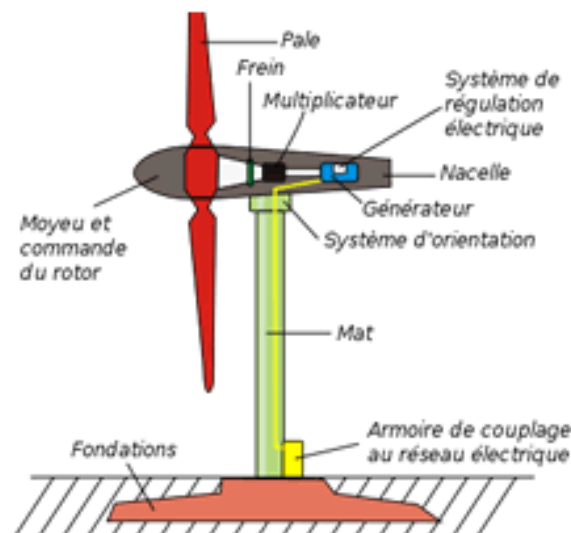


Figure 1. 5 Schéma montrant la composition d'une éolienne

### - La biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Des différents types sont à considérer : le bois énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde [7].

Il s'agit aussi d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse, ce qui est bien montré par la (Figure. 1.6). Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable [4].

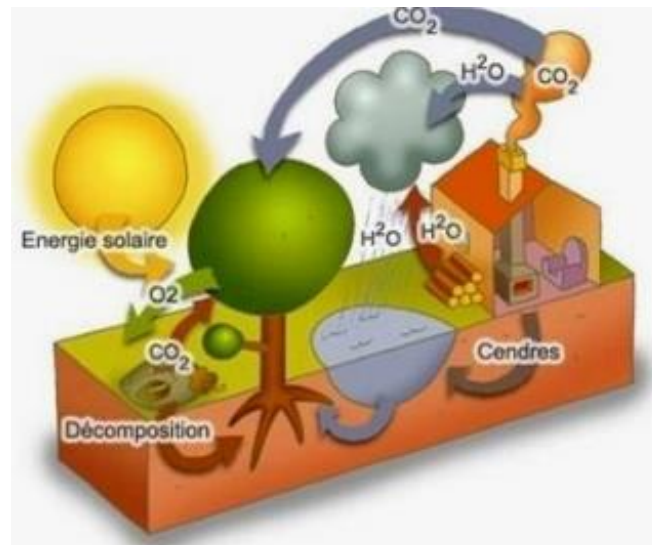


Figure 1. 6 Energie Biomasse

### - La géothermie

Le terme géothermie provient du grec et, signifiant respectivement : la terre et la chaleur. La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à puiser dans le sous-sol ou dans les roches, les calories qui y sont contenues, afin de les rendre disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité. Dans des cas particuliers, la géothermie peut consister à injecter de la chaleur dans le sous-sol afin de refroidir les installations de surface. Différents sources de chaleurs sont à l'origine de la chaleur interne de la terre : la radioactivité, la chaleur initiale, la chaleur de différenciation et les mouvements différentiels [8].

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques ; c'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas très élevé [7].

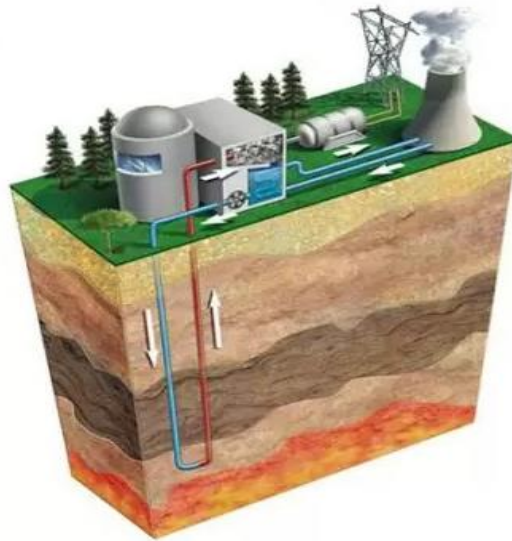


Figure 1. 7 Energie géothermique

### - L'énergies marine

L'énergie marine est un type d'énergie issue des ressources naturelles des eaux des mers et des océans. Mentionnant également l'énergie marémotrice qui est issue du mouvement de l'eau créé par les marées, l'énergie des vagues qui utilise la puissance du mouvement des vagues, l'énergie thermique des mers produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans, les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique en diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer.

Elles permettent de produire de l'électricité grâce aux flux naturels d'énergie des courants et des marées, et à la matière marine, exploités dans différents types d'installations.

Tout comme les autres sources renouvelables, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir.



Figure 1. 8 Energie marine

### 1.3. Production d'électricité mondiale d'origine renouvelable

La production d'électricité, un véritable levier de développement économique dans tous les pays du monde. Sa maîtrise octroie un avantage concurrentiel ainsi qu'une amélioration de la qualité de vie et de création de richesse, vu que sa production est proportionnelle aux progrès techniques qui sont en évolution exponentielle de jour en jour.

A la fin de 2016, la capacité totale d'énergie renouvelable a franchi pour la première fois la barre de 2 000 gigawatts (GW), à 2 017 GW, soit une progression de 8,7 % sur un an, de par rapport à celle enregistrée en 2015. Si un peu plus de la moitié de ce potentiel reste assuré par les ouvrages hydrauliques, le développement du secteur est tiré par le solaire photovoltaïque (303 GW, + 33 %) et par l'éolien (487 GW, + 12,5 %), qui comptent à eux deux pour plus de 80 % dans cette croissance. [9]

Solar PV Global Capacity and Annual Additions, 2006-2016

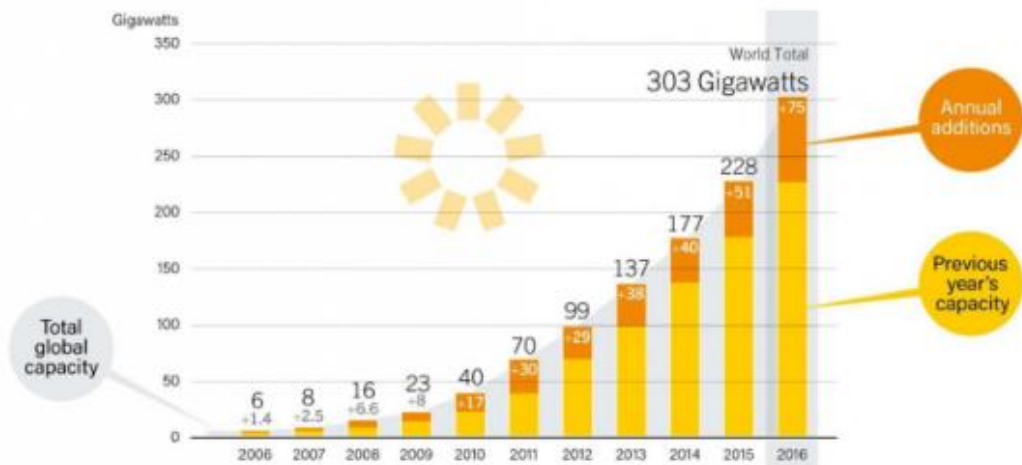


Figure 1. 9 Evolution de la capacité mondiale d'énergie solaire photovoltaïque de 2006 à 2016. [9]



### Wind Power Global Capacity and Annual Additions, 2006-2016

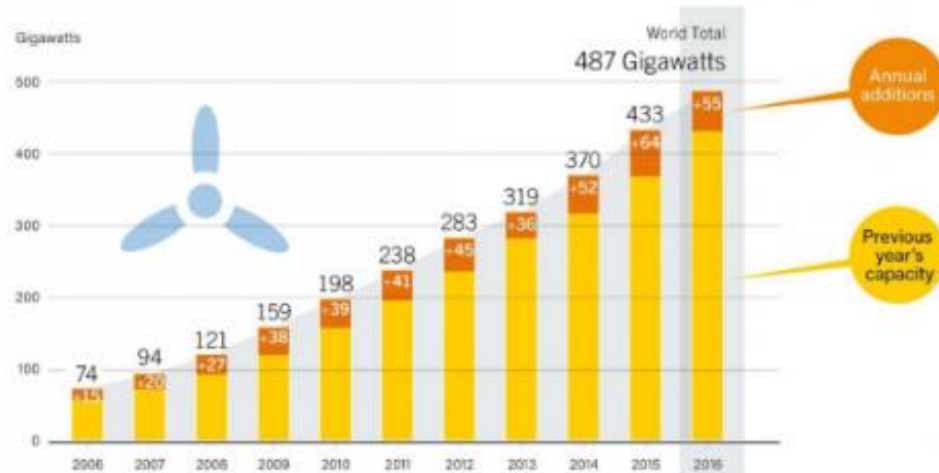


Figure 1. 10 Evolution de la capacité mondiale d'énergie éolienne de 2006 à 2016. [9]

Paradoxalement, les énergies tirées du soleil, du vent ou de la biomasse continuent de gagner du terrain, alors même que les investissements qui leur sont consacrés sont en chute libre. Ceux-ci ont en effet diminué de 23 % en 2016, pour tomber à 242 milliards de dollars (215 milliards d'euros), soit leur niveau de 2010.

Le recul est très significatif pour les pays développés (- 14 %), mais il est particulièrement prononcé pour les pays émergents et en développement (- 30 %). Alors qu'en 2015 ces derniers avaient pour la première fois investi davantage que les nations « avancées » dans les renouvelables, ils ont considérablement réduit la voile. [9]

#### 1.3.1. Production d'électricité d'origine renouvelable en Algérie

Afin d'assurer un environnement favorable au développement des énergies renouvelables et de réduire le prix du Kilowattheure à partir des énergies renouvelables, l'Algérie va recourir à ce mécanisme afin de protéger le consommateur en lui offrant une énergie propre et durable à un prix du KWh le plus bas possible.

Le Programme national de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique vise la mise en service d'une capacité de production d'origine renouvelable de 47 à 51 TWh à l'horizon 2030, dont plus de 9 TWh seront injectés dans le réseau d'ici 2020.

En 2016, une capacité de 343 MW réparties à travers 14 wilayas du pays. Actuellement, 22 centrales d'une capacité de 195 MW sont déjà fonctionnelles et injectent de l'énergie d'origine renouvelable dans le réseau. Ces centrales solaires sont réalisées par Sharikate Kahraba wa Takat El Moutajadida (SKTM, filiale du Groupe Sonelgaz) et s'inscrivent dans le cadre de la mise en œuvre de la première phase du Programme de développement des énergies renouvelables. [10]

#### 1.4. Potentiel des énergies renouvelables en Algérie

L'intérêt que porte l'Algérie aux énergies renouvelables est grandement motivé par la disponibilité de cette source. Le potentiel est important, particulièrement le solaire, mais très peu exploité.

Aujourd'hui, l'Algérie dispose d'un grand potentiel de ressources énergétiques qui lui permet de répondre à ses besoins sur le long terme. En effet, au-delà des importantes ressources d'hydrocarbures dont dispose le pays, d'autres ressources d'énergies renouvelables et d'hydrocarbures non conventionnelles viendront conforter son développement durable. Les principales ressources renouvelables existantes en Algérie se résument comme suit : solaire, éolienne, géothermique, biomasse et hydraulique.

Nous allons nous intéresser particulièrement aux potentiels Solaire et éolien qui sèvreront d'intrant énergétique pour le système de pompage hybride.

#### 1.4.1. Potentiel solaire

De par sa situation géographique, l'Algérie, avec le Sahara surtout, dispose d'un potentiel solaire unique. La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). [11]

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1 \text{ m}^2$  est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700 \text{ kWh /m}^2 \text{ /an}$  au Nord et  $2263 \text{ kWh /m}^2 \text{ /an}$  au sud du pays. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le tableau ci-dessous, selon l'ensoleillement reçu annuellement :

*Tableau 1 Répartition du potentiel solaire en Algérie. [12]*

Régions	Côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Irradiation moyenne reçue ( $\text{kWh/m}^2\text{/an}$ )	1700	1900	2263

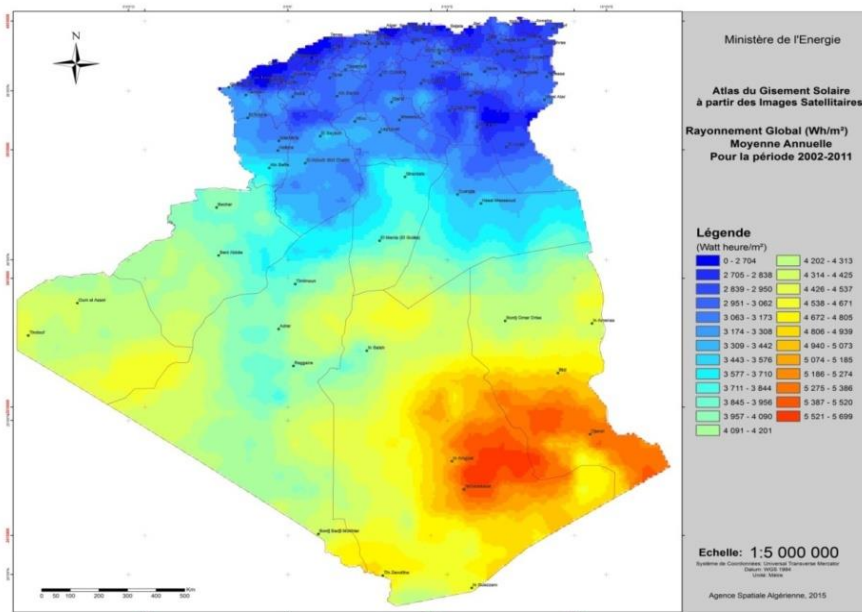


Figure 1. 11 Carte de l'Irradiation Globale Annuelle Moyenne (Période 2002-2011) [13]

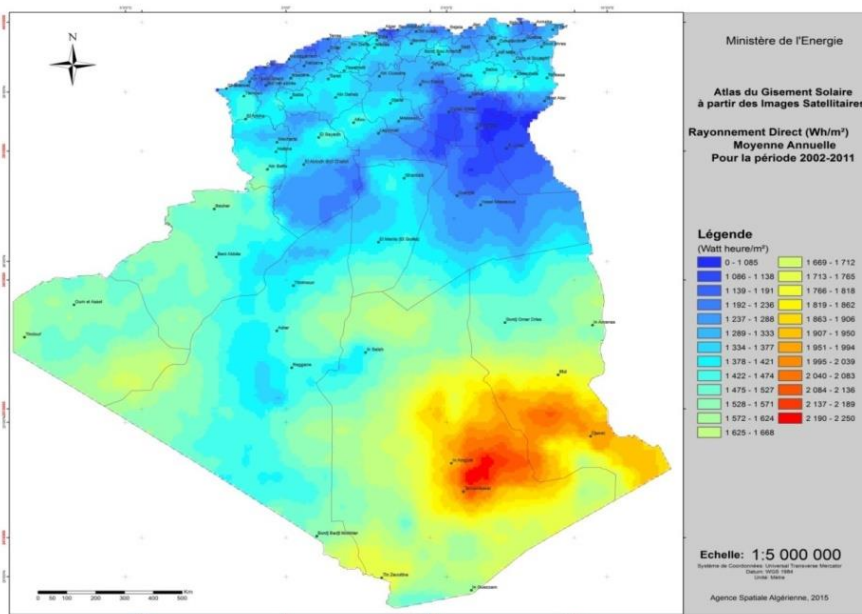


Figure 1. 12 Carte de l'Irradiation Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011) [13]

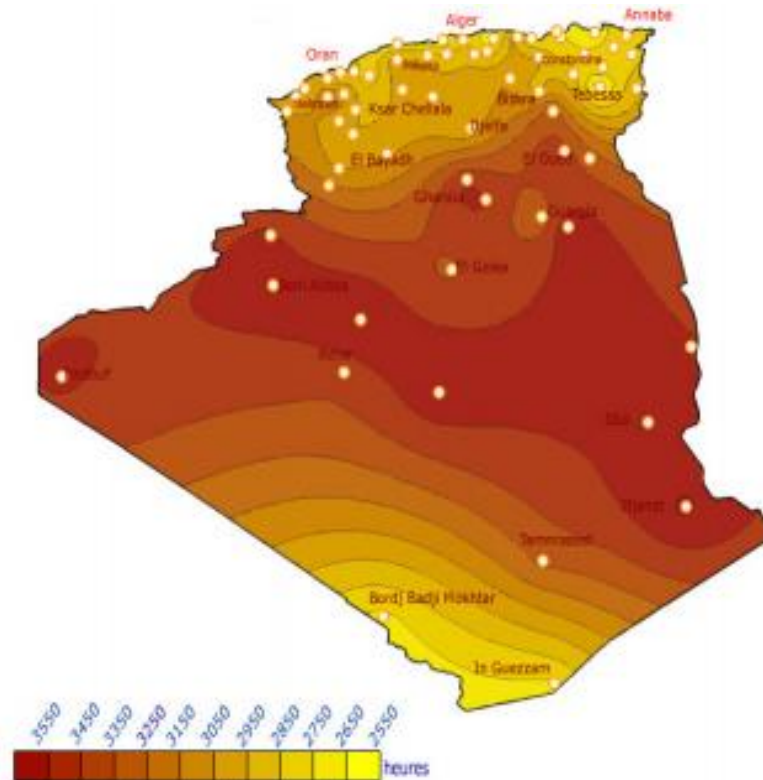


Figure 1. 13 Ensoleillement annuel [14]

#### 1.4.2. Potentiel éolien

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen qui est caractérisé, par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien.

Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel).

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et El bayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (>8m/s).

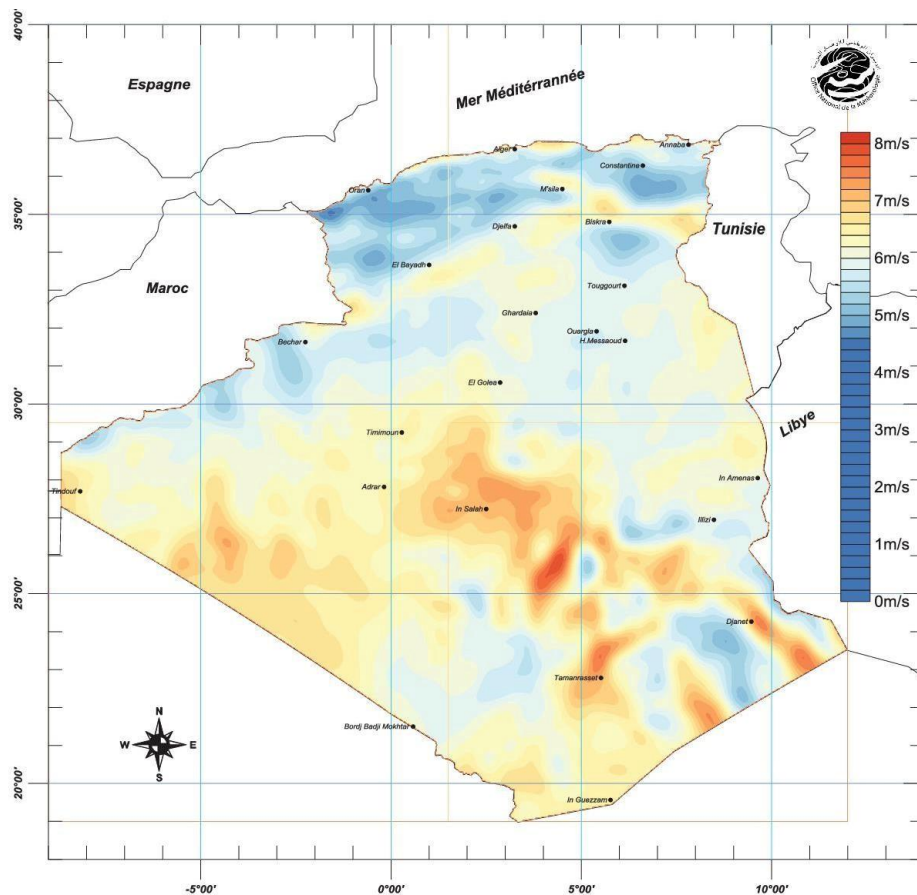


Figure 1. 14 Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010) [13].

### 1.5. Programme des énergies renouvelables en Algérie

Aujourd'hui, l'Algérie fait un pas vers les énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux ainsi que pour répondre aux besoins énergétiques en pleine évolution.

Cette transition devrait permettre à l'Algérie de "s'affranchir de manière progressive de la dépendance vis-à-vis des ressources conventionnelles" et d'amorcer une dynamique d'émergence d'une énergie verte et durable qui s'appuie sur la mise en valeur de ressources d'énergie inépuisables, selon le projet de plan d'action qui a été approuvé par le Conseil des ministres, a annoncé M. Abdelmadjid Tebboune le 09 février 2020. [15]

S'inscrivant dans ce contexte, l'Algérie adopte un programme relatif aux énergies renouvelables permettant la production de 15.000MW d'électricité à l'horizon 2035 dont 4.000MW d'ici 2024.

La réalisation de ces capacités permettra non seulement d'économiser près de 240 milliards de m<sup>3</sup> de gaz naturel et d'éviter ainsi l'émission de 200 millions de tonnes de CO<sup>2</sup>, mais aussi le développement effectif d'un tissu de PME sur l'ensemble de la chaîne de valeur des composants dédiés aux énergies renouvelables, a-t-on souligné dans ce document. [15]

L'hybridation de la production de l'électricité de source conventionnelle au niveau du Sud du pays, par la production photovoltaïque, constitue pour le gouvernement une action prioritaire dans ce domaine. [15]

Aussi, la mise à niveau de la réglementation d'encouragement de la production d'électricité à partir de sources renouvelables afin d'y intégrer des mécanismes adaptés à l'auto production par les résidentiels, sera rapidement mise en œuvre. [15]

### **1.6. Recherche et développement**

L'Algérie privilégie la recherche pour faire du programme énergie renouvelable un véritable catalyseur du développement d'une industrie nationale qui valorisera les différentes potentialités algériennes. Pour l'Algérie, accélérer l'acquisition et le recours aux technologies est essentiel notamment en matière de photovoltaïque et éolien.

L'Algérie encourage également la coopération avec les centres de recherche en vue de développer les technologies et les procédés innovants en matière d'efficacité énergétique surtout en énergies renouvelables. Les universités, les centres de recherche, les entreprises et les différents acteurs du programme EnR collaborent pour sa mise en œuvre et interviennent sur les différentes étapes de la chaîne d'innovation. Ils valorisent ainsi davantage les atouts dont dispose le pays.

Le CDER, centre de développement des énergies renouvelables, est chargé d'élaborer et de mettre en œuvre les programmes de recherche et de développement, scientifiques et technologiques, des systèmes énergétiques exploitant l'énergie solaire, éolienne, géothermique et l'énergie de la biomasse.

Dans le cadre de notre étude, la filiale Etudes et Réalisations des Énergies Renouvelables (ER2) du CDER, a rendu publique ses réalisations en matière d'installation des pompes solaires dans les régions du sud.

Le CDER a exposé les avantages du développement des énergies renouvelables dans ces régions qui sont nombreux ; la promotion des activités agricoles, agroalimentaire et d'élevage ce qui participe à l'amélioration des conditions de vie des populations, la sédentarisation des nomades. [16]

### **1.7. Ressources en eaux en l'Algérie**

L'accès durable aux ressources en eau est une préoccupation majeure qui concerne tous les pays du bassin méditerranéen. Le changement climatique et la croissance urbaine et démographique attendus dans la région, risquent d'aggraver la situation de stress hydrique qui frappe déjà la plupart des Pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée (PSEM). En Algérie, plusieurs facteurs peuvent expliquer la situation de stress hydrique, mentionnant :

- Les retards accumulés dans les décennies 1980 et 1990 pour ajuster l'offre à la demande en eau. En effet, le ratio ressources en eau par habitant et par an qui était de 1500 m<sup>3</sup> en 1962 n'était plus que de 720 m<sup>3</sup> en 1990, de 630 m<sup>3</sup> en 1998 et de 500 m<sup>3</sup> aujourd'hui, traduisant ainsi le décalage par rapport à la croissance démographique.
- Les contraintes physiques liées au relief et à la morphologie du pays.
- La baisse de la pluviométrie depuis trois décennies, avec un pic de sécheresse en 2001-2002.

- Le phénomène de désertification des sols qui accentue la menace de sécheresse (et d'évapotranspiration), en particulier dans l'Ouest algérien.
- La croissance de la demande en eau (multipliée par quatre en quarante ans), notamment dans le Nord du pays et dans les zones urbaines (neuf Algériens sur dix vivent dans le Nord du pays, soit 13% de la superficie nationale, et six Algériens sur dix vivent dans plus de 550 agglomérations urbaines).

Cette situation pourrait être amplifiée par les effets du changement climatique qui sont susceptibles d'être plus prononcés dans le bassin méditerranéen que dans d'autres régions du monde.

Les potentialités hydriques naturelles de l'Algérie sont estimées actuellement à 18 milliards de m<sup>3</sup> par an. L'irrigation occupe une place importante dans la consommation d'eau (62% de la demande totale du pays). La demande en eau potable, qui a considérablement augmenté depuis les années 1970, représente quant à elle 35% de la demande totale. La part des besoins en eau du secteur industriel ne s'élève qu'à 3%.

Depuis le début des années 2000, le gouvernement algérien a pris des mesures importantes pour sortir de la situation de pénurie d'eau qui touchait le pays. La question hydraulique a été placée en priorité sur l'agenda politique et de gros moyens ont été mis en œuvre pour mobiliser de nouvelles ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles.

La nouvelle politique de l'eau s'est ainsi structurée autour de deux axes stratégiques :

- le développement de l'infrastructure hydraulique : barrages, transferts, stations de dessalement d'eau de mer, stations d'épuration etc.
- la réforme institutionnelle du secteur de l'eau qui vise à promouvoir une meilleure gestion de la ressource. [17]

Le pays est divisé en cinq bassins hydrographiques regroupant les 19 bassins versants du pays (tableau 1.2). Les ressources en eau superficielles renouvelables internes totalisent environ 9,8 km<sup>3</sup>/an pour l'ensemble du pays dont le Sahara, bassin le plus important par la surface, ne renferme que 0,6km<sup>3</sup>. Les ressources en eau souterraine renouvelables contenues dans les nappes du nord du pays sont estimées à près de 1,5 km<sup>3</sup> /an. Ces nappes sont alimentées essentiellement par les précipitations dont la répartition demeure irrégulière à la fois dans le temps et dans l'espace. Le sud du pays se caractérise par l'existence de ressources en eau souterraines très importantes provenant des nappes du continental intercalaire et du complexe terminal. [12]

Tableau 2 Bassins hydrographiques en Algérie [17]

Bassins hydrographiques	Superficie en km <sup>2</sup>	Bassins versants
Oranie-Chott Chergui	77 169	Côtiers oranais Macta Tafna Chott Chergui
Chélif-Zahrez	56 227	Côtiers Dahra Chélif Chott Zahrez
Algérois-Hodna-Soummam	47 431	Côtiers algérois Sébaou Isser Soummam Chott Hodna
Constantinois-Seybousse-Mellegue	44 348	Côtiers constantinois Kébir Rhumel Medjerdah Mellegue Seybousse Hauts Plateaux Constantinois
Sahara	2 018 054	Sahara Chott Melghir



Figure 1. 15 Localisation géographique des bassins [14].

### 1.7.1. Dessalement de l'eau de mer

Pour consolider la sécurisation de l'approvisionnement en eau des grandes villes et des localités côtières, le dessalement d'eau de mer est une autre voie possible. En 2019, L'Algérie compte 21 stations de dessalement d'eau de mer réparties sur les 14 wilayas côtières et quatre entreront en service ce juillet et août 2021 avec une capacité de 37.500m<sup>3</sup>/jour dans le but de renforcer le service public d'eau, a annoncé, le ministère des Ressources en eau le 27-06-2021 dans un communiqué. Ces stations doivent, à terme, fournir 2.6 m<sup>3</sup>/jour.

### 1.7.2. Gestion intégrée et durable de l'eau



La politique nationale de l'eau se donne des instruments de gestion intégrée et durable des ressources, ce qui permet également de garantir l'impact escompté des grands projets en cours. « Apprendre à gérer la ressource en eau dans une perspective de développement durable, c'est apprendre à maîtriser sa rareté mais aussi ses excès, à assurer l'alimentation en eau potable, agricole et industrielle, et à préserver la qualité de l'environnement». [12]

### 1.7.3. Ressources en eaux du Sahara

Le Sahara regorge d'importantes quantités d'eau stockées en profondeur et héritées de périodes anciennes.

**-Les eaux superficielles :** Les eaux superficielles au Sahara sont localisées dans les piedmonts de l'Atlas saharien et dans les régions du Hoggar et du Tassili.

**-Les barrages :** Les barrages sont d'une importance stratégique pour la région, car ils constituent des réserves d'eau, dont la maîtrise de la gestion constitue un enjeu capital pour assurer une distribution régulière et planifiée de la ressource.

**-Les foggaras :** La foggara est développée dans la région du Touat, Gourara et Tidikelt. Cette technique réalise à la fois le captage et l'adduction d'eau de la nappe aquifère au moyen d'un système de galeries drainantes. Le manque d'entretien a fait baisser le nombre de foggaras fonctionnelles de plus de 1300 à seulement.

• **Les eaux de sources :** Les eaux de sources ne sont localisées qu'en bordure des piedmonts de l'Atlas Saharien. Parmi l'une des régions sahariennes, la plus favorisée par l'émergence de sources est celle des Zibans et ce, par sa nature géologique et sa position géomorphologique. En effet, la région de Biskra présente un nombre important de sources, dont leur débit avoisine les 120 l/s (Oumache et M'Lili). D'autres sources non moins importantes sont rencontrées en bordure du Tassili (Djanet) [17]

• **Ressources en eau souterraines :** Les ressources en eau souterraines au Sahara sont essentiellement constituées par :

- **Les eaux renouvelables** localisées dans les inféro-flux du versant sud des Aurès (région Nord de Biskra), du Hoggar- Tassili à l'Est et de la région de Bechar à Tindouf, à l'Ouest.
- Les **eaux non renouvelables** représentées par les deux grands réservoirs des deux bassins sédimentaires : le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. (Albien et aquifère) .

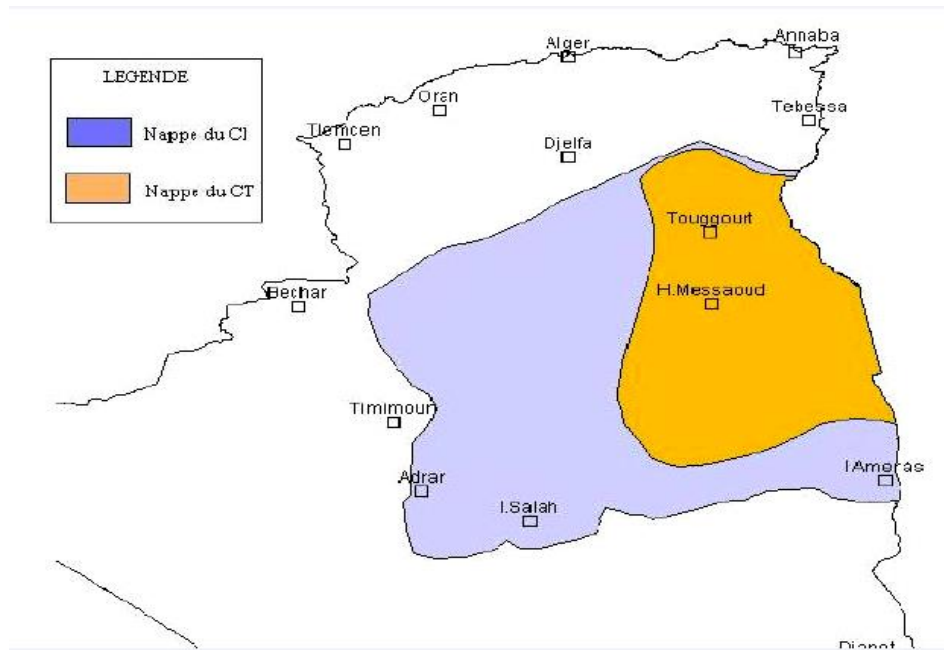


Figure 1. 16 Carte représentant les nappes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal

### 1.8.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables existantes, qui commencent à prendre une grande ampleur ces dernières années, dans le but de lutter contre le réchauffement climatique dû aux énergies basées sur la combustion fossile qui est de loin la plus utilisée à l'échelle mondiale.

L'Algérie aujourd'hui donne une importance capitale aux énergies renouvelables, d'ailleurs plusieurs programmes sont lancés pour la production d'électricité et pour d'autres buts dans le secteur agricole, mais le bilan énergétique national reste encore très faible comparant aux autres pays de la région et aux pays étrangers.

Concernant les ressources hydriques en Algérie, l'eau de par sa rareté limite le développement car la rareté est appréhendée en termes de stress hydrique et d'irrégularité de la ressource. D'ailleurs, de nombreux agriculteurs rencontrent de vrais dilemmes dus au déficit en eau surtout dans les régions isolés, notamment les régions désertiques. Le déficit en eau est une question vitale pour ces agriculteurs et leurs cultures, l'amélioration des conditions de travail est liée à la recherche de solutions adéquates pour ce problème. Le pompage hybride (photovoltaïque /éolien) représente la solution parfaite pour l'approvisionnement en eau ou le réseau électrique est non desservi.

## **Chapitre 2**

### **Modélisation énergétique des composants du système hybride de pompage**

#### **2.1.Introduction**

Pour procéder à la phase d'optimisation, de dimensionnement ou de simulation de tout système, il faut obligatoirement passer par l'étape de modélisation des composants exploitant les énergies renouvelables. La configuration est composée d'un générateur photovoltaïque PV, d'un générateur éolien et d'une pompe utilisée pour faire monter l'eau à la surface et le placer dans un réservoir pour des fins de stockage.

Dans ce qui en suit, nous présenterons ces différents composants d'une manière approfondie ainsi que leurs modélisations dans les différents environnements adéquats.

#### **2.2. Définition des systèmes hybrides :**

Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelable. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue [18].

Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Le système hybride à énergies renouvelables est généralement constitué des composants :

#### **2.3. Le générateur photovoltaïque**

L'énergie solaire est une énergie très abondante sur la surface de la terre. De ce fait, l'énergie photovoltaïque est considéré comme la plus importante source d'énergie renouvelable et la plus prometteuse avec un potentiel inépuisable. Un générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules assemblées en série et/ou en parallèle. Ces cellules convertissent la lumière (les photons) qu'elles captent du rayonnement solaire en électricité. En effet, sous des conditions de tests standards (Eclairement =  $1000\text{W/m}^2$ , température =  $25^\circ\text{C}$ ), la puissance maximale délivrée par une cellule est d'environ  $2.3\text{W}$  sous une tension de  $0.5\text{V}$ . Cette puissance reste, en effet, faible et insuffisante pour la plupart des applications. De ce fait, une association en série et/ou en parallèle de plusieurs cellules permet d'obtenir un générateur photovoltaïque avec une puissance adaptée aux besoins de l'utilisation [19].

##### **2.3.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque**

On rencontre dans la littérature technique plusieurs modèles du générateur photovoltaïque (à une, à deux ou à trois diodes) [20]. Ils diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

Le modèle à une seule diode est le plus cité dans la littérature. Il est caractérisé par son schéma électrique équivalent représenté sur la figure (2.1). Il se compose d'une source de courant symbolisant la conversion du flux lumineux en énergie électrique, d'une résistance shunt  $R_{sh}$  caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû à la non-idéalité de la

jonction PN et des impuretés près de la jonction. Une résistance série  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexions [21].

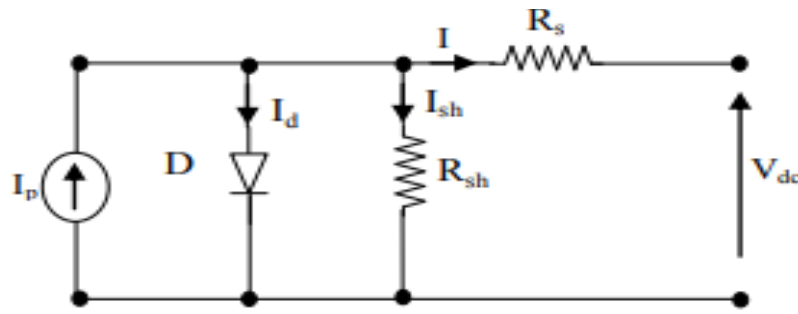


Figure 2. 1 Schéma électrique équivalent du modèle à une seule diode d'une cellule photovoltaïque.

### 2.3.2. Présentation du modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

A partir de la figure (2.1), la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_p = I + I_d + I_{sh} \quad (2.1)$$

Le courant de jonction  $I_d$  est donné par :

$$I_d = I_0 \left( e^{\left( \frac{V+R_s I}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Le courant dans la résistance  $R_{sh}$  est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

A partir de l'équation (2.1), on obtient l'expression de courant  $I$  :

$$I = I_p - I_d - I_{sh} \quad (2.4)$$

En remplaçant dans (2.4) les courants  $I_d$  et  $I_{sh}$  par leurs expressions respectivement dans (2.2) et (2.3) on obtient :

$$I = I_p - I_0 \left( e^{\left( \frac{V+R_s I}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

Où :

$I$  : Le courant de cellule [A].

$V$  : La tension de cellule [V].

$I_p$  : Le photo – courant de la cellule [A].

$R_s$  : La résistance série de la cellule [ $\Omega$ ].

$R_{sh}$  : La résistance shunt de la cellule [ $\Omega$ ].

$T$  : La température de la cellule [ $^{\circ}K$ ].

$q$  : La charge de l'électron  $e = 1.6 * 10^{-19}$  [C].

$I_0$  : Le courant de saturation [A].

$K$  : Constante de Boltzmann ( $1.3854 * 10^{-2}$  [ $JK^{-1}$  ])

$n$  : Le facteur de non idéalité de la diode.

### 2.3.3. Simulation du module PV KC200GT

On a simulé le module photovoltaïque KC200GT [Annexe A] par le modèle à une seule diode (à partir des équations précédentes) avec le logiciel MATLAB 6.1 dans les conditions de test standards STC (éclairage  $1000\text{W/m}^2$  et température  $t=25^\circ\text{C}$ ) et dans d'autres conditions.

Nous allons mettre le schéma électrique équivalent du Module PV en un schéma bloc (Figure 2.2) comportant quatre variables :

Les trois variables d'entrées sont :

$E$  : ensoleillement dans le plan des panneaux ( $\text{W/m}^2$ ) ;

$T$  : température de jonction des cellules ( $^\circ\text{C}$ ).

$V$  : tension aux bornes du GPV (V).

Le variable de sortie c'est :

$I$  : le courant fourni par le GPV (A) ;

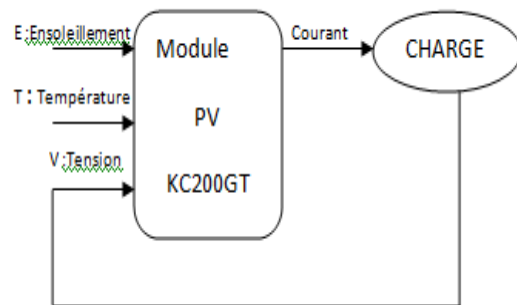


Figure 2. 2 Bloc correspondant à un modèle PV

Afin de réaliser cette modélisation sur MATLAB/SIMULINK voici ci-dessous le modèle utilisé :

### 2.3.4. Modèle à quatre paramètres

Le modèle à quatre paramètres découle de celui à cinq paramètres en faisant tendre  $R_{sh}$  vers l'infini ( $\infty$ ). Les paramètres du modèle sont donc :  $I_L$ ,  $I_0$ ,  $R_S$  et  $m$  et son équation est donnée par [22].

$$I = I_p - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+I R_S}{m V_t}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

$$I = I_p - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V+I R_S}{m V_t}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

$$I_p = I_{SC} \quad (2.7)$$

On pose :  $A = \frac{1}{m V_t}$ ,  $V_t = \frac{k T_c}{q}$ ,  $T_c = T_a + \frac{NOCT-20}{800} G$  (NOCT : la température nominale des cellules en opération)

$$A = \frac{\frac{I_{SC}}{I_{SC}-I_{mp}} + \log\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{SC}}\right)}{2 V_{mp} - V_{oc}} \quad (2.8)$$

$$R_S = \frac{\frac{1}{A} \log\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{SC}}\right) + V_{mp} - V_{oc}}{I_{mp}} \quad (2.9)$$

$$I_0 = I_{SC} \cdot \exp(-A V_{oc}) \quad (2.10)$$

$$m = \frac{1}{AVt} \quad (2.11)$$

Et comme le montre la figure ci-dessous, la modélisation du panneau photovoltaïque KC200GT dans l'environnement SIMULINK sur MATLAB :

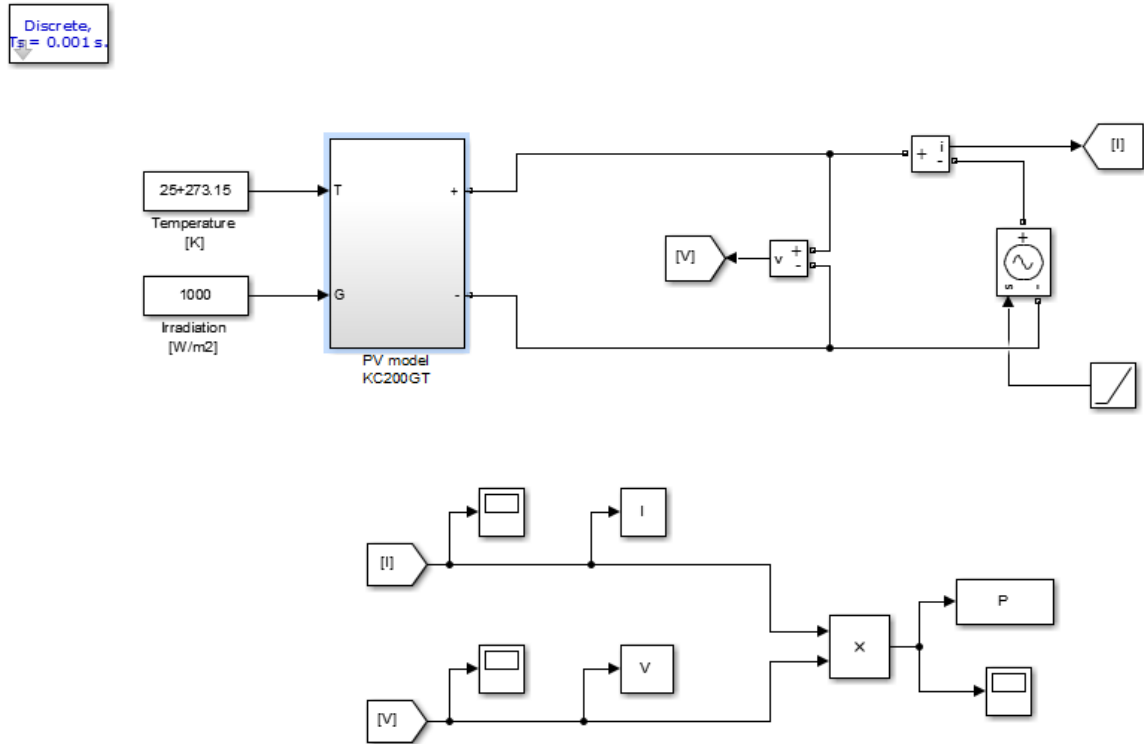


Figure 2. 3 La modélisation du panneau photovoltaïque KC200GT dans l'environnement SIMULINK sur MATLAB.

### 2.3.5. Caractéristiques du module photovoltaïque : L'influence de l'ensoleillement et de la température sur le générateur PV

Les figures (2.4 - 2.7) montrent respectivement les résultats de simulation des caractéristiques I(V) et P(V) du panneau photovoltaïque pour différentes valeurs d'éclairement et de température.

Les paramètres caractérisant le panneau photovoltaïque sont donnés dans l'annexe A.

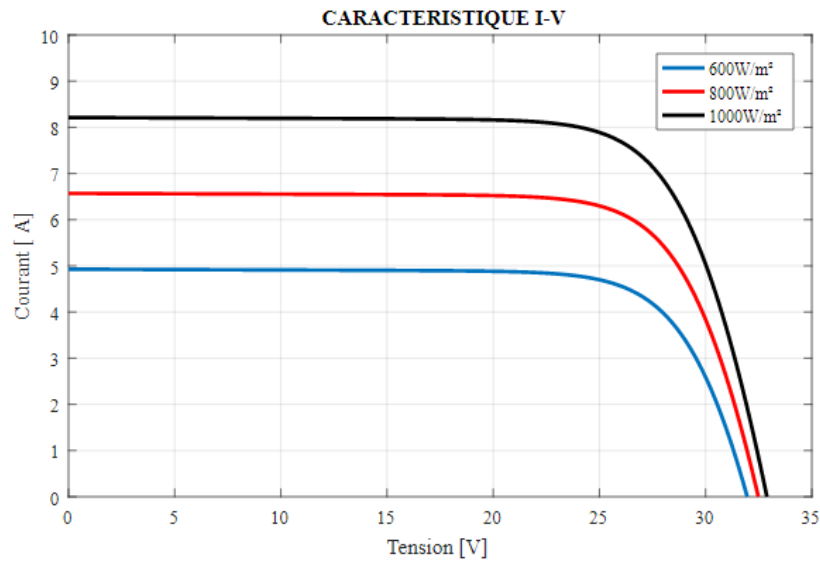


Figure 2. 4 Caractéristique  $I(V)$  pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C

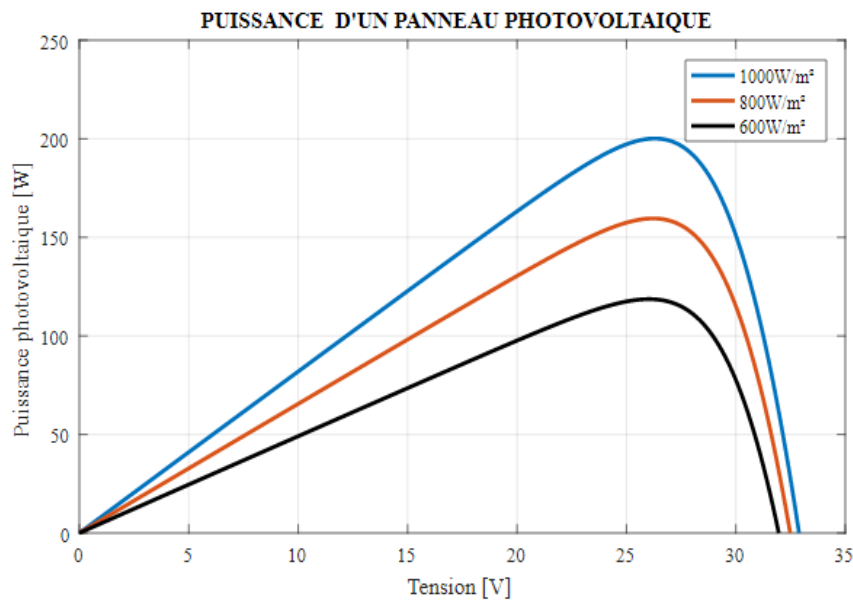


Figure 2. 5 Caractéristique  $P(V)$  pour différents niveaux d'éclairements à température constante 25°C

On remarque que l'ensoleillement a une influence proportionnelle sur le courant du court circuit  $I_{sc}$  et une légère influence sur la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$ . (Figure 2.4). Donc l'ensoleillement influe proportionnellement sur la puissance ( $P=I*V$ ) (Figure 2.5).

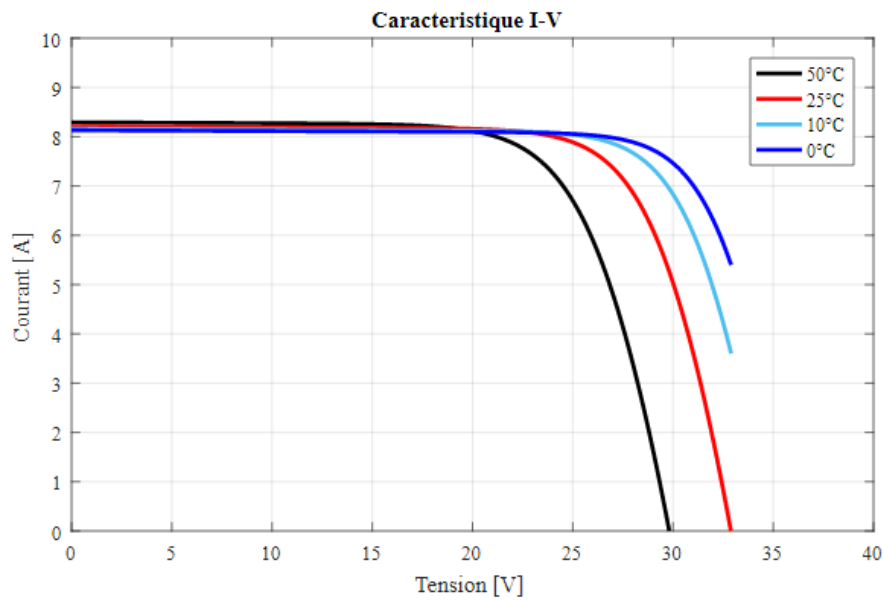


Figure 2. 6 Caractéristique  $I(V)$  pour différents valeurs de températures à éclairement constant 1000

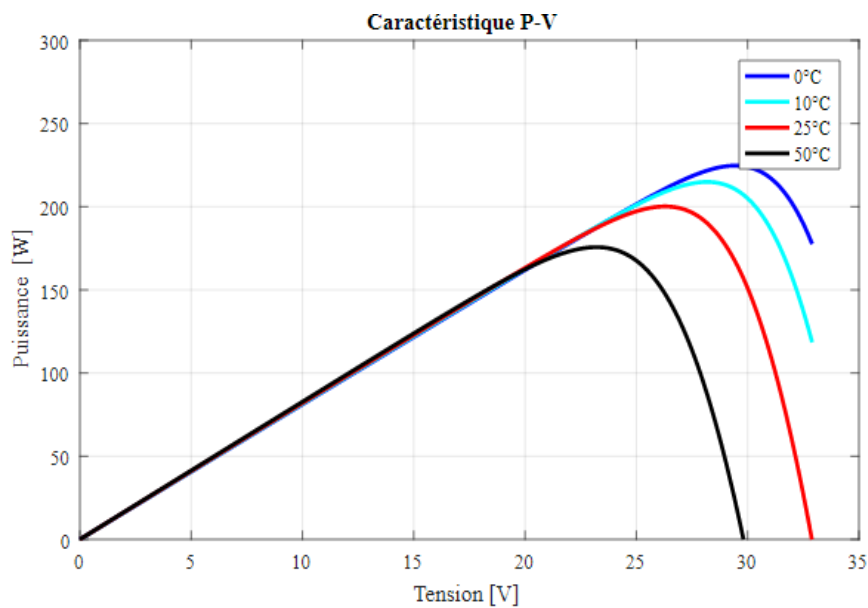


Figure 2. 7 Caractéristique  $P(V)$  pour différentes valeurs de températures à éclairement constant 1000 W/m<sup>2</sup>

La température a une influence inversée sur la  $V_{oc}$  et une légère influence sur l' $I_{sc}$ . (Figures 2.6 et 2.7).

Généralement, dans les systèmes PV, un système de poursuite du point de puissance est utilisé. Ainsi, le générateur PV fonctionne généralement à son point de puissance maximale. C'est pour cette raison, on a choisi de modéliser ce générateur par le biais de sa puissance maximale. De ce fait, la puissance  $P_{max}$  peut être écrite par la relation suivant :

$$P_m = P_{m,STC} \frac{G}{G_{STC}} [1 - \gamma(T_C - 25)] \quad (2.12)$$



Ou :

$P_{m,STC}$  : Puissance du module/générateur dans les conditions standards

$G_{STC}$  : Eclairement dans les conditions standards (1000 W/m<sup>2</sup>)

## 2.4. Le générateur éolien

### 2.4.1. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure 2.8). [23, 24]

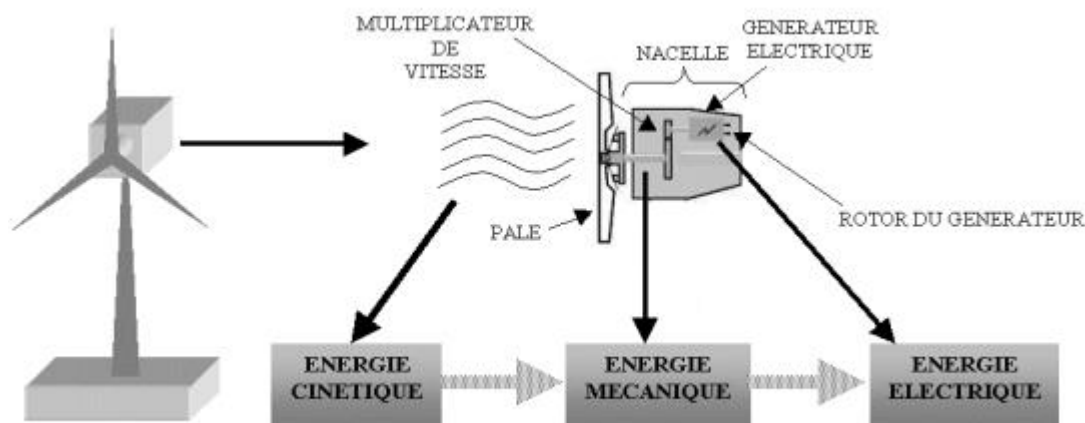


Figure 2. 8 Schéma global et les différentes conversions d'énergie incluent dans le système éolien [13]

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. [23]

### 2.4.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice.

### 2.4.3. Les différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, on classe les éoliennes en deux types :

#### 2.4.4. Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mat qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [26].

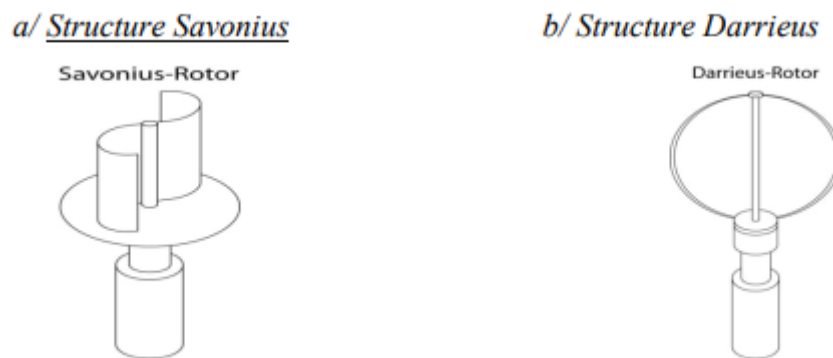


Figure 2. 9 Aérogénérateur à axe verticale

#### 2.4.5. Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [27]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [28].



Figure 2. 10 Eolienne à axe horizontal.

#### 2.4.6. Constitution d'une éolienne horizontale

On présente les différents composants d'une éolienne à axe horizontal étant le modèle utilisé dans notre système hybride de notre étude (Figure 2.10) [29].

1. Pales en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrochage aérodynamique).
2. Moyeu du rotor en fonte.
3. Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
4. Paliers du rotor à double rangée de billes.
5. Arbre lent du rotor en acier à haute résistance.
6. Multiplicateur de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).
7. Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
8. Accouplement avec la génératrice de type flexible.
9. Génératrice (800/200 kW) asynchrone refroidie à l'eau.
10. Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur - génératrice.
11. Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmettant les signaux au système de contrôle de la turbine.
12. Système de contrôle surveillant et pilotant la turbine.
13. Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
14. Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
15. Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.
16. Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.
17. Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

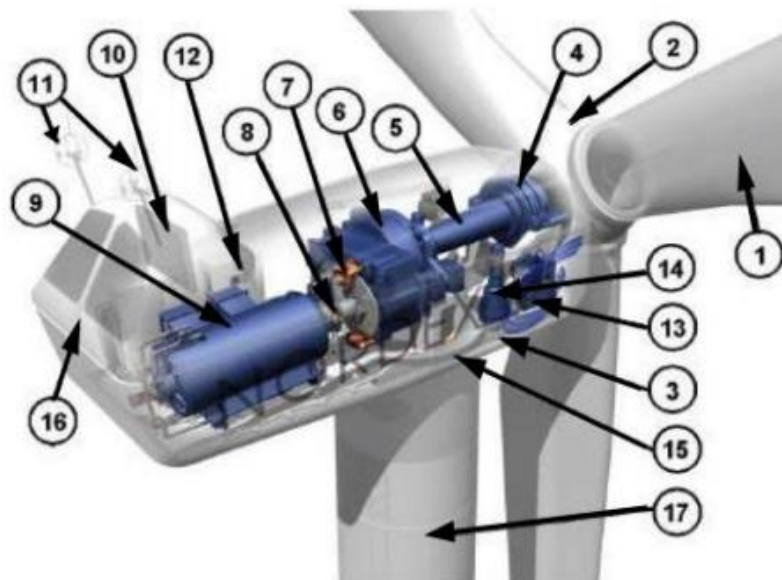


Figure 2. 11 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal [10].

#### 2.4.7. Modélisation du générateur éolien

Les éoliennes de faibles puissances de l'ordre de quelques kilowatts et moins, sont conçues pour fonctionner de façon autonome et sont réservées à des objectifs bien précis tels que : le pompage de l'eau, la consommation domestique ou l'irrigation, le dessalement de l'eau de

mer, l'éclairage des phares et balises isolées, la fourniture en énergie électrique des petites collectivités en zones isolées, etc.

Dans notre cas de figure on utilise une éolienne de 1000W (1kW) dans un système hybride pour le pompage de l'eau, alors pour obtenir la puissance fournie par cette éolienne on doit représenter la courbe de puissance de cette éolienne.

#### 2.4.8. Courbe de puissance d'une éolienne

La courbe de puissance d'une éolienne est la fonction qui donne la puissance de sortie d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent (voir figure 2.12). Ces courbes sont fournies par le fabricant qui les garantit à des marges d'incertitudes près. Elles sont élaborées à partir de mesures réalisées sur un site en fixant un anémomètre sur un mat situé à proximité de l'éolienne.

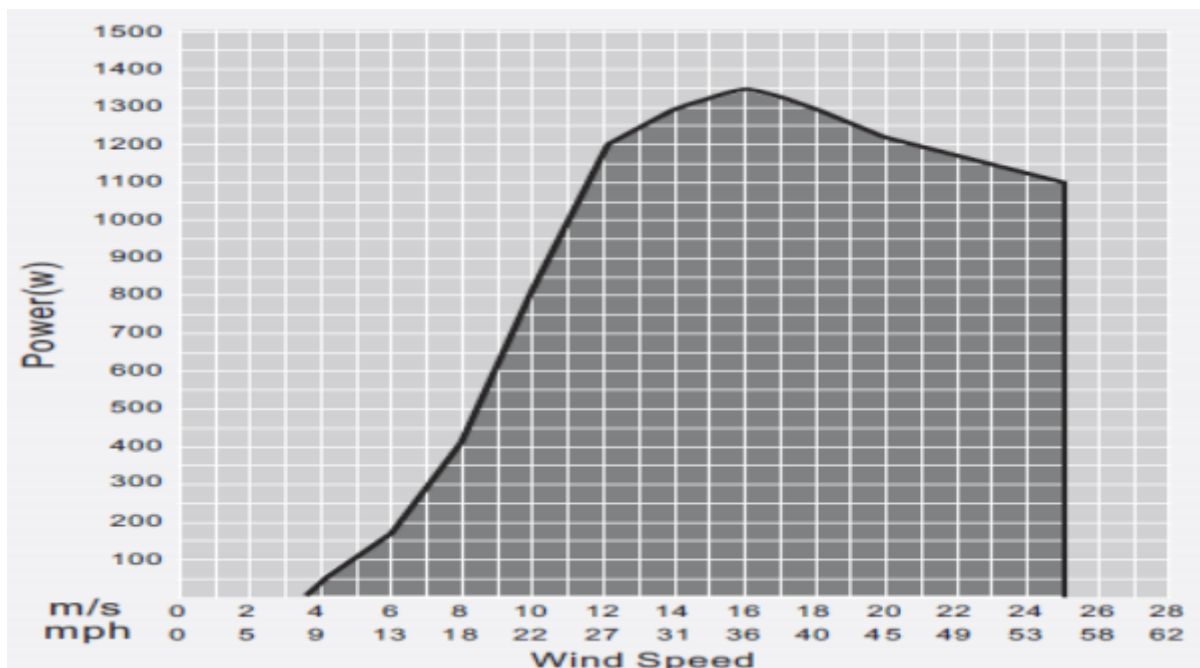


Figure 2. 12 Courbe de puissance de l'Eolienne 48 Volts 1000 Watts complète nouvelle génération.

Les caractéristiques essentielles de la plupart des éoliennes sont :

- Une vitesse de démarrage  $v_d$  en dessous de laquelle aucune puissance n'est générée ;
- Une vitesse de plein régime  $v_n$  pour laquelle la puissance nominale est atteinte ;
- Une vitesse d'arrêt  $v_a$  au-delà de laquelle l'éolienne est arrêtée (pour éviter de l'endommager).

Ces puissances sont données pour un vent déterminé, appelé vent nominal, vent pour lequel l'éolienne fournit sa puissance nominale. Au-delà de cette vitesse du vent, la puissance est maintenue constante grâce au dispositif de régulation. [22]

#### 2.4.9. Approximation de la courbe de puissance de l'éolienne

En se basant sur la fiche technique du constructeur et sur la courbe fournie par ce dernier et en utilisant MATLAB on va retirer le modèle mathématique correspondant à notre système.

*Tableau 3 Données techniques de l'éolienne 48 Volts 1000 Watts complète nouvelle génération.*

Vitesse du vent instantanée (m/s)	Puissance de sortie (W)
3.5	0
4	50
5	115
6	165
7	300
8	410
9	600
10	800
11	1000
12	1200
13	1250
14	1300
15	1325
16	1350
17	1325
18	1300
19	1250
20	1220
21	1200
22	1170
23	1150
24	1125
25	1100

L'application "Curve fitting" nous permet d'obtenir le polynôme et le graphe de la puissance de l'éolienne adéquat à notre éolienne qui est comme suit :

$$f(x) = p1 * x^6 + p2 * x^5 + p3 * x^4 + p4 * x^3 + p5 * x^2 + p6 * x + p7 \quad (2.13)$$

Tel que les coefficients sont représentés sur le tableau ci-dessous :

Tableau 4 coefficients du polynôme d'approximation de la courbe de puissance.

Coefficient	Valeur
P1	-0.0006809
P2	0.05465
P3	-1.631
P4	21.83
P5	-125.5
P6	340.9
P7	-352.3

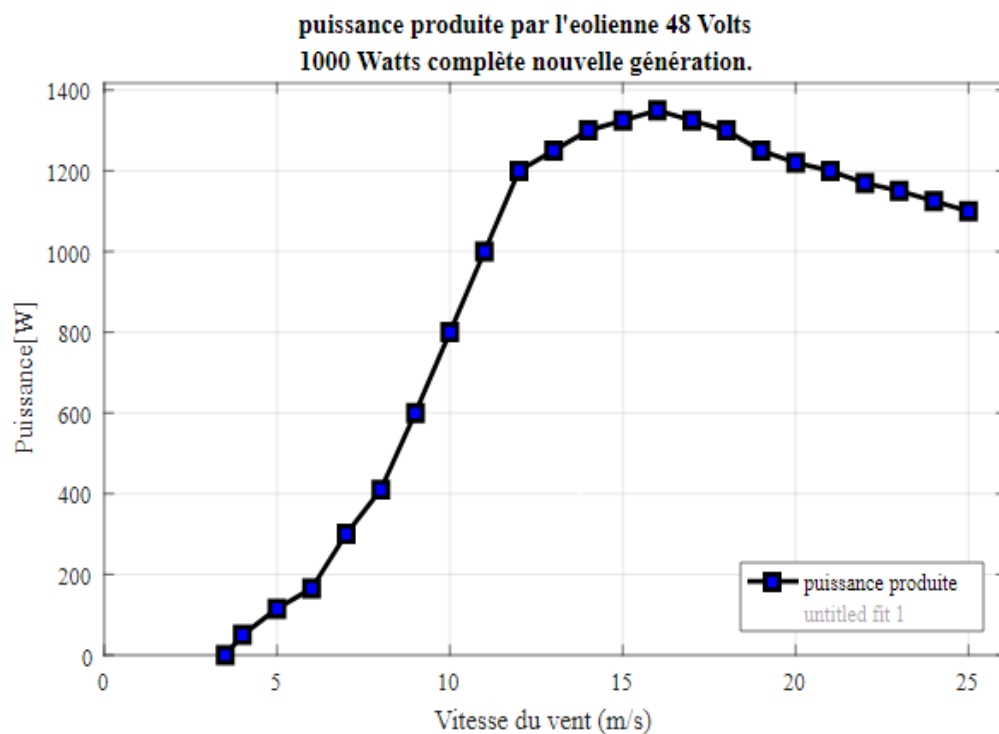


Figure 2. 13 La puissance de sortie de l'Eolienne 48 Volts 1000 Watts complète nouvelle génération.

A l'aide de cette courbe et du polynôme obtenu on pourra avoir la puissance fournie par l'éolienne pour une vitesse donnée, ce qui nous sera d'une utilité lors de l'étape de dimensionnement.

## 2.5. Groupe moteur-pompe : GRUNDFOS SP14-8

Le système de pompage peut être alimenté soit par notre système hybride PV/éolien, soit par une alimentation DC programmable. Dans notre étude il sera alimenté par le système hybride car notre installation sera complètement autonome, la pompe choisie intègre un convertisseur qui nous permet le suivi de point de puissance maximale.

### 2.5.1. Modélisation du groupe moteur-pompe Grundfos SP14-8

Dans notre travail, le groupe motopompe est modélisé par le modèle exponentiel modifié qui est défini comme suit :

$$Q(P, h) = a * P^b + c \tag{2.14}$$

Ce modèle permet de déterminer le débit de la pompe en tenant compte de la puissance absorbée et de la hauteur de pompage. Ce modèle est d’une précision similaire à celle de notre étude il a été développé et appliqué à une seule pompe qui est la GRUNDFOS SP14-8. La figure ci-dessous montre l’influence de la hauteur manométrique sur les performances de la pompe.

Tableau 5 Valeurs des coefficients du modèle exponentiel modifié.

h(m)	A	b	C
20	177.8	0.06977	-170
30	117.9	0.1144	-115.5
40	-106.2	-0.1451	103.8

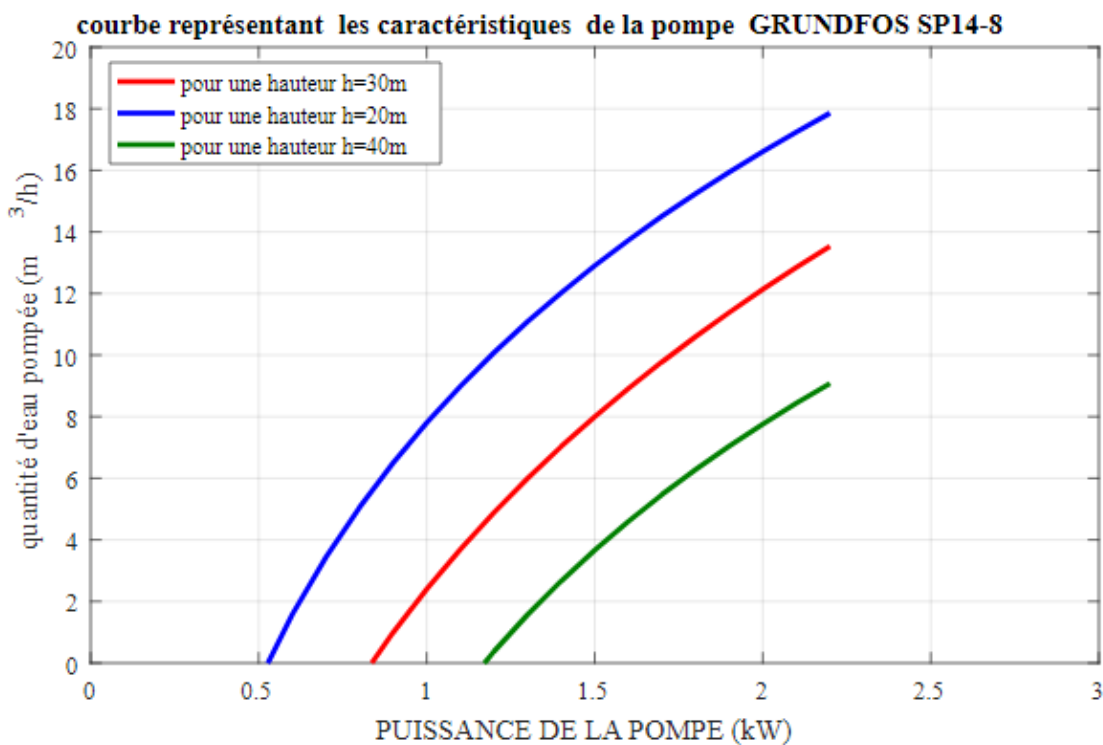


Figure 2. 14 Courbe représentant les caractéristiques de la pompe GRUNDFOS SP14-8

On voit clairement que la puissance de démarrage varie selon la hauteur, on remarque qu’elle augmente en augmentant la hauteur, ceci peut être expliqué que à chaque fois que l’eau est profonde la pompe a besoin de plus de puissance pour le faire remonter à la surface, ce qui est tout à fait logique. Et on voit aussi que la pompe atteint sa performance maximale à 2.2 kW et cette performance est maximale quand la hauteur est faible.

### 2.6. Conclusion

A l’issue de ce chapitre on a pu modéliser les composants de notre système de pompage hybride PV/éolien et nous avons présenté chaque composants d’une façon détaillée et expliqué son principe de fonctionnement.

On a modélisé le générateur photovoltaïque sous différentes conditions météorologique sous l'environnement MATLAB/SIMULINK et on a reproduit la puissance de sortie de l'éolienne avec une interpolation effectué avec "curve-fitting" sur MATLAB (approché avec un polynôme de degré 6) et on a pu voir aussi le comportement de la motopompe utilisé à différentes hauteurs.

Les résultats de ces chapitres nous seront d'une importance majeure dans la phase de dimensionnement.



## **Chapitre 3**

### **Dimensionnement et optimisation du système de pompage hybride.**

#### **3.1.Introduction**

L'énergie solaire et l'énergie éolienne dépendent fortement des conditions météorologiques (Ensoleillement, vitesse du vent) du site d'installation du système à énergie hybride. Ceci induit une obligation de stockage d'électricité ou d'eau et ce en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources.

L'utilisation du stockage de l'eau est indispensable pour l'usage domestique ou bien pour l'irrigation, ce qui est le concept de notre étude qui consiste en l'irrigation d'une surface de 1 ha de palmier dattier à Timimoune Wilaya d'Adrar site géographiquement isolé et non raccordé au réseau .

Le système de pompage est constitué d'un moteur, d'une pompe et d'un réservoir pour le stockage d'eau. Le moteur permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif.

L'énergie mécanique à la sortie du moteur permet de faire tourner la pompe. La pompe permet donc de convertir l'énergie mécanique reçue en énergie hydraulique.

Par la suite, l'eau à la sortie de la pompe sera stockée dans un réservoir adéquat qui dépend de la demande en eau de notre site à irriguer.

Cependant on est dans l'obligation d'effectuer une optimisation technico-économique pour notre système hybride de production-stockage.

Ce chapitre présente l'étude d'optimisation du dimensionnement du système de pompage hybride (PV/ éolien) avec stockage de l'eau.

#### **3.2.Définition du dimensionnement**

Dans une installation hybride, le concepteur du système doit associer les sources d'énergie et les moyens de stockage de manière à satisfaire deux objectifs :

- assurer une production suffisante pour couvrir l'ensemble de la consommation électrique ou en eau des utilisateurs.
- garantir le coût minimum de l'énergie consommée par les utilisateurs

On appelle cette phase de conception le dimensionnement. Il s'agit notamment de déterminer la capacité et la puissance des différents éléments composant notre système. Cependant, à cause de l'intermittence des sources renouvelables, le dimensionnement s'avère difficile et doit, en toute rigueur, dépendre à la fois des conditions météorologiques du lieu d'installation tout en intégrant le profil de demande sur le site.

##### **3.2.1. Méthodes de dimensionnement et d'optimisation du système**

Les méthodes se basant sur les critères techniques et économiques à la fois, permettent de donner une analyse exhaustive du système et offrent une vision plus réaliste du choix de la configuration la plus propice à notre système (la plus efficace et la moins coûteuse).

La figure suivante jointe ci-dessous représente le schéma synoptique du système hybride de pompage de l'eau dédié à notre mémoire.

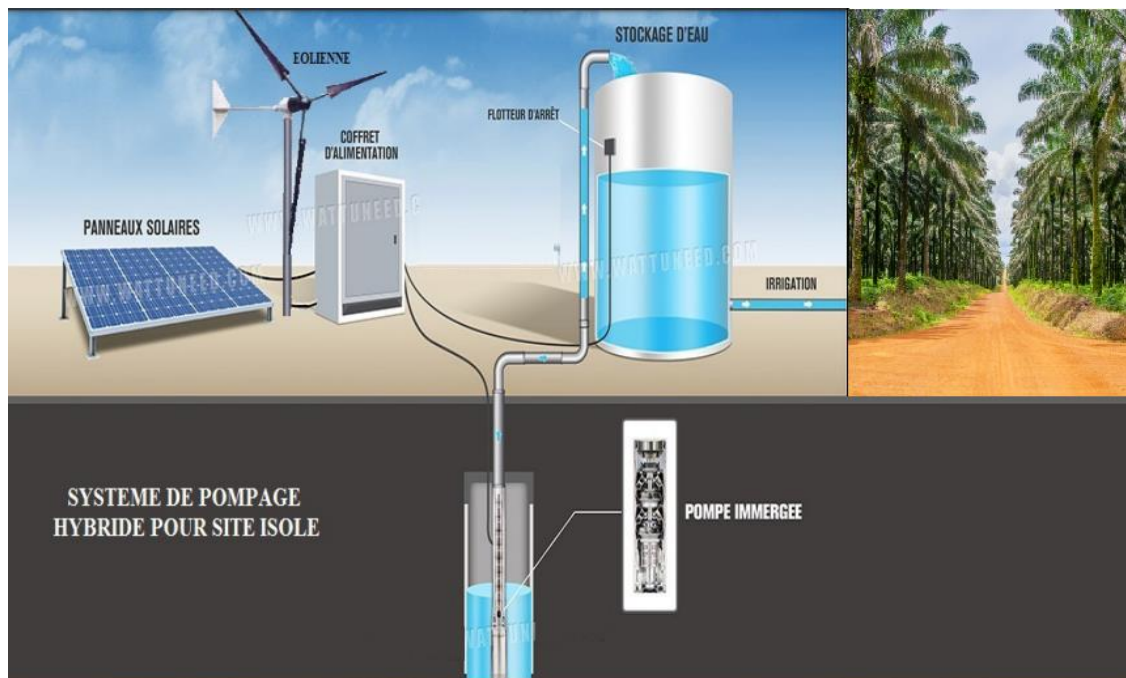


Figure 3. 1 Schéma synoptique du système hybride de pompage de l'eau

### 3.3.Méthodologie d'optimisation utilisée

Dans la littérature on rencontre différentes méthodes de dimensionnement des systèmes à sources renouvelables. Ces méthodes utilisent divers approches pour déterminer une configuration optimale aux systèmes étudiés.

Les méthodes basées sur l'optimisation technico-économique offrent une bonne évaluation du système et rendent l'option hybride applicable et attrayante pour des applications qui prennent de l'ampleur ces dernières années.

La méthode d'optimisation de dimensionnement présentée dans ce travail consiste à déterminer la configuration optimale du système, permettant de satisfaire les besoins de la charge en eau selon deux critères d'optimisation : la fiabilité et le coût.

- la fiabilité est fondée sur le concept de la probabilité de perte d'alimentation en eau (Loss Water Supply Probability, LWSP). Cela permet de déterminer l'ensemble des configurations qui permet d'atteindre la valeur de la LWSP désirée.
- le calcul du coût est établi par rapport au concept du coût de cycle de vie (LCC), il permet de choisir la configuration optimale du système, parmi l'ensemble des configurations satisfaisant le critère de fiabilité, qui présente le coût minimal [12,22].

Trois paramètres de dimensionnement sont introduits dans le processus d'optimisation : la puissance crête du générateur PV, la puissance nominale de l'aérogénérateur et la capacité de stockage du réservoir.

Dans cette étude, Le concept de fiabilité de l'approvisionnement en eau et le coût de cycle de vie sont décrits par des modèles mathématiques. Dans la suite de ce chapitre nous présenterons ces deux modèles de simulation de façon bien détaillée.

### 3.4. Modèle de la fiabilité selon le concept de LWSP

Au vu de l'intermittence de la vitesse du vent et du rayonnement solaire, qui ont un impact sur la production énergétique, une analyse de fiabilité des systèmes de production d'électricité d'origine renouvelable est considérée comme une étape nécessaire et primordiale dans un tel processus de dimensionnement. Dans la littérature, on rencontre pas mal de méthodes employées pour calculer la fiabilité des systèmes hybrides.

Le dimensionnement permet de déterminer la taille des composants (générateur PV, aérogénérateur éolien, réservoir d'eau) nécessaire pour satisfaire les besoins en eau de la charge.

Un système autonome est jugé en terme de sa fiabilité de fournir de l'énergie à la charge (sous forme de quantité d'eau pompée) qui présente un facteur important pour le dimensionnement du système.

La méthode la plus utilisée est la probabilité de perte d'énergie (LPSP), et dans notre cas puisqu' il s'agit d'un système destiné au pompage de l'eau, on utilise la (LWSP) qui est presque similaire à la (LPSP).

La LPSP peut être définie comme la probabilité pour qu'un déficit énergétique se produise [30]. Tandis que la LWSP en termes d'état de remplissage du réservoir d'eau, dans le cas d'un système avec stockage d'eau, peut être définie par la probabilité pour que l'état de remplissage, à tout instant  $t$ , soit inférieur au seuil minimal de la quantité d'eau disponible dans le réservoir. [31]

Par conséquent, la LWSP est définie comme le rapport du déficit en quantité d'eau à la demande de charge totale pendant une période de temps spécifique. LWSP peut être exprimée comme suit [30,31] :

$$LWSP = \frac{\sum_{t=1}^T LWS(t)}{\sum_{t=1}^T Q_L(t)} \quad (3.1)$$

Où :

$LW(t)$  représente le déficit en eau pendant l'heure  $t$

$T$  est la période de fonctionnement (pour cette étude,  $T = 1$  année)

$Q_{L(t)}$  : La demande pendant l'heure  $t$ .

La valeur de LWSP est comprise dans l'intervalle [0-1].

Si  $LWSP=0$   $\longrightarrow$  La charge est complètement satisfaite.

Si  $LWSP=1$   $\longrightarrow$  La charge ne sera jamais satisfaite

En utilisant le concept de LWSP, un modèle technique de dimensionnement du système est présenté. Ce modèle consiste à déterminer les différentes combinaisons (générateur PV, générateur éolien, réservoir d'eau) permettant de satisfaire les besoins de la charge en eau pour une LWSP désirée.

La méthodologie et les formulations utilisées peuvent être résumées par les relations suivantes représentant le modèle mathématique :

La puissance  $P_{prod}(t)$  produite par le système à l'instant  $t$  (heure) coïncide numériquement avec l'énergie délivrée pendant cette heure, celle-ci est calculée comme suit :

$$P_{prod} = N_{PV} P_{PV} + N_W P_W \quad (3.2)$$

$P_{PV}(t)$  est la puissance issue du module PV à l'instant  $t$

$N_{PV}$  Le nombre de module PV

$N_W$  Le nombre d'aérogénérateurs

$P_W(t)$  est la puissance issue de générateur éolien à l'instant  $t$

Les puissances  $P_{PV}$  et  $P_W$  sont calculées comme c'est expliqué dans le chapitre précédent.

La puissance demandée par la charge à l'entrée de l'ensemble moteur-pompe  $P_{pump}(t)$  est calculée à partir de l'équation suivante [30] :

$$P_{pump}(t) = P_{prod} * \eta_{conv} \quad (3.3)$$

Avec :

$Q_L(t)$  La puissance demandée à l'ensemble moteur-pompe à l'instant  $t$

$\eta_{conv}$  : Le rendement de conversion.

La puissance des réservoirs  $P_{res}(t)$  à l'instant  $t$ , puissance entrant dans les réservoirs lors du processus de remplissage ou puissance sortant des réservoirs lors du processus de décharge, est obtenue par l'équation suivante [30] :

$$P_{res}(t) = P_{prod} - P_{pump}(t) \quad (3.4)$$

Lors du fonctionnement du système, différentes situations peuvent se présenter :

**1. Egalité entre la quantité d'eau pompée par le groupe moteur-pompe et la demande en eau**

La capacité de remplissage disponible dans les réservoirs reste constante.

$$SOC(t) = SOC(t - 1) \quad (3.5)$$

On appelle cet état, **l'état stable**

2. **La quantité d'eau pompée par le groupe moteur-pompe est supérieure à la demande en eau :**

Dans ce cas, le surplus en eau est stocké dans les réservoirs jusqu'à ce que le réservoir se remplisse.

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + [Q(t) - Q_L(t)] \quad (3.6)$$

On appelle cet état, **l'état de charge**

3. **la quantité d'eau pompée est inférieure à la demande en eau :**

Dans ce cas le déficit en énergie sera couvert par le réservoir de stockage.

$$SOC(t) = SOC(t - 1) - [Q_L(t) - Q(t)] \quad (3.7)$$

On appelle cet état, **l'état de décharge**

### 3.5. Le déficit en eau LWS(t)

Un déficit en eau LWS(t) se produit lorsque la quantité d'eau pompée par le groupe moteur pompe et celle stockée dans le réservoir est insuffisante pour satisfaire la charge. Il peut être déterminé à partir de l'expression suivante [32] :

$$LWS(t) = Q_L(t) - [Q(t) + SOC(t)] \quad (3.8)$$

Le pas de temps utilisé pour le calcul est  $\Delta t=1$ heure, pendant ce temps, la puissance produite par le système est supposée constante. Par conséquent, la puissance est numériquement égale à l'énergie dans cet intervalle de temps.

À partir des étapes décrites ci-dessus, on développe un programme informatique dans l'environnement MATLAB permettant de dimensionner les composants pour chaque configuration du système de pompage hybride, en fixant la taille e (générateur PV, générateur éolien, réservoir d'eau) en donnant la LWSP désirée. Le programme est exécuté pour une période de temps définie (une année dans cette étude).

L'organigramme de ce modèle de système hybride est illustré dans la Figure ci-dessous :

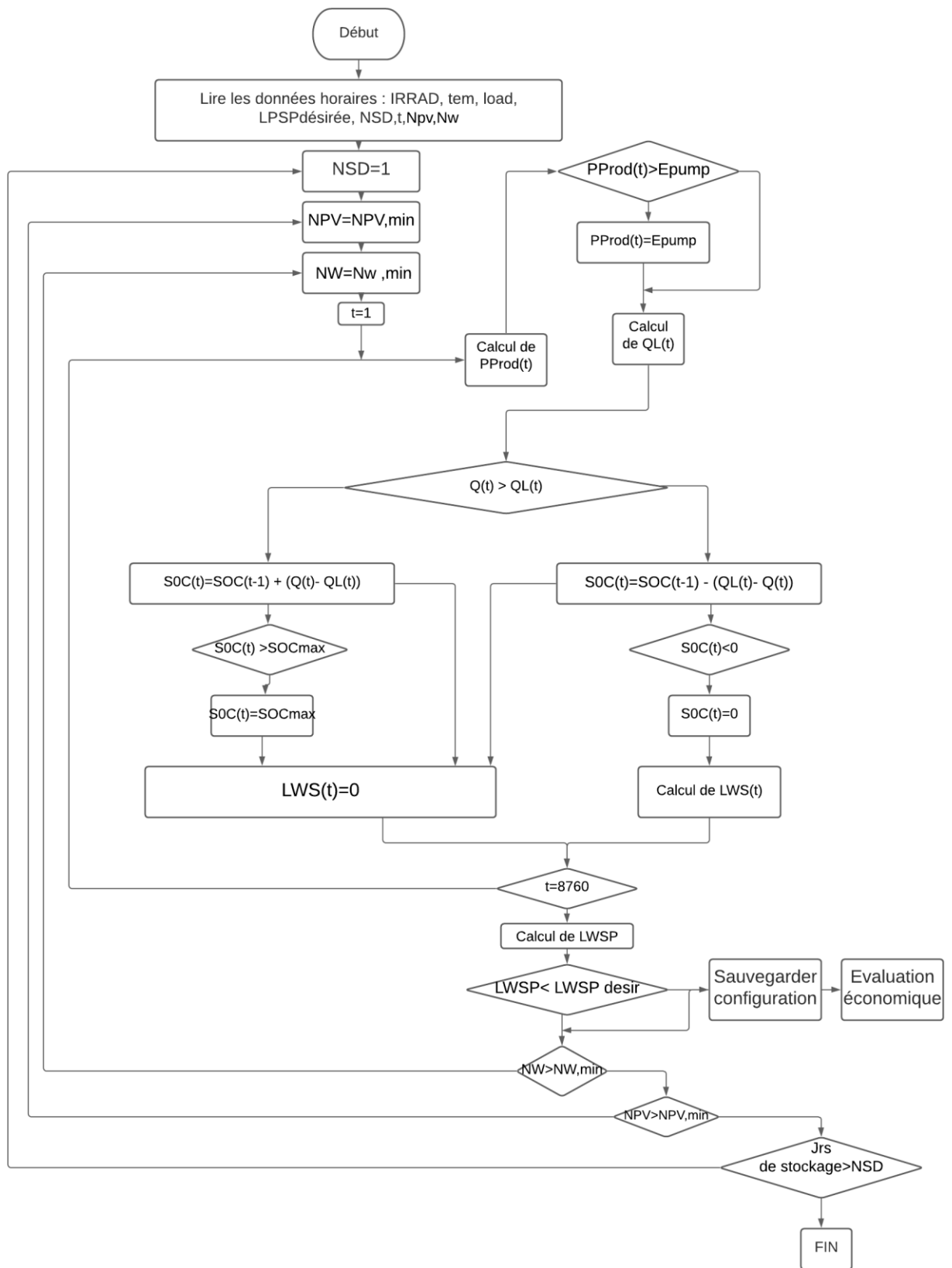


Figure 3. 2 Organigramme du modèle de dimensionnement optimal selon l'approche basée sur les bilans des débits d'eau.

Dans la figure 3.2 est présenté l'algorithme de calcul du système. Parmi les données d'entrée on trouve des données spécifiques au site à savoir ; l'irradiation solaire horaire globale et la température ambiante, les données techniques des composants constituant le système exemple :  $P_{pump, nom}$  puissance nominale du groupe moteur-pompe utilisé et les données liées à l'utilisateur (profil horaire de la charge et la valeur de LWSP désirée).

NSD = 3, est le nombre maximum de jours de stockage.

En utilisant l'approche, basée sur le concept de la LWSP, décrite par l'algorithme présenté dans la figure 3.2, plusieurs configurations peuvent techniquement satisfaire la charge pour une LWSP donnée. La configuration optimale est choisie parmi l'ensemble de configurations permettant la satisfaction de la charge demandée avec la LWSP désirée et qui conduit au plus bas coût. Ceci peut être obtenu en utilisant un modèle économique, basé sur le coût de cycle de vie, qui sera développé dans la section suivante.

### 3.6. Modèle économique

L'optimisation du système de pompage hybride consiste à choisir, la configuration qui satisfait le critère technique (LWSP désirée et qui représente le coût le plus faible).

Dans la littérature, plusieurs méthodes sont proposées pour l'évaluation économique des systèmes. On trouve des approches basées sur le concept du coût total annuel du système et d'autres basées sur le concept du coût de cycle de vie LCC [33, 34, 35].

L'approche globale prend en compte l'ensemble des coûts relatifs à l'investissement, à la maintenance et aux remplacements des divers composants du système.

L'approche économique, basée sur le coût de cycle de vie LCC, est la plus favorable pour cette étude, son modèle de calcul est présenté dans ce qui suit.

### 3.7. Coût de cycle de vie

Le coût total sur le cycle de vie du système (Life Cycle Cost) représente toutes les dépenses nécessaires pendant le cycle de vie du système. Il est composé du coût d'investissement initial du système  $IC_{cap}$  et des coûts actualisés de la maintenance  $C_m$  et du remplacement  $C_r$  de divers composants du système sur la durée de vie. Son expression est donnée par l'équation suivante [32] :

$$LCC = IC_{cap} + C_m + C_r \quad (3.9)$$

Dans ce cas, le coût d'investissement initial représente la somme des coûts initiaux de tous les composants du système.

#### 3.7.1. Coût d'investissement initial

Le coût d'investissement initial  $IC$  représente les dépenses engagées au début du projet, avant que le système soit mis en service. Généralement, il inclut les coûts de différents

éléments composant le système et le coût d'installation il est donné par la relation suivante :

$$IC = N_{pv} \cdot C_{pv} \cdot C_{unit,pv} + N_w \cdot C_w \cdot C_{unit,w} + C_{tank} \cdot C_{unit,tank} + C_{motpump} \cdot C_{unit,motpump} + C_{conv} \cdot C_{unit,conv} + C_0 \tag{3.10}$$

$C_{pv}, C_{unit,pv}$ : sont la taille du générateur PV (W), le prix unitaire (\$/W) du module PV respectivement;  $C_w \cdot C_{unit,w}$  sont la taille de l'éolien (W) et le prix unitaire (\$/W) :  $C_{tank}, C_{unit,tank}$  sont la capacité ( $m^3$ ) et le prix unitaire (\$/ $m^3$ ) du réservoir bâti respectivement :  $C_{motpump}, C_{unit,motpump}$  sont la puissance nominale (W), le prix unitaire (\$/W) de l'ensemble moteur-pompe respectivement :  $C_{conv}, C_{unit,conv}$  sont la puissance nominale (W) et le prix unitaire (\$/W) du convertisseur respectivement ; de plus il y'a  $C_0$  qui est un coût total constant qui est de 30% du coût du photovoltaïque et de l'éolien et de 10% du groupe moteur-pompe (inclut le génie civil et le coût d'installation).

### 3.8.Coût des composants

#### 3.8.1. Coût du générateur photovoltaïque

Le coût du Watt crête du module PV dépend de plusieurs paramètres à savoir le type du module (monocristallin, poly-cristallin, amorphe), la taille du module PV, etc. En outre, il varie dans le temps et selon le marché (pays).

Selon une enquête des prix du watt crête menée par les scientifiques, l'évolution du prix du Watt du module PV dans le marché est illustrée sur la figure ci-dessous :

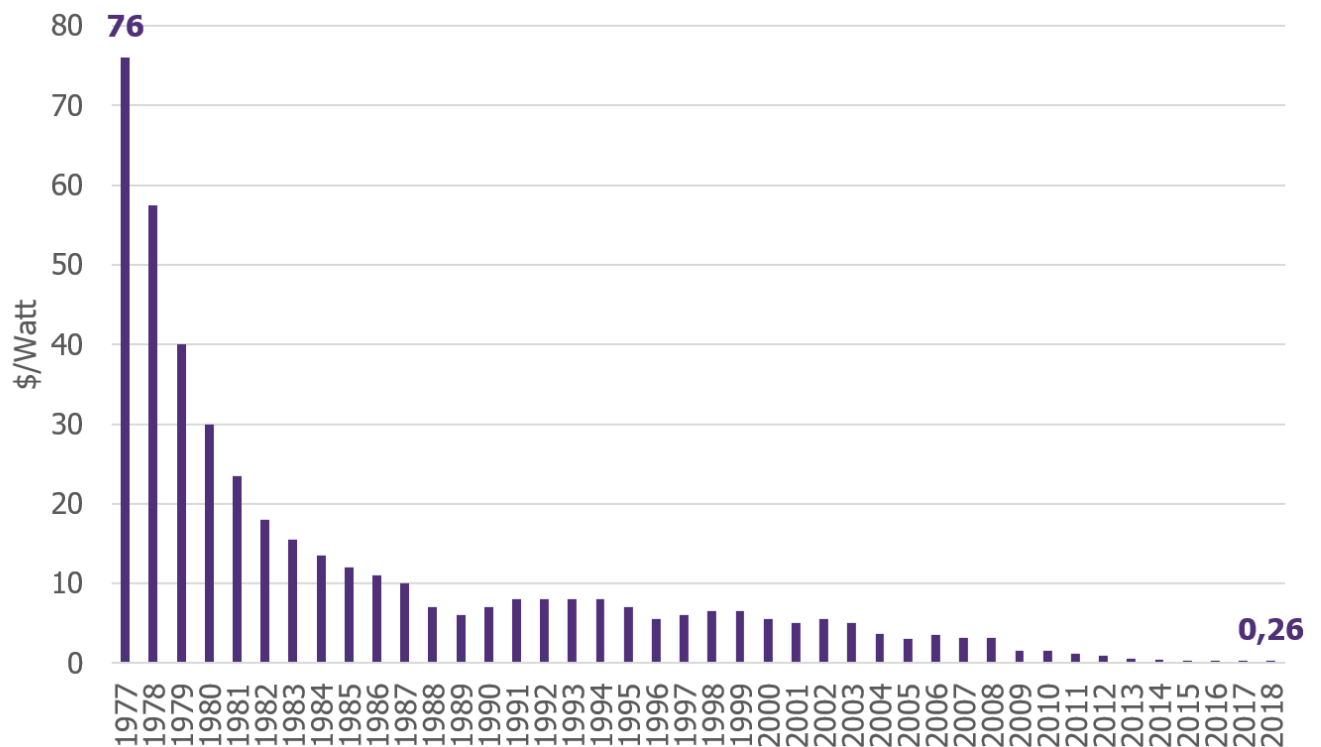


Figure 3. 3 Historique des prix des cellules photovoltaïques. [36]



### 3.8.2. Coût du générateur éolien

Le coût du Watt du générateur éolien dépend de plusieurs paramètres à savoir le type d'éolienne, sa taille et sa puissance ... etc. En outre, il varie dans le temps et selon le marché. Selon une enquête des prix du watt menée par les chercheurs, l'évolution de ce dernier dans le marché est illustrée sur la figure

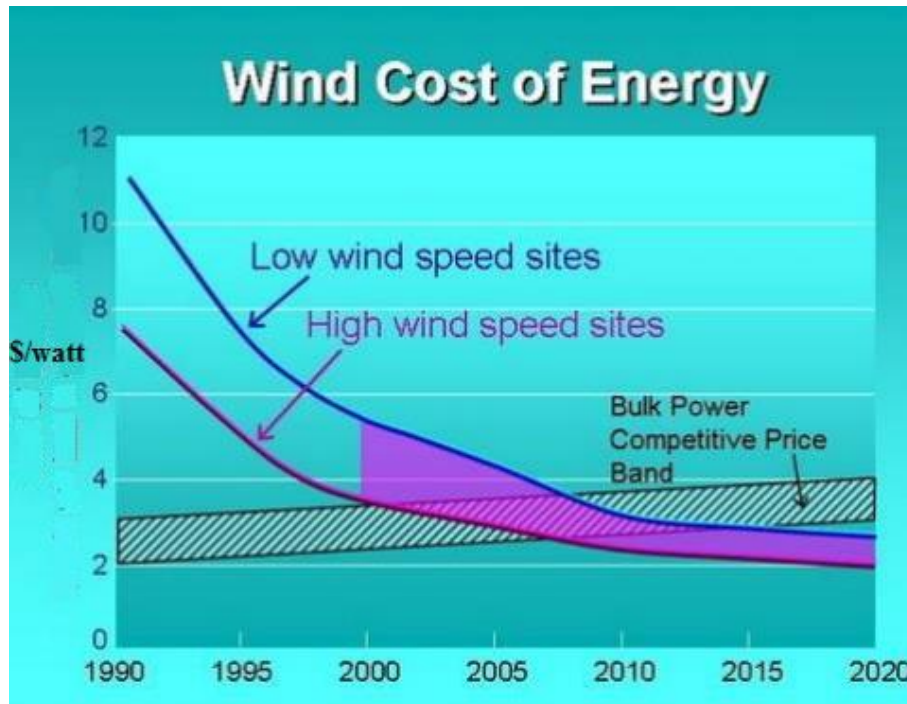


Figure 3. 4 Coût de l'énergie éolienne. [37]

### 3.8.3. Coût du convertisseur

Le coût unitaire de la puissance du convertisseur varie en fonction de sa taille, du type du signal de sortie et du rendement, il augmente avec la qualité du signal et il diminue avec sa puissance nominale. Selon les données fournies par les constructeurs des convertisseurs, le coût unitaire du Watt de la puissance nominale varie de 0,1 à 1,8 €/W. [38,39].

### 3.8.4. Coût du réservoir d'eau

Une valeur moyenne de 130 \$/m<sup>3</sup> est utilisée dans cette étude. De plus, la durée de vie du réservoir est prise égale à 25 ans durée de vie du système comme le suggère certains auteurs [40].

### 3.8.5. Coût d'installation

Dans la plupart des cas, le coût d'installation est considéré comme proportionnel au coût des composants. A ce coût vient parfois s'ajouter un coût relatif à l'ingénierie et au management. L'étude bibliographique fait apparaître une grande diversité de la valeur du coût d'installation.

Dans notre étude on le prend égale à 30% de l'investissement initial du photovoltaïque et de l'éolien et de 10% du groupe moteur-pompe.

### 3.9. Coût de maintenance du système

Le coût de maintenance  $C_m$  du système est la somme des frais qu'il faut assumer régulièrement pour maintenir le système en bon état de marche.

Généralement, l'estimation du coût de maintenance sur la durée de vie est basée sur le coût annuel de la maintenance.

Pour estimer la part de la maintenance annuelle du système, un bilan général des hypothèses présentées dans la littérature pour les différents composants du système, est dressé.

Pour la partie PV, la plupart des auteurs [41] proposent un coût annuel de maintenance compris entre 0 et 2% du coût initial d'investissement avec 1% étant la valeur la plus utilisée. Pour les réservoirs de stockage, nous avons proposé une valeur de 1% du coût initial. [31, 32], Pour les convertisseurs et les régulateurs de charge, la littérature donne la valeur de 1% du coût d'investissement [42]. Dans cette étude, nous considérons que la maintenance représente 1% de l'investissement initial pour le générateur PV et du réservoir, éolien et le groupe moteur—pompe de 3% donc :

$$C_{m0} = C_{mpv} + C_{mw} + C_{mtank} + C_{mconv} + C_{mmot} \quad (3.11)$$

Tel que :

$$C_{mpv} = 0.01 * N_{pv} * C_{pv} * C_{upv} \quad (3.12)$$

$$C_{mw} = 0.03 * N_w * C_w * C_{uw} \quad (3.13)$$

$$C_{mtank} = 0.01 * C_{tank} * C_{utank} \quad (3.14)$$

$$C_{mconv} = 0 \quad (3.15)$$

$$C_{mmot} = 0.03 * C_{mot} * C_{umot} \quad (3.16)$$

#### 3.9.1. Coût de la maintenance sur la durée de vie

La valeur actualisée du coût de la maintenance du système sur la durée de vie est donnée par l'expression suivante [43,44] :

$$C_{O\&M} = \begin{cases} C_{m0} * \left(\frac{1+e}{d-e}\right) \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+d}\right)^N\right], & \text{pour } d \neq e \\ C_{m0} * N & , \text{pour } d=e \end{cases} \quad (3.17)$$

Avec :

$C_{m0}$  : Coût de la maintenance du système pendant la première année,

$e$  : Taux d'inflation des coûts de service (taux d'augmentation du coût de la main d'œuvre).

$d$  : Taux d'intérêt annuel fixe (prix égal à 0,08).

$N$  : Durée de vie du système (25 ans).

En 2007, le taux d'inflation en Algérie est estimé à 3,5% par l'Office National des Statistiques (ONS) et 4,5 % par le Fonds Monétaire International (FMI). Dans cette étude une valeur moyenne de 4% est utilisée.

### 3.10. Coût de remplacement des composants

Le coût de remplacement de chaque composant du système est principalement fonction du nombre de remplacements sur la durée de vie du système, sa valeur actualisée est donnée par l'équation suivante [45] :

$$C_{rep} = N_{nom} C_{nom} C_{unit} \sum_{i=1}^{N_{rep}} \left[ \frac{(1+e)}{(1+d)} \right]^{\frac{N}{N_{rep}+1}} \quad (3.18)$$

Où,  $N_{nom}$  est le nombre de composants,  $C_{nom}$  est la puissance/capacité nominale du composant du système, en  $m^3$  pour le réservoir d'eau et en Watt pour les autres composants,  $C_{unit}$  est le coût unitaire du composant ( $\$/m^3$ ) pour le réservoir d'eau et ( $\$/W$ ) pour les autres composants ;  $N_{rep}$  est le nombre de remplacements du composant sur la durée de vie du système.

$e$  : est le taux d'inflation des coûts du remplacement des composants (taux de l'augmentation des prix des composants).

Le nombre de remplacements du composant  $N_{rep}$  dépend de sa durée de vie et de la durée de vie du système. Il peut être exprimé par l'équation suivante [46] :

Pour les composants du système (convertisseur, groupe moteur-pompe et éolienne) pour les autres composants il n'y aura pas de remplacement durant la durée de vie car :  $N_{nom} = N=25ans$ .

$$N_{rep} = ENT \left[ 2^N - \frac{1}{2^{N_c}} \right] \quad (3.19)$$

ENT : fonction qui permet d'arrondir un nombre à l'entier immédiatement inférieur, elle s'appelle (floor) sur l'environnement MATLAB.

$N$  : durée de vie du système

$N_c$  : durée de vie du composant du système.

### 3.11. Conclusion

Ce chapitre est dédié à la méthodologie d'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage hybride utilisant des réservoirs de stockage d'eau. Elle se base sur deux modèles : le modèle de la fiabilité du système ; modèle technique qui est développé selon le concept de la probabilité de déficit en eau (LWSP) et le modèle économique développé en utilisant le concept du coût de cycle de vie (LCC).

En utilisant le modèle technique LWSP, on obtient un ensemble de configurations du système, qui permet de satisfaire la demande en eau avec la LWSP désirée. L'optimisation du système consiste à choisir, parmi ces configurations satisfaisant le critère technique (LWSP désirée), la configuration au coût le plus faible. Cela est obtenu en utilisant le modèle économique LCC développé dans ce chapitre.

## CHAPITRE 4

### Simulation et analyse des résultats.

#### 4.1.Introduction

La méthodologie développée dans ce mémoire est appliquée pour le dimensionnement d'un système autonome de pompage hybride (PV/éolien) avec stockage d'eau utilisé pour satisfaire les besoins en eau d'une culture de palmiers dattiers d'une surface de 1 ha dans la région de Timimoune Wilaya d'Adrar au sud algérien selon un profil variable durant toute une année comme le représente la figure 4.1 [40]

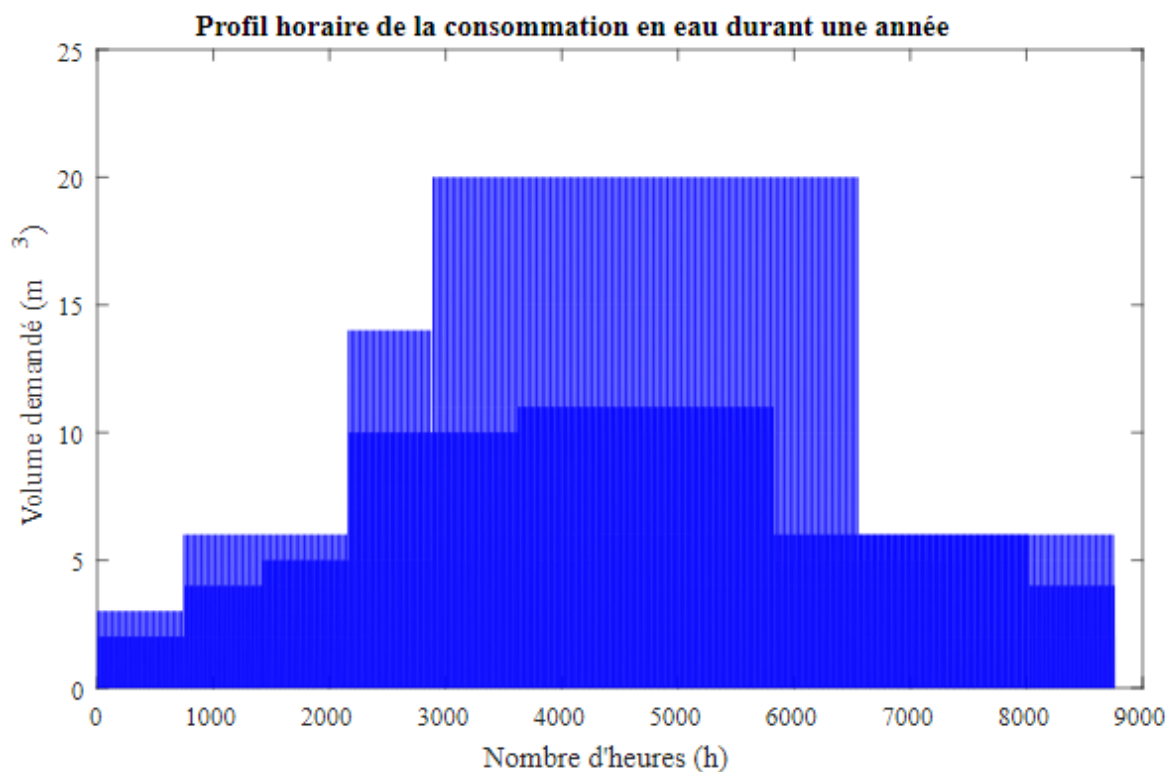
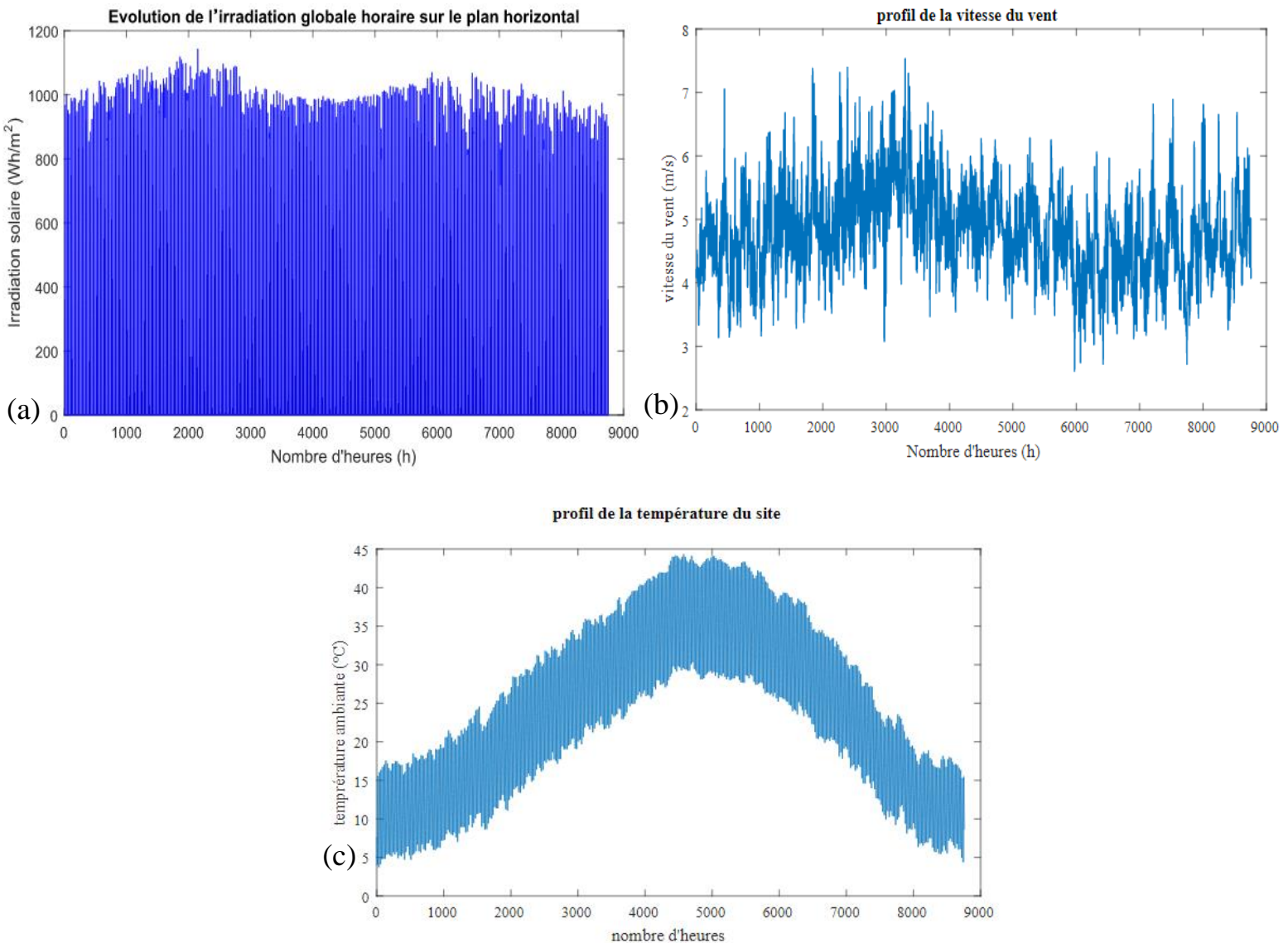


Figure 4. 1 Profil horaire de consommation en eau adopté

La simulation est effectuée sur une période d'analyse d'une année, en utilisant les données horaires de l'irradiation solaire sur le plan horizontale, de la vitesse du vent et de la température ambiante, tracées sur la figure 4.2. Ces données ont été mesurées sur le site de Timimoune durant les années 2005 à 2016.



**Figure 4.2** Valeurs moyennes horaires des conditions météorologiques : (a) l'irradiation solaire sur le plan horizontal, (b) la vitesse du vent et (c) la température ambiante

Deux paramètres de dimensionnement sont à déterminer à savoir : le nombre de modules photovoltaïques (kc200gt choisi comme module utilisé) et le nombre d'éoliennes (Eolienne 48 Volts 1000 Watts complète nouvelle génération). Les relations liant ces 2 paramètres à la probabilité de déficit en eau de la charge (Loss of Water Supply Probabilité LWSP) et au coût sur la durée de vie du système (Life Cycle Cost LCC) sont analysées.

A partir du modèle de fiabilité basé sur le concept de la LWSP, nous avons effectué plusieurs simulations permettant de calculer la probabilité de déficit eau (LWSP) et ce, en considérant diverses combinaisons (taille du générateur PV, taille de l'aérogénérateur, capacité de stockage d'eau exprimée en jours d'autonomie et la hauteur manométrique de pompage).

Au vu du bon déroulement des simulations, nous avons choisi le nombre de modules photovoltaïques de 1 à 30 modules d'une puissance de 200W.

Celle de l'aérogénérateur de 1 à 10 éoliennes de puissance équivalente de 1000W. Les caractéristiques techniques du générateur PV, de l'aérogénérateur et de la motopompe sont données en annexe A, B et C respectivement.

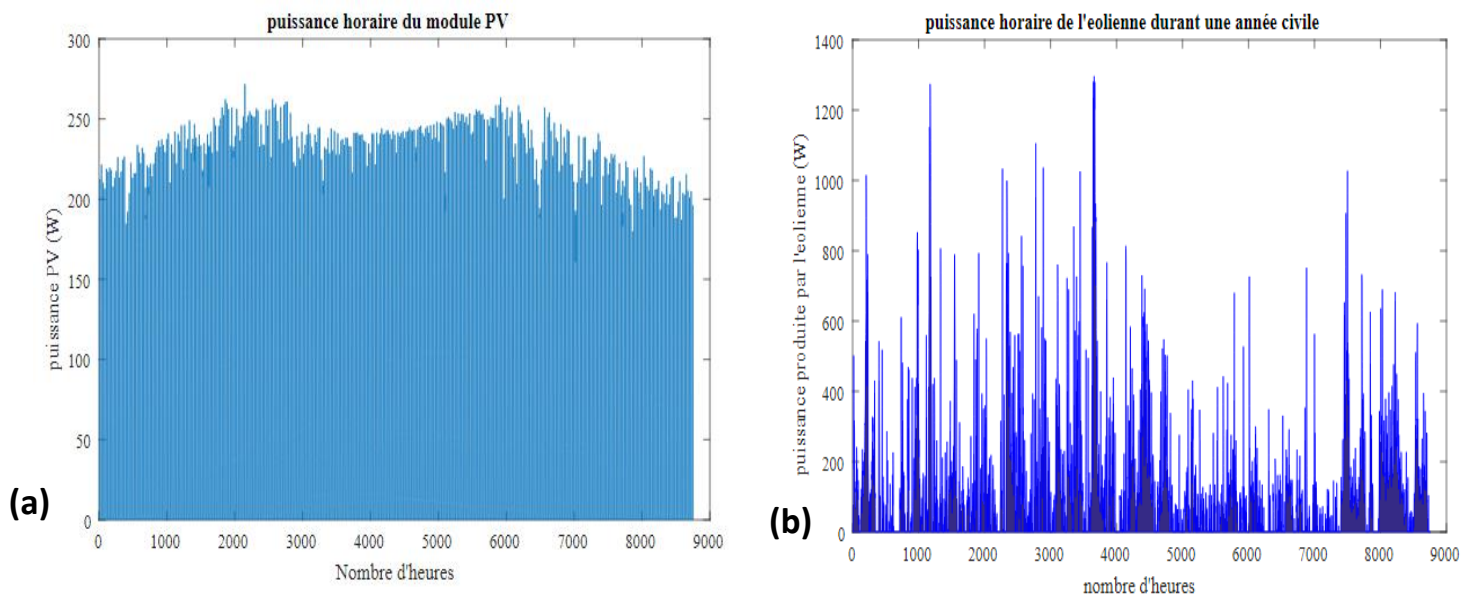


Figure 4. 3 Puissance horaire durant une année : (a) module PV, (b) l'éolienne.

Par ailleurs la capacité de stockage du réservoir est exprimée en termes de nombres de jours d'autonomie (1 à 3 jours d'autonomie). Une capacité de stockage d'une journée est équivalente à  $90\text{m}^3$  d'eau.

Quatre valeurs de la probabilité de déficit en eau (LWSP) ont été choisies dans cette simulation (0%, 0,1%, 1% et 5%). Elles correspondent à des taux de défaillance différents. Une LWSP égale à zéro correspond à une satisfaction totale de la demande en eau (système non défaillant).

Des hypothèses simplificatrices ont été prises en considération afin de mener à bien cette simulation, qui est :

- Le réservoir est construit près du puits, est considéré plein au début de la simulation
- L'effet d'évaporation est négligé
- Les rendements des différents composants sont considérés constants pour toutes configurations confondues.
- Le phénomène du vieillissement est omis
- Les taux d'inflation et d'intérêt sont considérés constants pendant toute la durée de l'étude qui est, dans notre cas, 25 ans.

### 4.2. Résultats relatifs au modèle de fiabilité

#### 4.2.1. Impacts de la capacité de stockage et du taux de défaillance pour une hauteur donnée sur les dimensions du système.

Pour le profil de demande en eau utilisé sur notre site et pour les différentes capacités de stockage (1, 2 et 3 jours d'autonomie), les résultats des simulations issus du modèle de la fiabilité, sont présentés dans les figures 4.4, 4.5 et 4.6 pour les différentes hauteurs manométriques (20m, 30m et 40m)

Sur ces figures, les différentes configurations satisfaisant les besoins de la demande en eau pour des LWSP désirées respectivement 0%, 0,1%, 1% et 5% sont représentées pour différentes capacités de stockage et hauteurs de pompage.

Les résultats de simulation montrent que la taille du générateur PV et de l'aérogénérateur dépendent de la LWSP désirée, du nombre de jours d'autonomie et de la hauteur de pompage. Elle est importante pour de faibles valeurs de la LWSP et de jours d'autonomie et pour les grandes hauteurs de pompage.

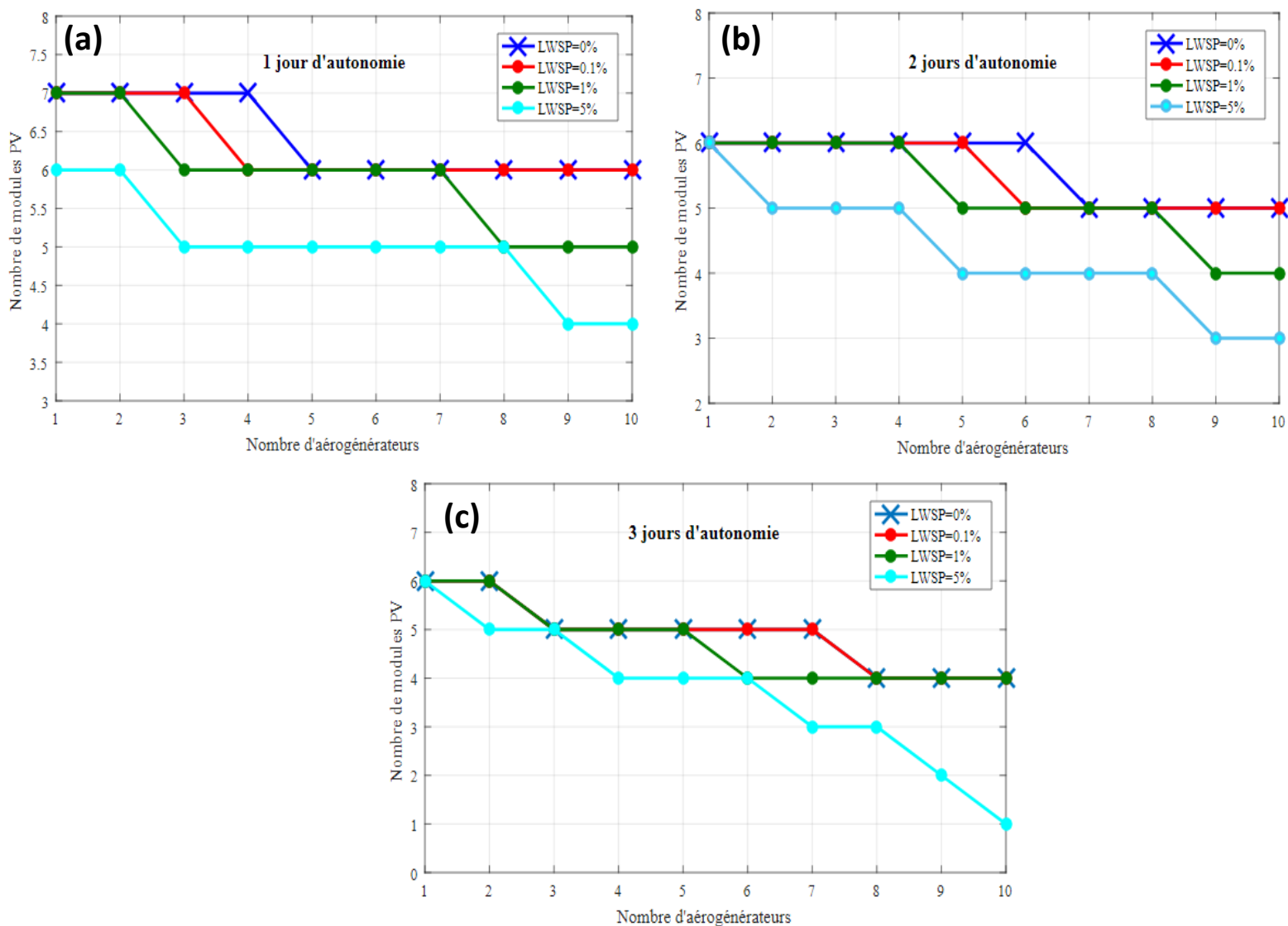


Figure 4. Configuration du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour h= 20 m : a) 1 jr d'autonomie, b) 2 jrs d'autonomie et c) 3 jrs d'autonomie



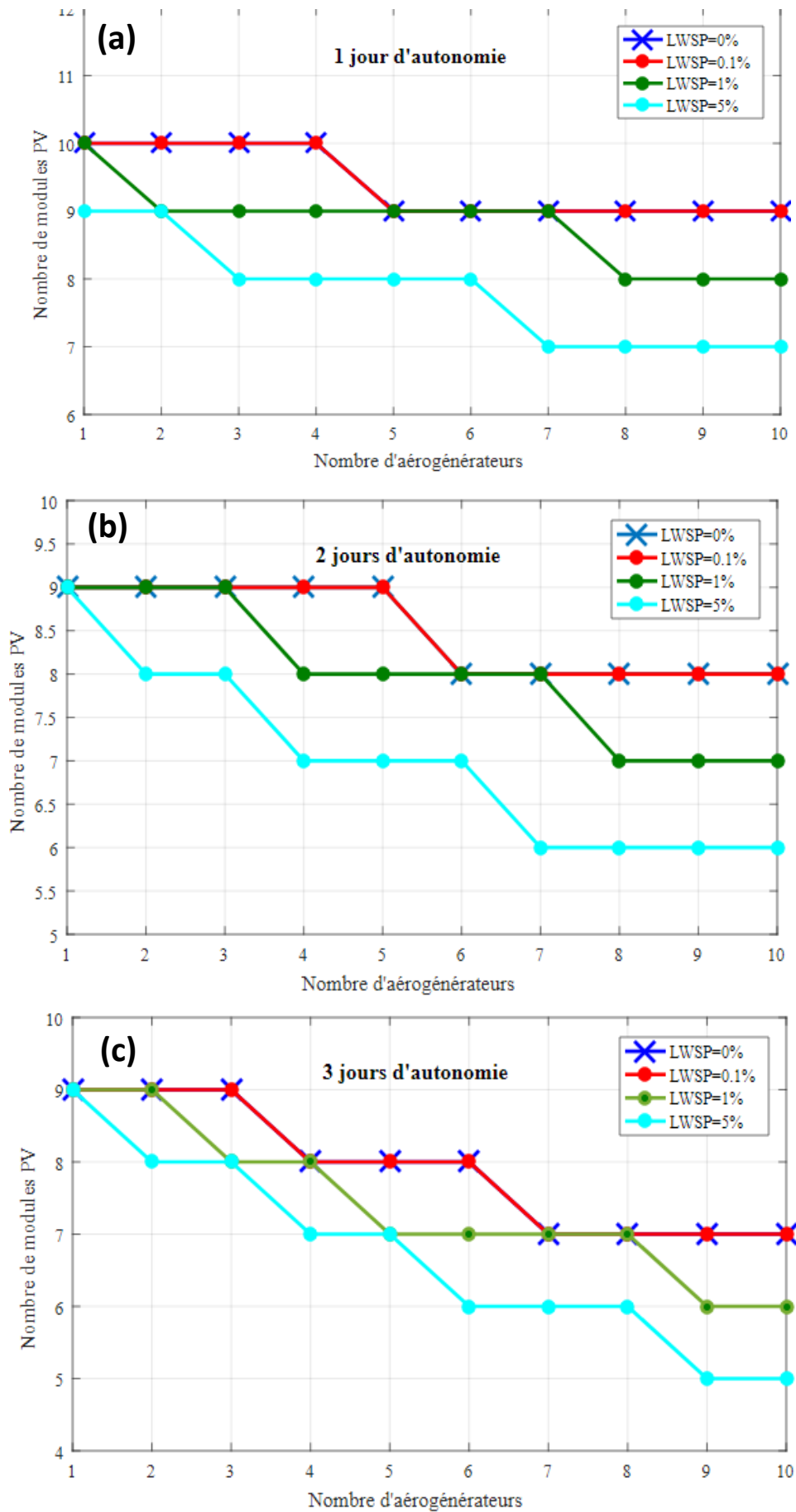


Figure 4. 5 Configuration du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour une hauteur de 30 mètres : a) 1 jr d'autonomie, b) 2 jrs d'autonomie et c) 3 jrs d'autonomie

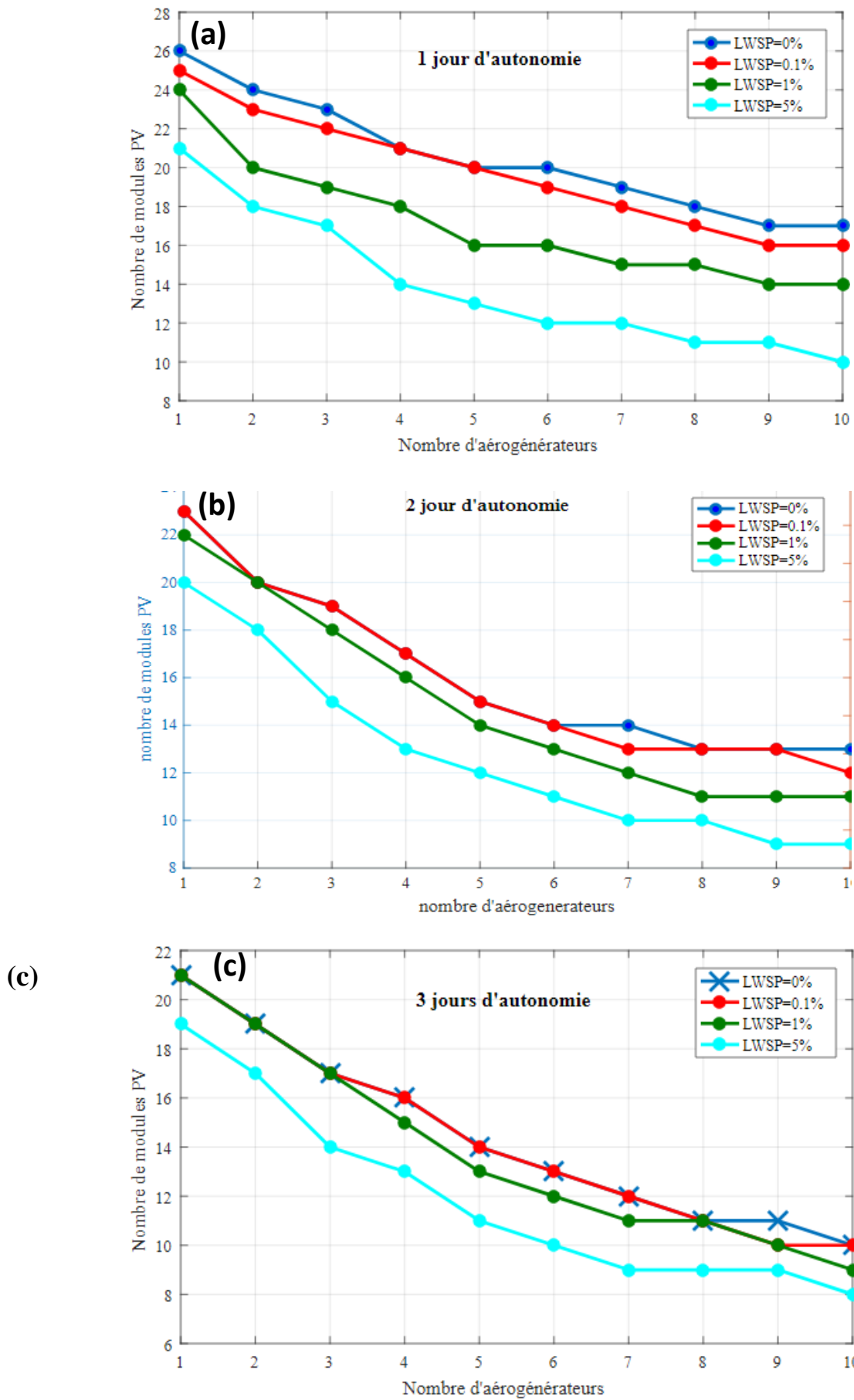
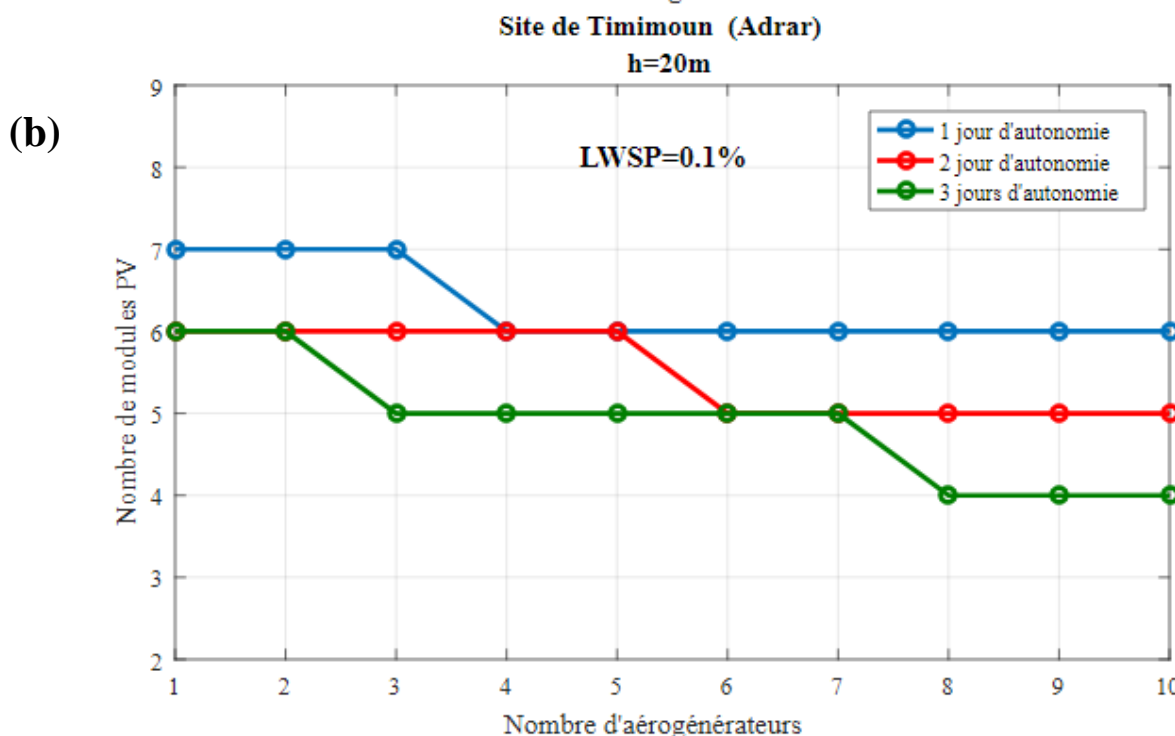
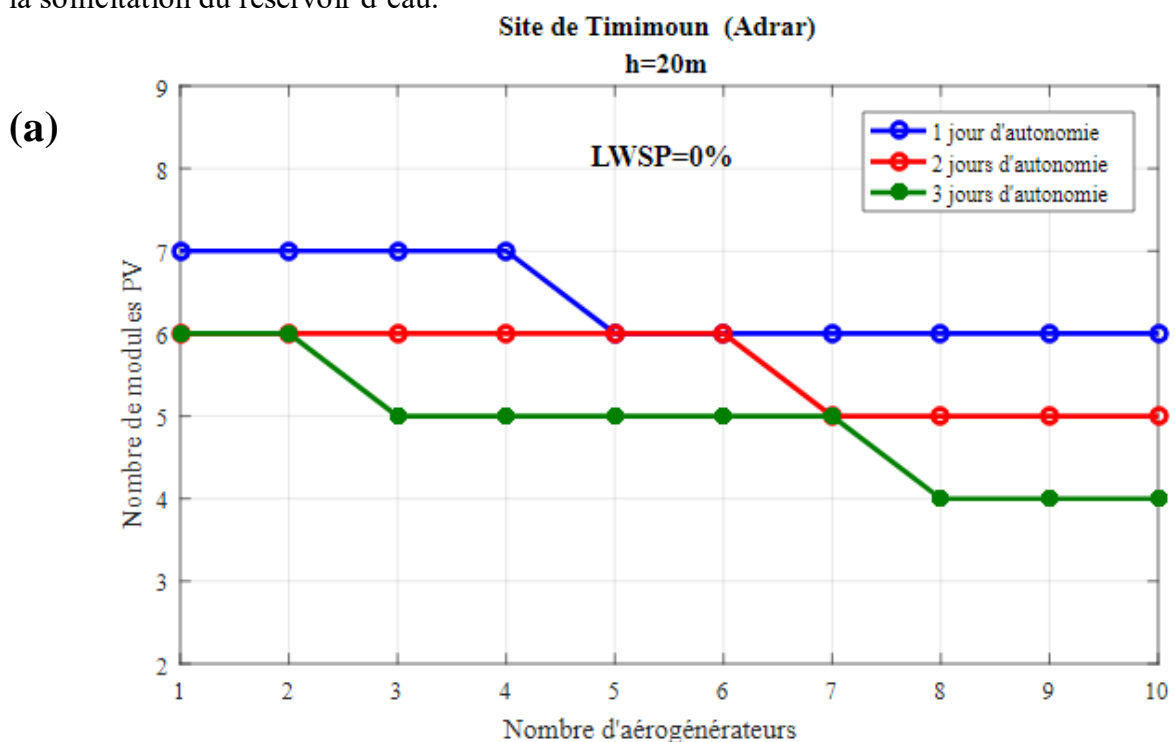


Figure 4. 6 Configuration du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour une hauteur de 40mètres : a) 1 jr d'autonomie, b) 2 jrs d'autonomie et c) 3 jrs d'autonomie

**4.2.2. Influence du choix de la valeur de LWSP et de la capacité de stockage pour une hauteur donnée sur les dimensions du système**

Il est évident que pour un niveau de fiabilité élevé, c'est à dire de faibles valeurs de la LWSP et pour des faibles capacités de stockage (jours d'autonomie), une plus grande configuration du système de pompage est exigée surtout pour des hauteurs de pompage plus importantes. Plus LWSP est faible plus l'écart entre les différentes capacités de stockage est ressentie pour les différentes hauteurs, et plus LWSP augmente plus l'influence des jours d'autonomie diminue, on retrouve donc pratiquement les mêmes configurations surtout pour les nombres de jours d'autonomie élevés voir les figure 4.7, 4.8 et 4.9.

De même, dans le cas d'une autonomie totale qui correspond à une LWSP = 0%, la taille de générateur photovoltaïque et de l'aérogénérateur doit être plus importante si on veut diminuer la sollicitation du réservoir d'eau.



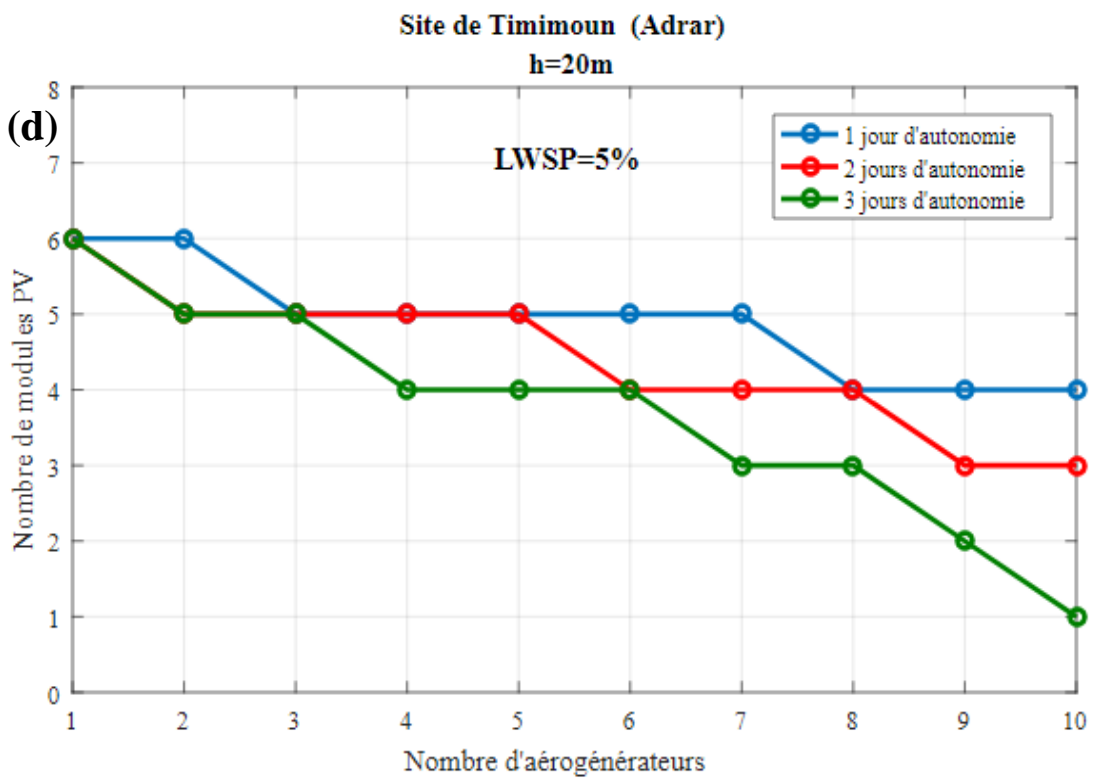
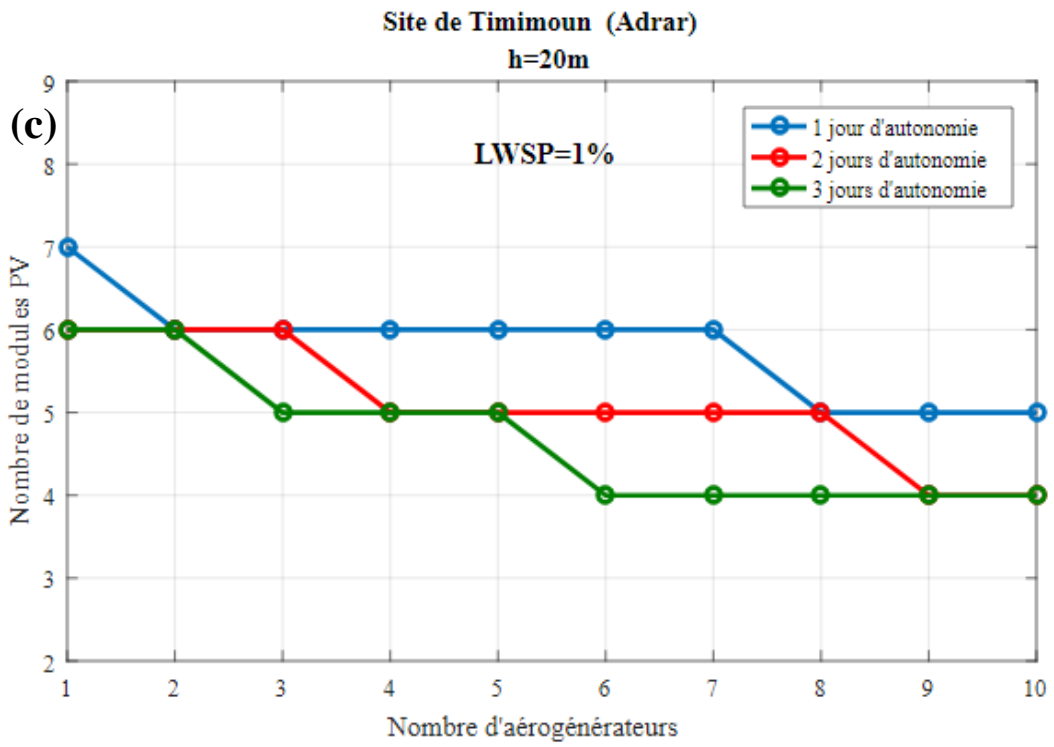
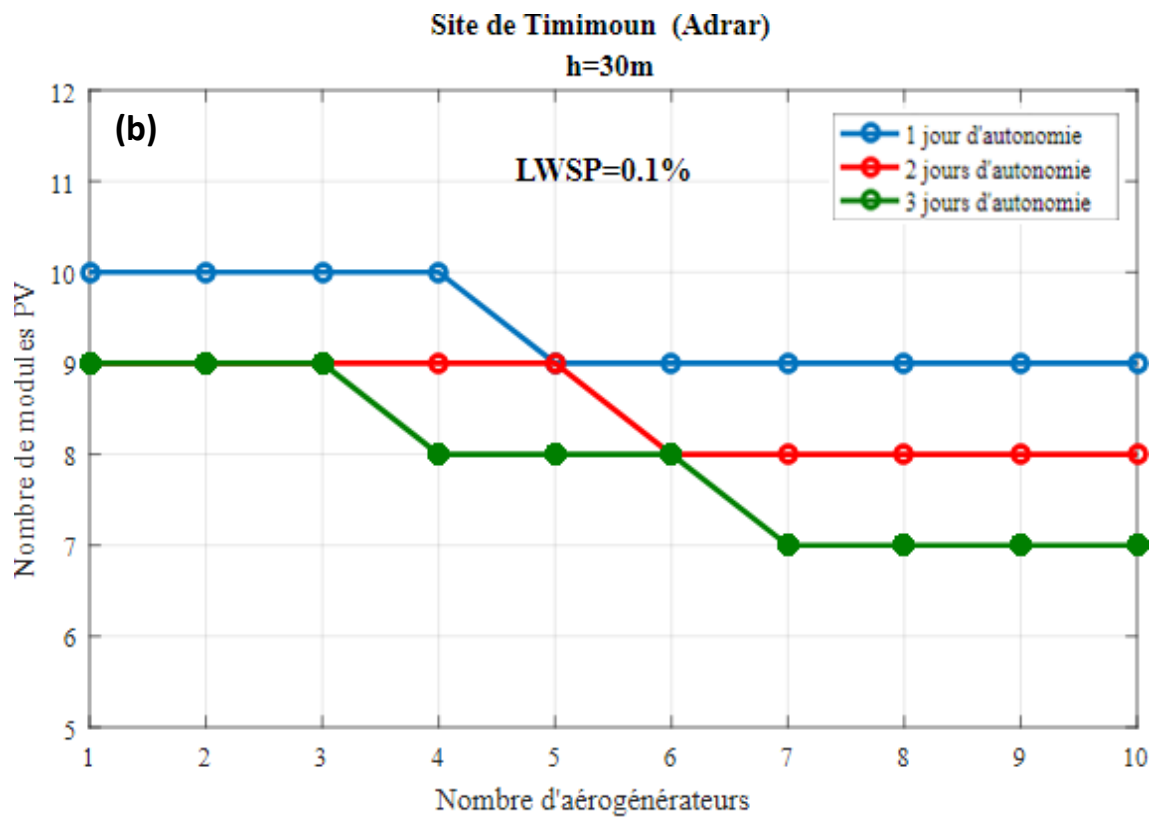
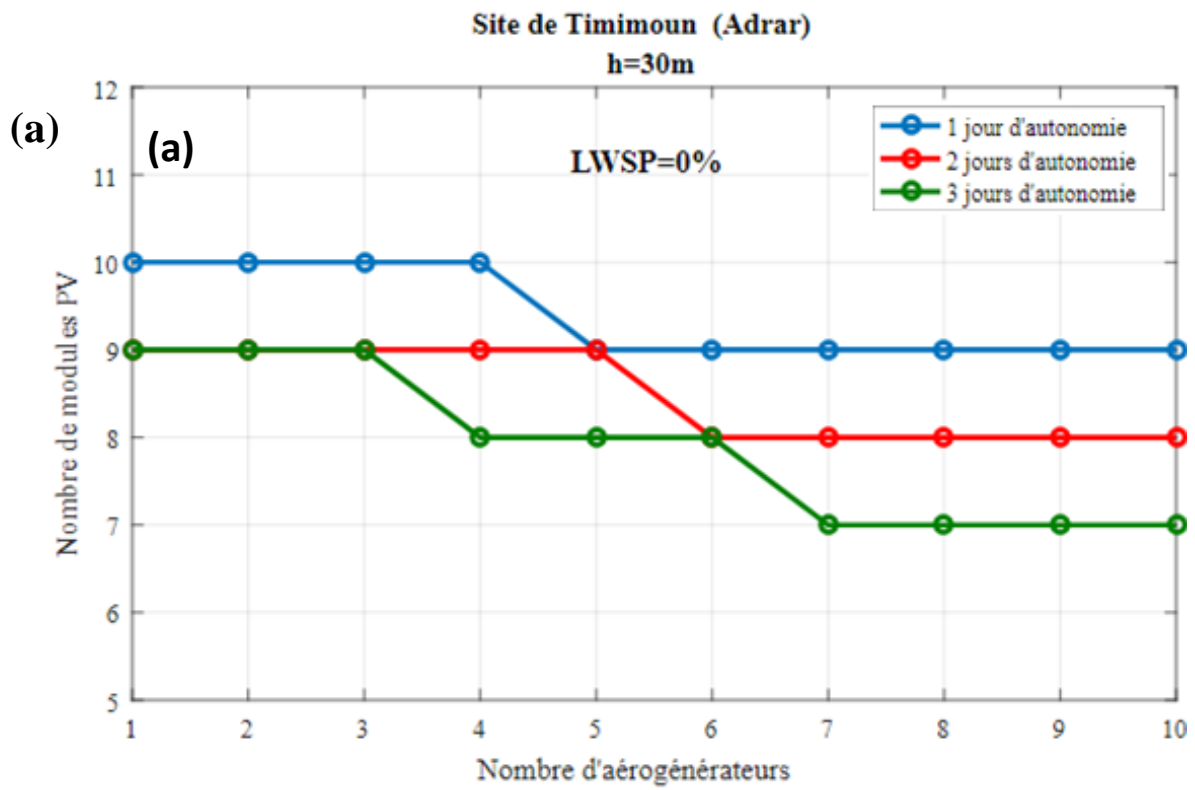


Figure 4. 7 Configuration du système en fonction de LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 20 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%



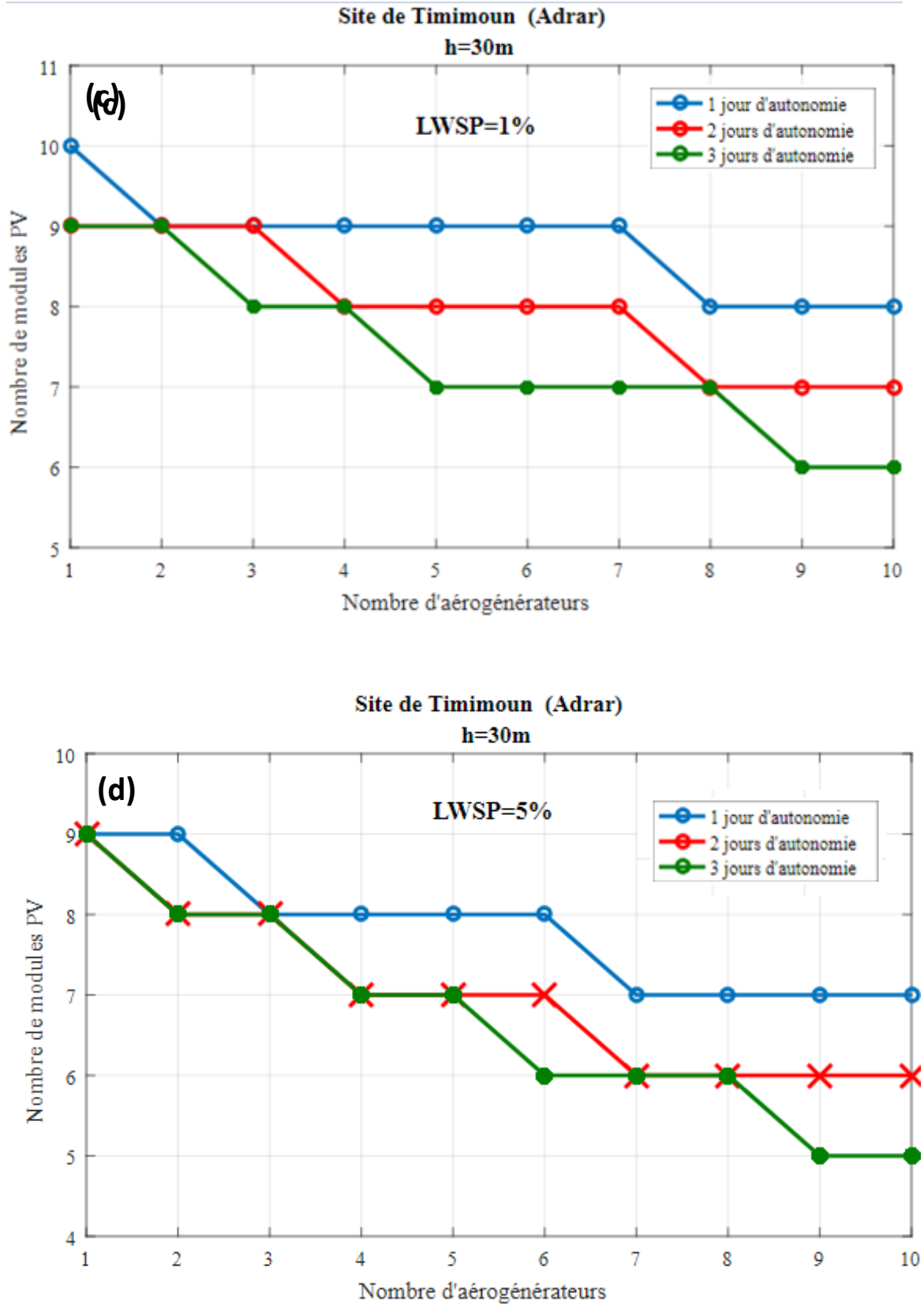
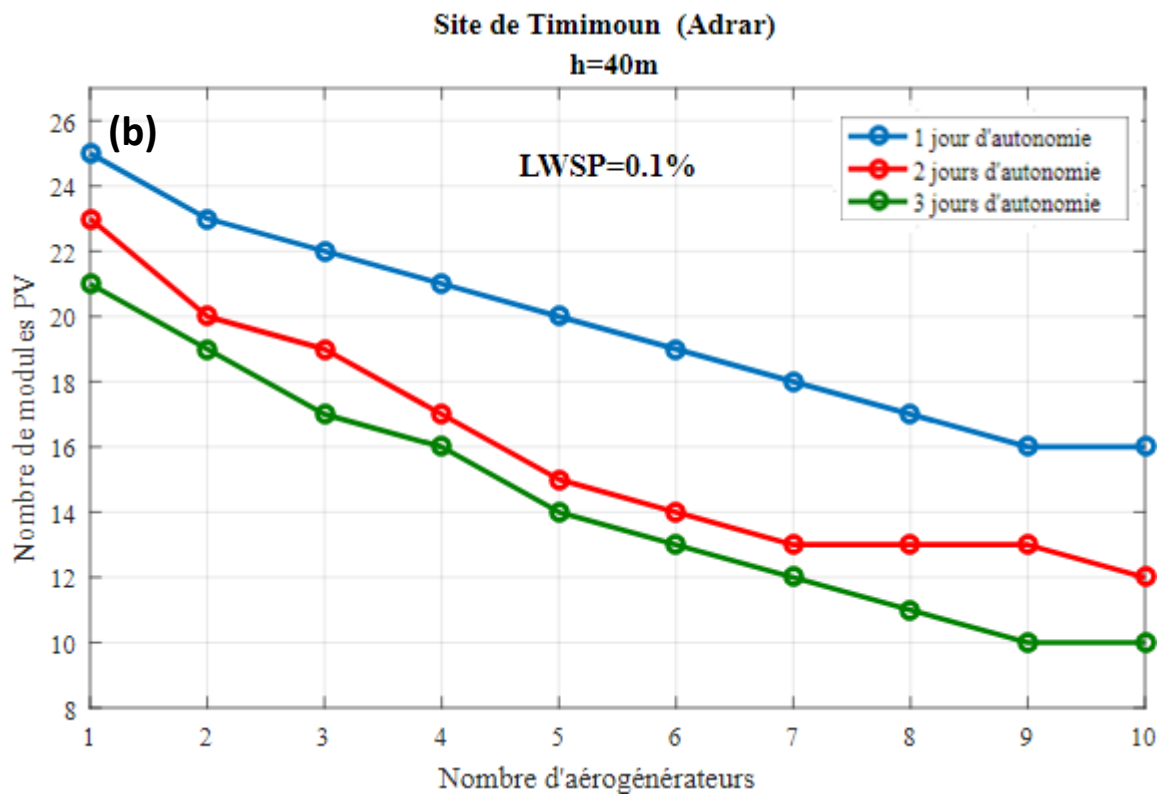
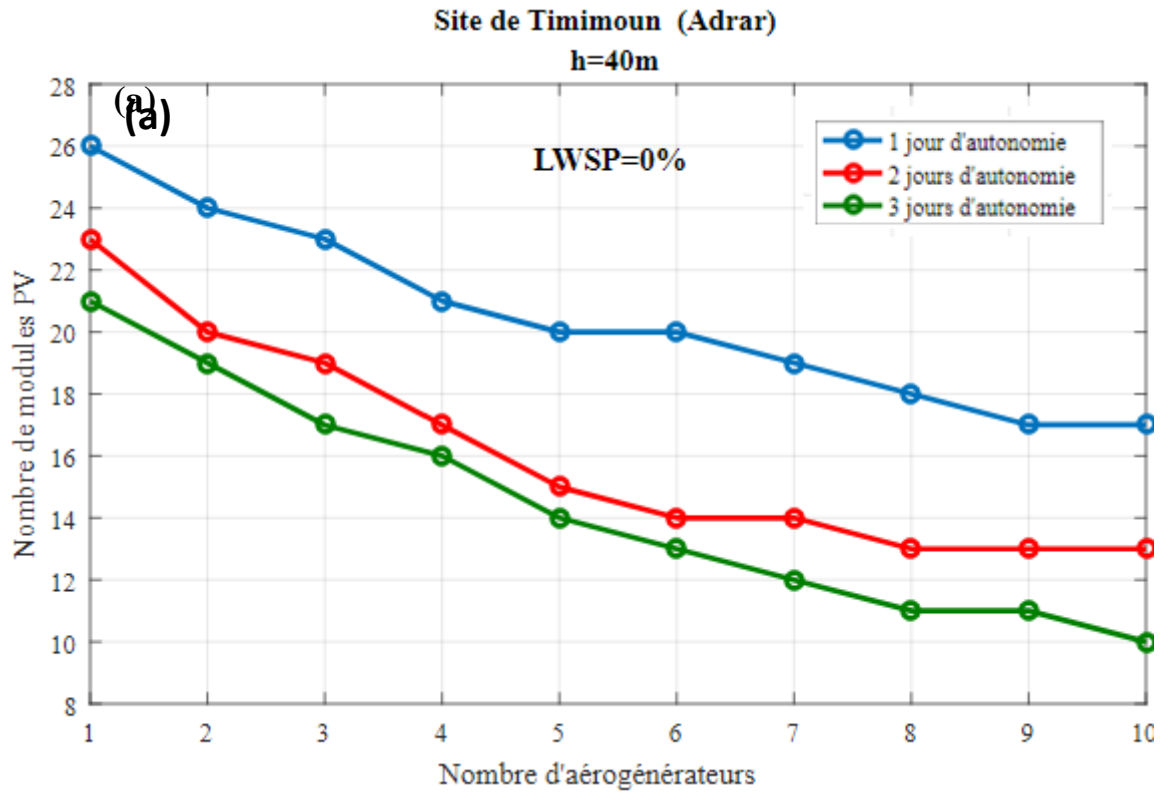


Figure 4. 8 Configuration du système en fonction de LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 30 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%



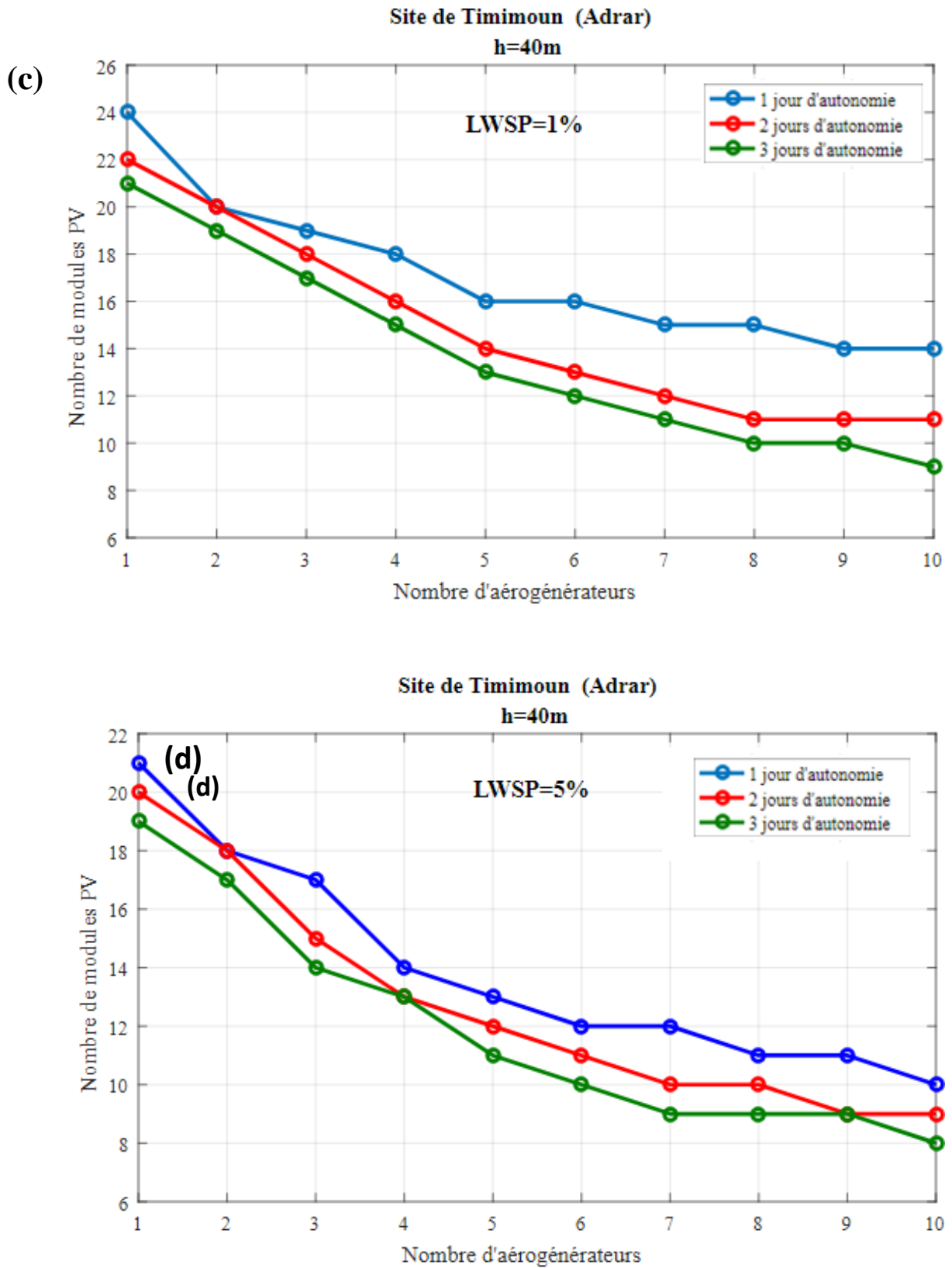


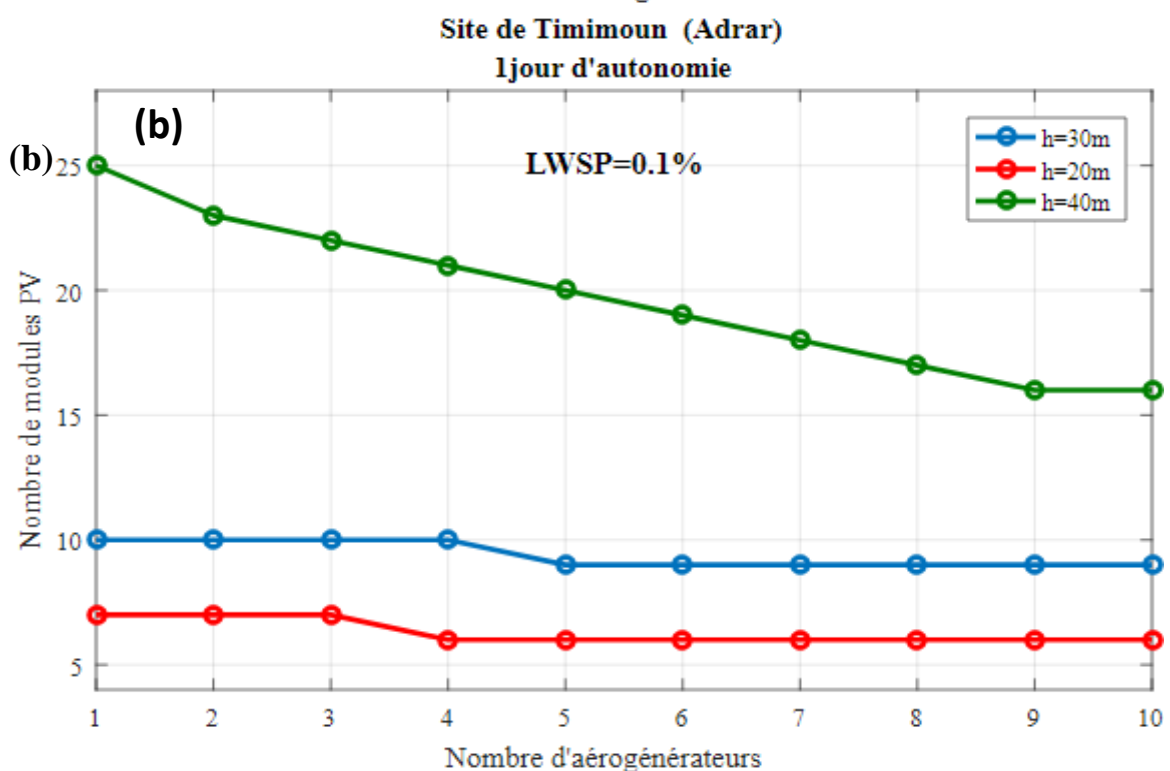
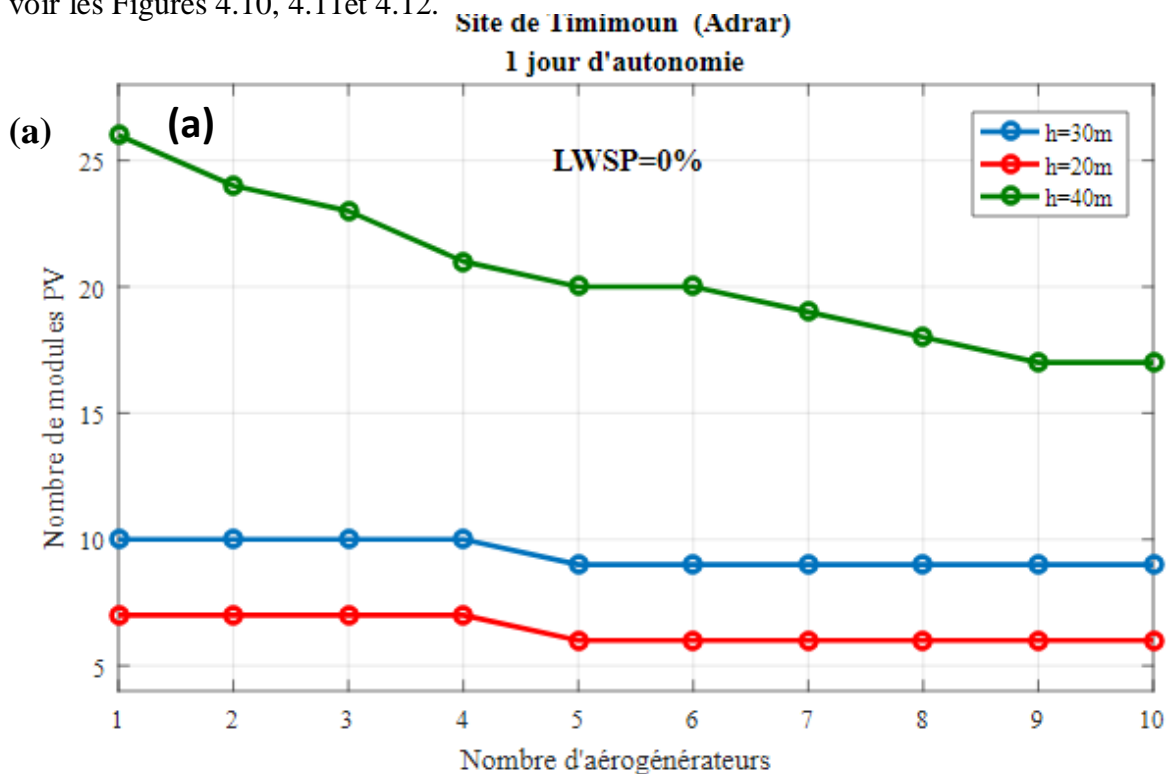
Figure 4. 9 Configuration du système en fonction de la LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 40 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%



### 4.2.3. Influence du choix de la valeur de LWSP et de la hauteur pour une capacité de stockage donnée sur les dimensions du système

Dans cette section nous allons observer l'influence de deux facteurs sur les dimensions du système qui sont : la valeur de la LWSP et de la hauteur manométrique de pompage pour une capacité de stockage donnée sur la configuration du système.

On remarque que pour des faibles valeurs de la LWSP et pour des grandes hauteurs manométriques, une plus grande configuration du système de pompage est requise surtout pour des capacités de stockage moins importantes (jours d'autonomie). Plus LWSP est faible plus l'écart entre les différentes hauteurs est visible pour les capacités de stockage données, et plus la LWSP augmente plus l'influence de la hauteur diminue, on retrouve donc pratiquement les mêmes configurations surtout pour les nombres de jours d'autonomie élevés voir les Figures 4.10, 4.11 et 4.12.



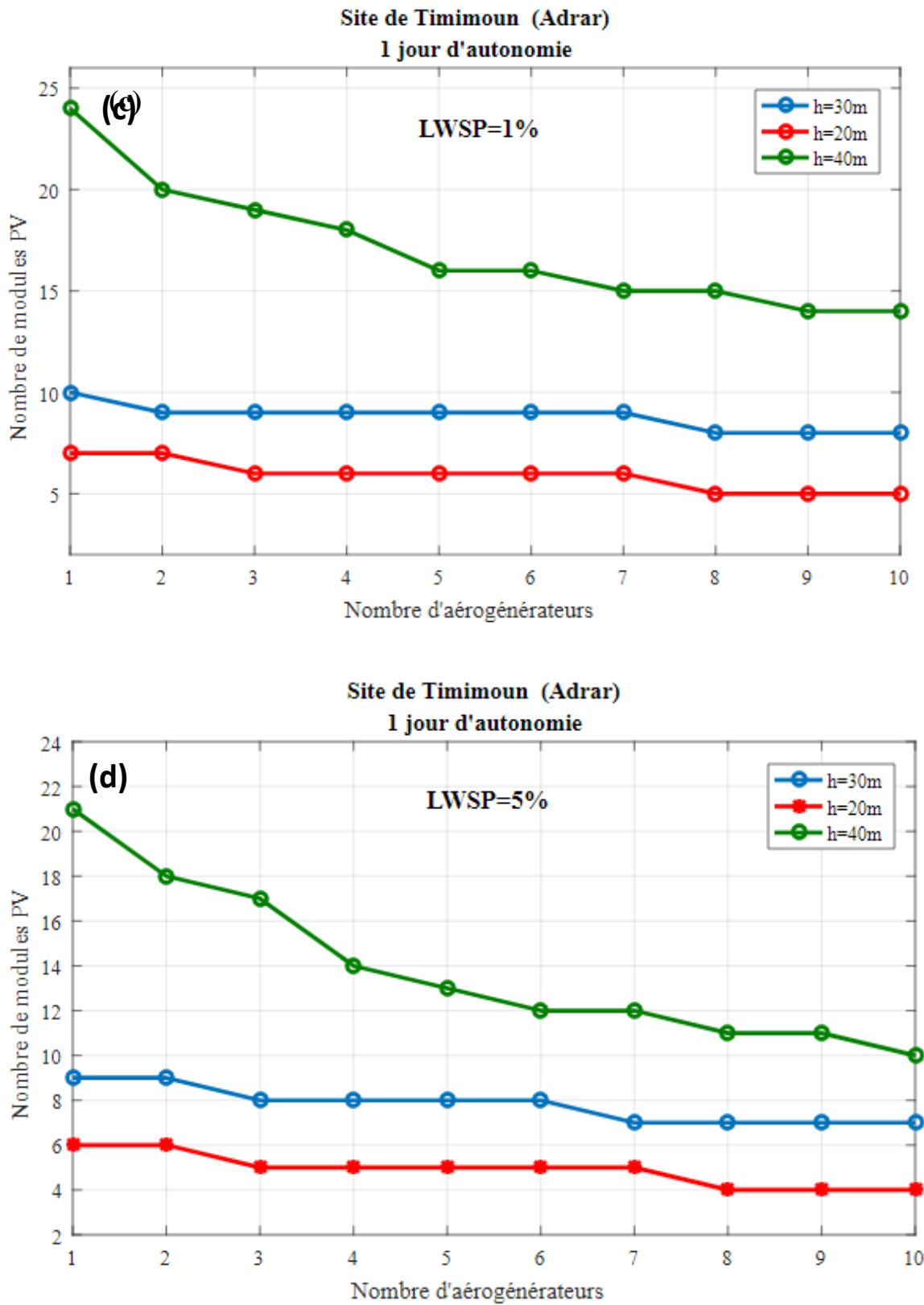
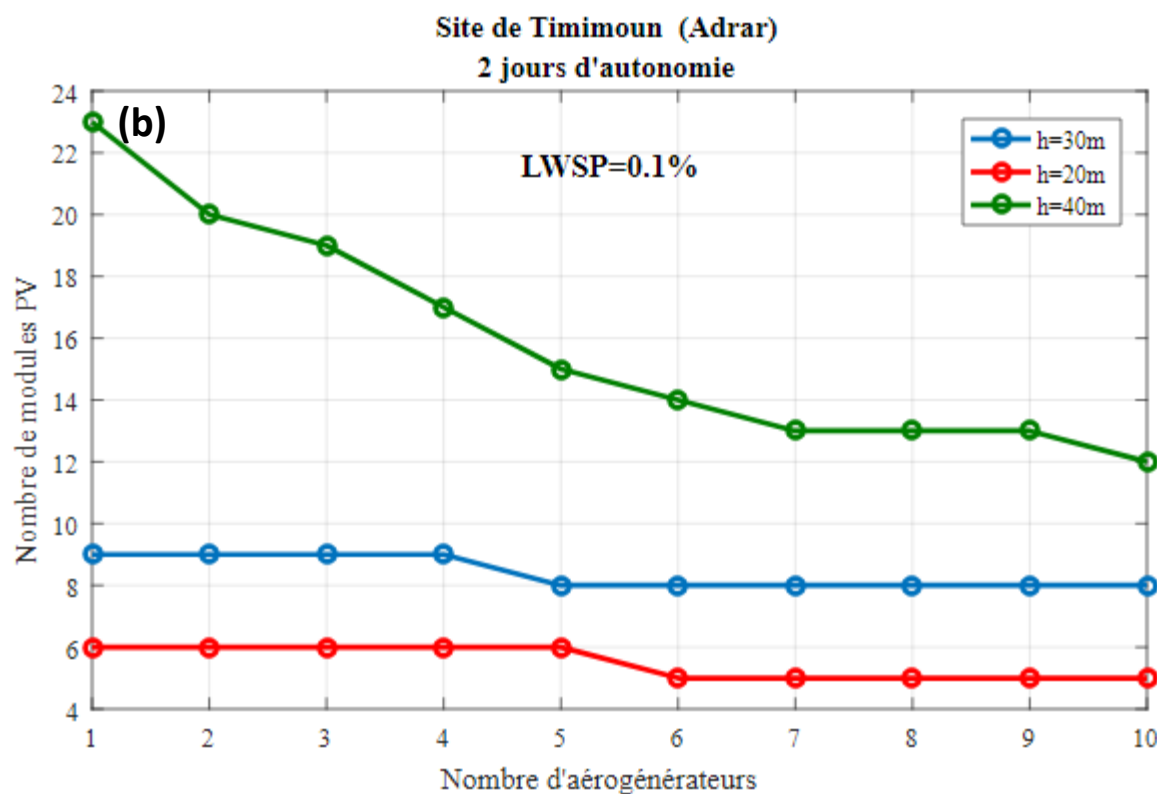
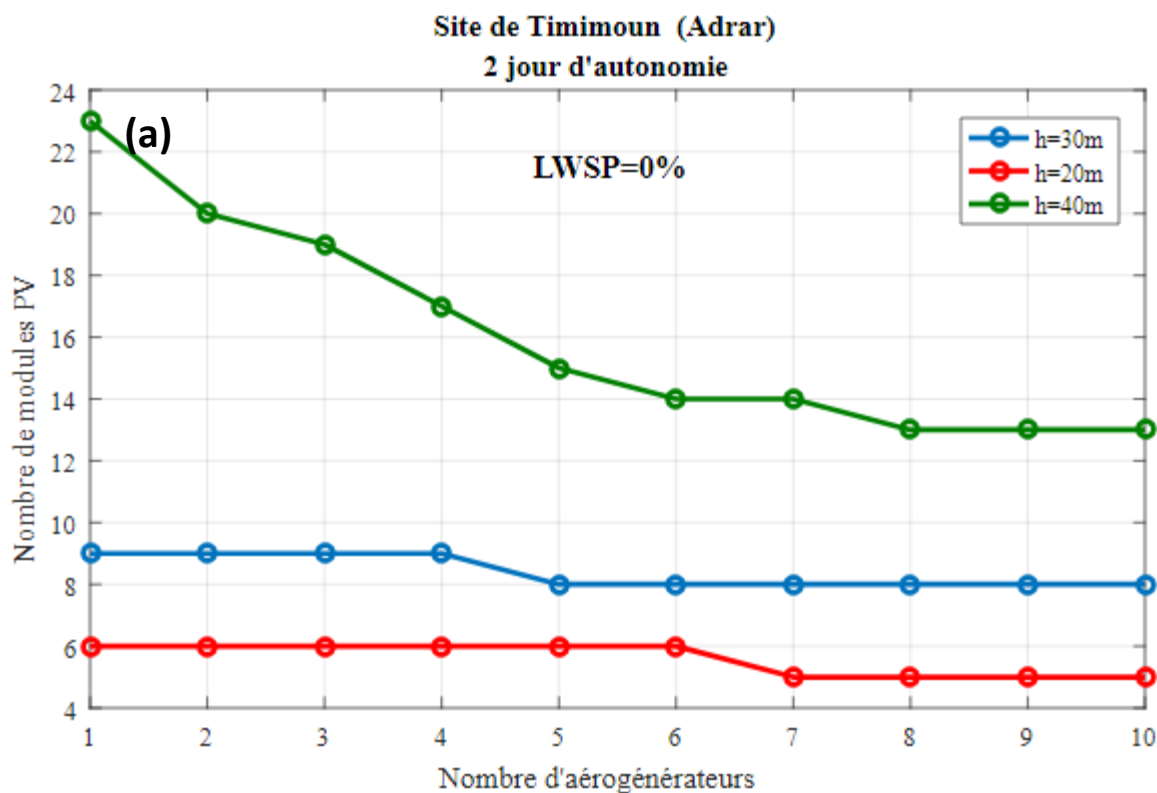


Figure 4. 10 Configuration du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de 1 journée d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%



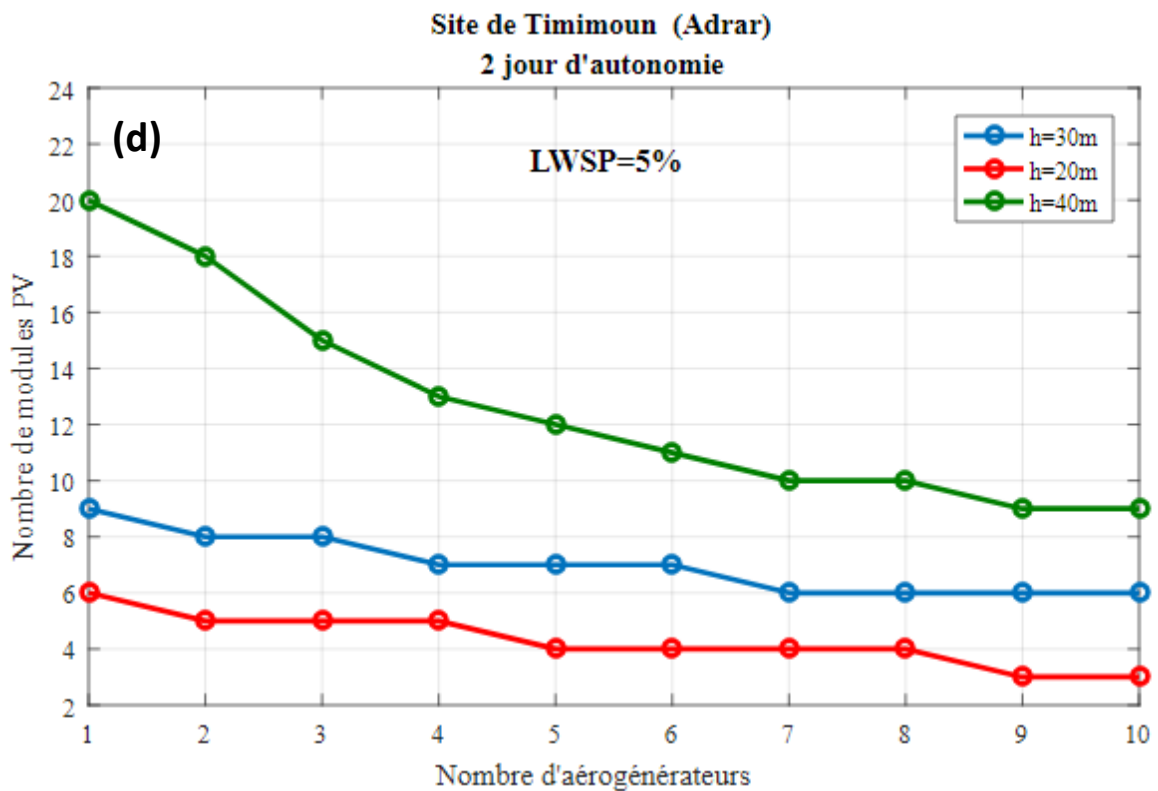
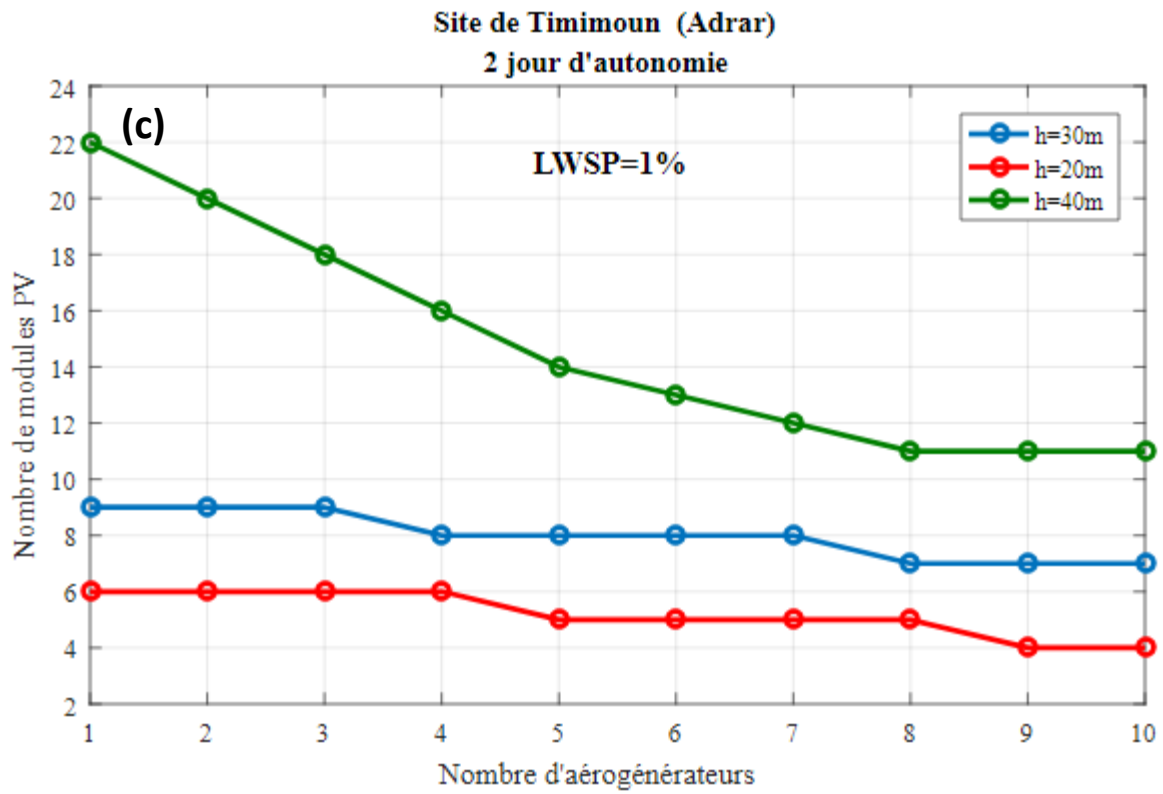
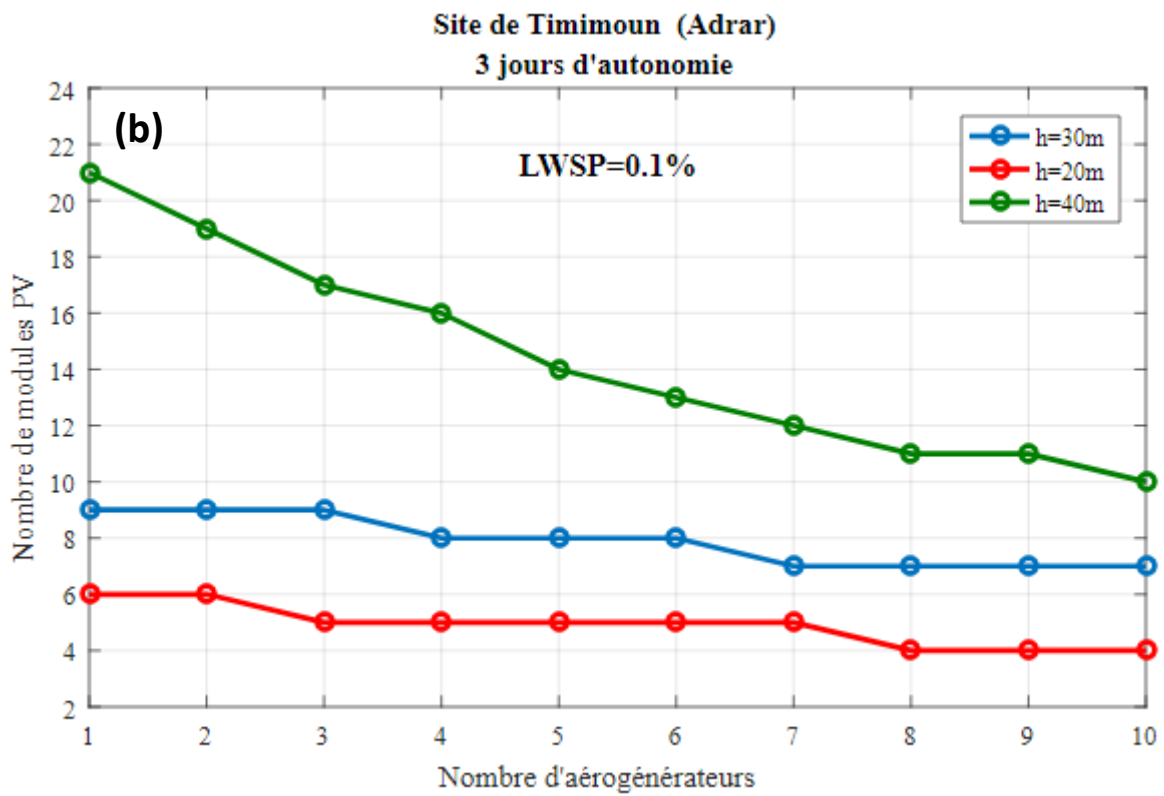
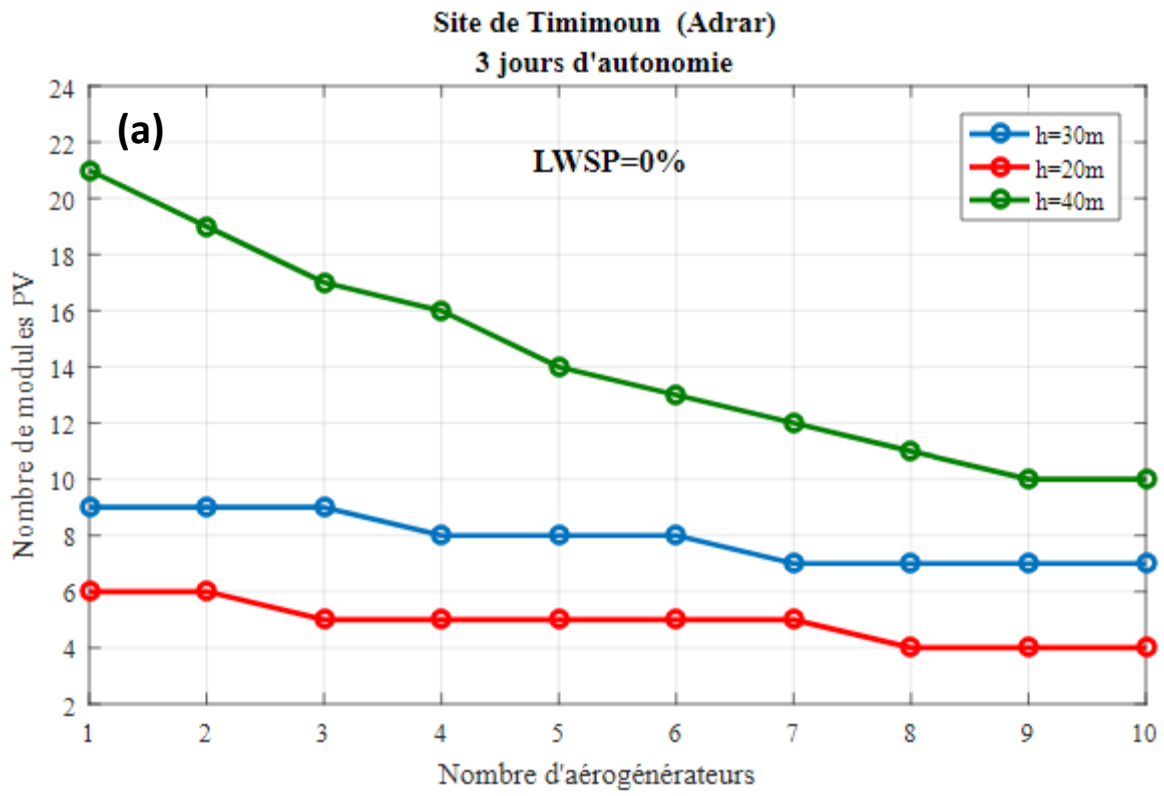


Figure 4. 11 Configuration du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de 2 jours d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%



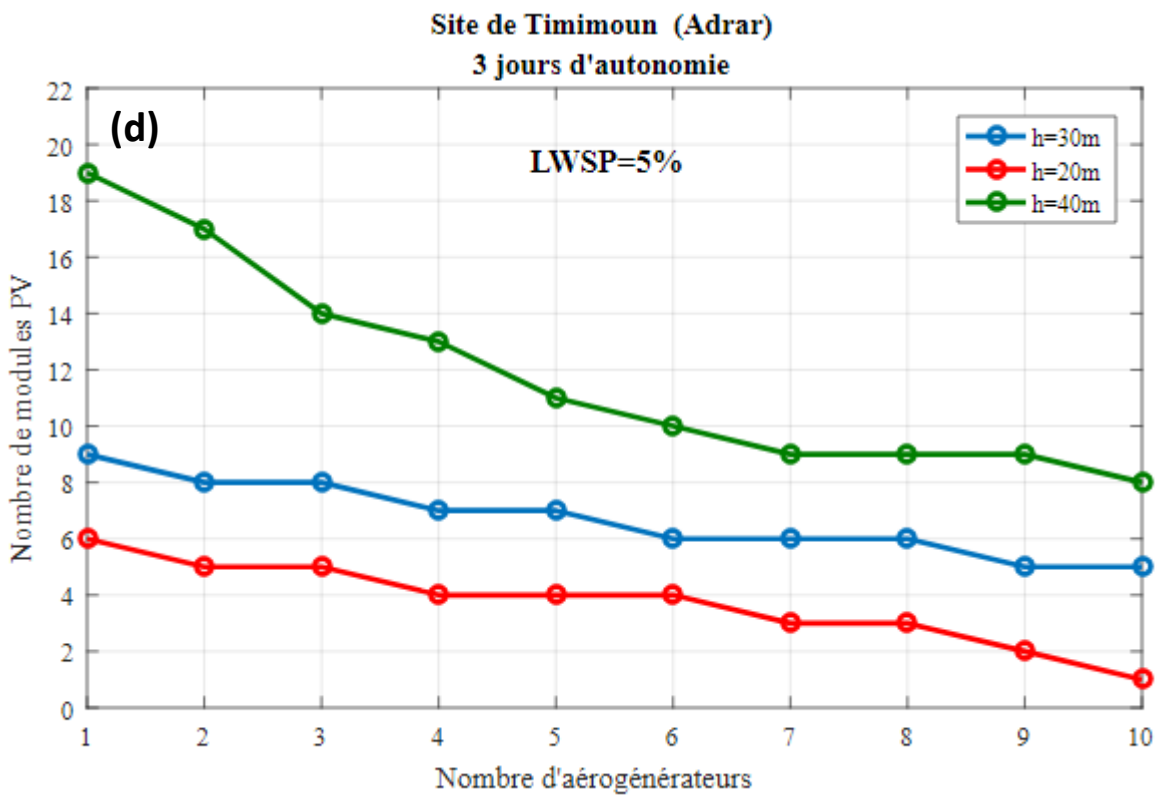
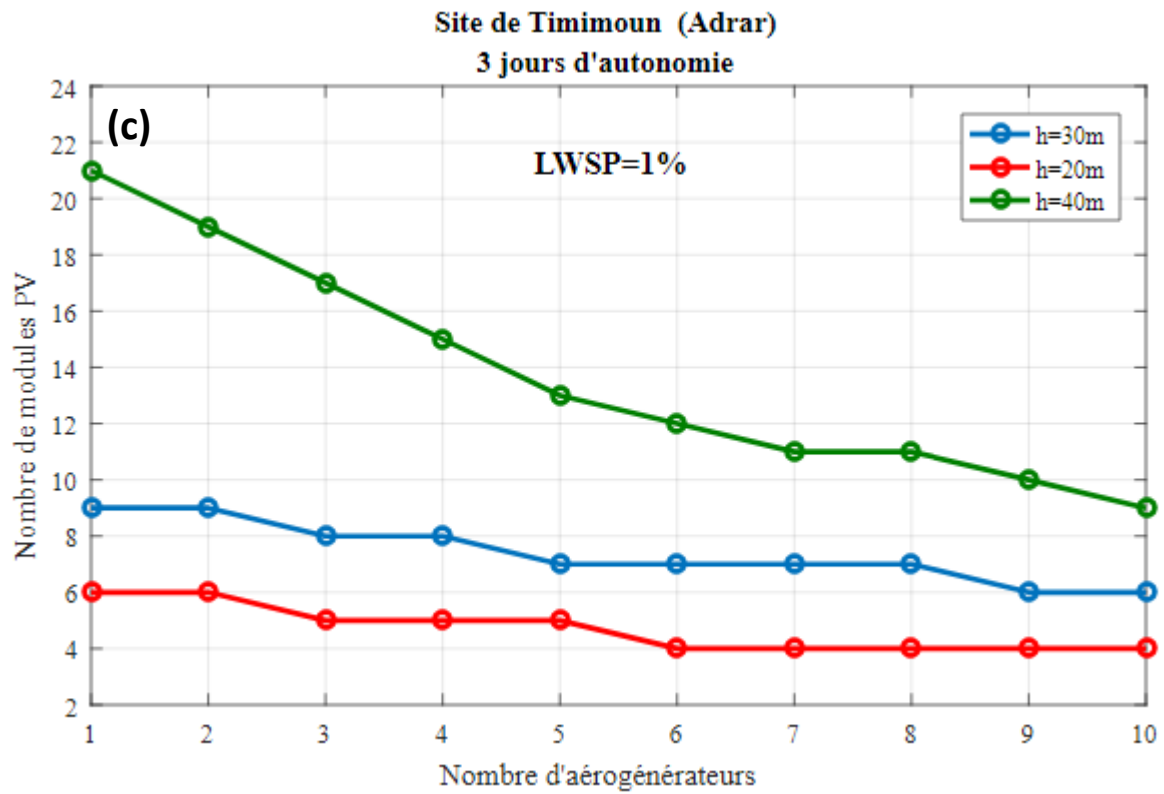


Figure 4. 12 Configuration du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de 3 jours d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%

### 4.3.Résultats de l'application correspondant au modèle économique

L'optimisation économique du système hybride PV/éolien consiste à choisir, parmi l'ensemble de configurations satisfaisant le critère de fiabilité (LWSP désirée), la configuration qui présente le coût minimal. En utilisant le modèle économique développé en chapitre 3, plusieurs simulations sont effectuées pour déterminer les différents coûts à savoir : Le coût total sur le cycle de vie du système (LCC).

Dans cette section, nous allons présenter les résultats obtenus suite au modèle économique pour notre système hybride.

Le tableau ci-dessous représente les paramètres utilisés dans le calcul du coût total sur le cycle de vie du système (LCC).

*Tableau 6 Coût unitaire, durée de vie des composants du système et les taux d'inflation et d'intérêt utilisés*

Composants	Prix Unitaire (\$/W)	Coût de la maintenance 1 ère année %	Durée de vie (année)	Taux d'intérêt (%)	Taux d'inflation (%)
Module PV	1.5	1% du coût	25	8	4
Moteur - pompe	0.7	3% du coût	10		
Réservoir	130	1% du coût	25		
Convertisseur	0.711	0% du coût	10		
éolienne	2.6	3% du coût	20		

#### 4.3.1. Influence de la capacité de stockage et du taux de défaillance LWSP pour une hauteur donnée sur le coût du système

Les configurations qui répondent aux exigences des LWSP désirées, pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) à des hauteurs données, sont obtenues à partir de simulations effectuées. Après avoir accompli le critère technique de fiabilité, on étudie Le coût total sur le cycle de vie du système (LCC).

Les résultats des simulations du modèle économique, sont présentés dans les figures ci-dessous ainsi que les configurations du système sont analysés.

Il est évident qu'à chaque fois que la hauteur de pompage augmente le coût du système sur la durée de vie augmente automatiquement, mais le quel dès ces 3 paramètres influe plus ; l'effet de la hauteur, le niveau de fiabilité (LWSP) ou bien la capacité de stockage (jours d'autonomie).

A partir des figures 4.13-4.18, on remarque clairement le niveau de fiabilité et le nombres de jours d'autonomie influe peu comparant à la hauteur manométrique , différence noté clairement en passant d'une figure à une autre en modifiant la hauteur .On remarque aussi que la différence commence à se faire ressentir qu'à partir de 40 mètres de hauteur notamment parce que les configuration du système sont beaucoup plus importantes .

Ces figures nous permettent de constater que chaque courbe de coût, présente une valeur minimale. Cette dernière correspond à la configuration optimale répondant à l'exigence de fiabilité du système.

### 4.3.2. Influence du choix de la valeur de LWSP et de la hauteur pour une capacité de stockage donnée sur les dimensions du système

A partir des figures 4.19-4.21 on remarque nettement la différence des coûts selon la hauteur, il est maximale pour la hauteur de 40m et minimal pour la hauteur de 20m ce qui est tout à fait logique et il augmente en diminuant la LWSP et les jours d'autonomie mais il est d'une légère différence négligé en comparant à la variation par rapport à la hauteur.

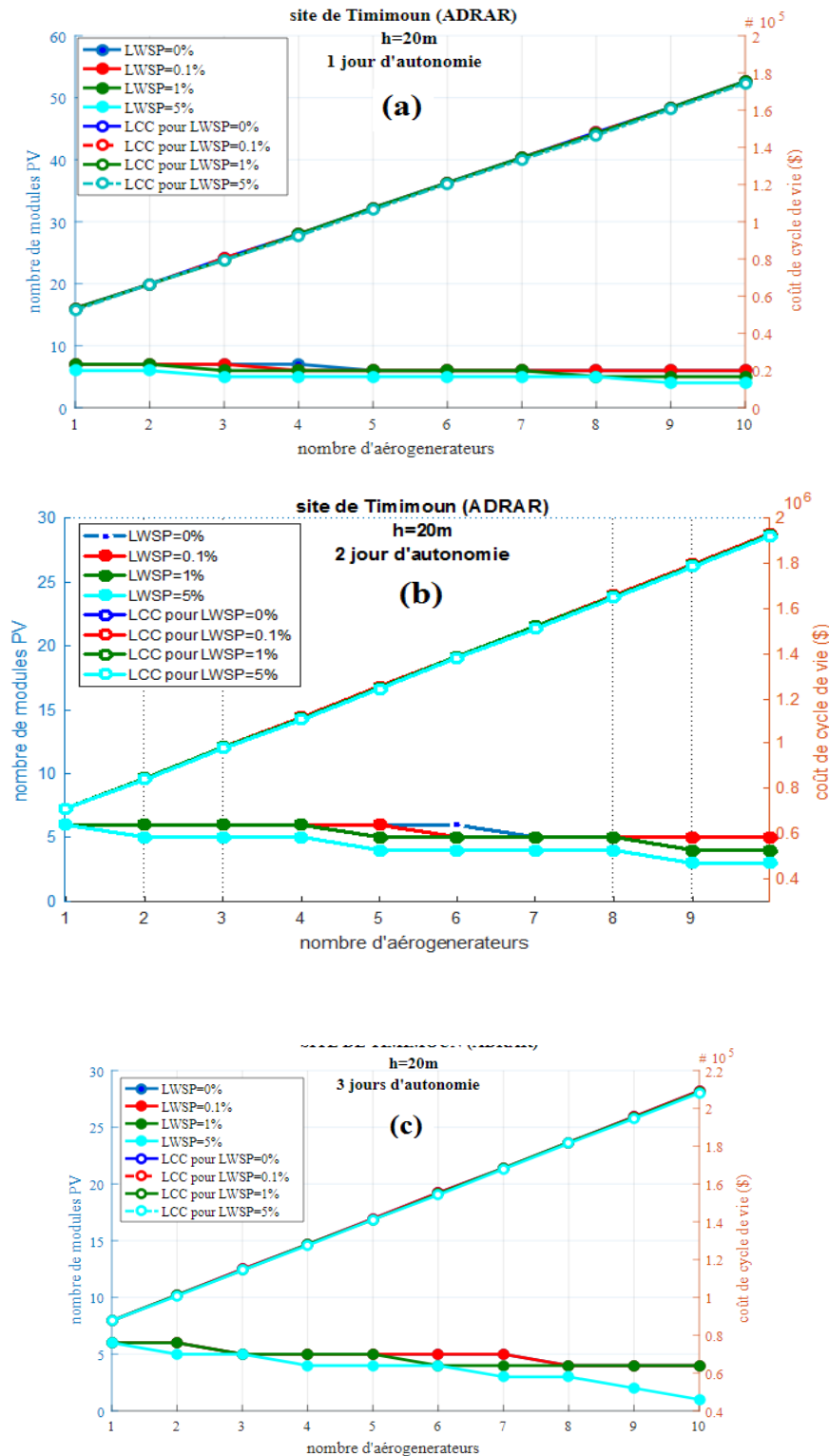


Figure 4. 13 Configuration et Coût du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour une hauteur de 20 mètres : a) 1 jr d'autonomie, b) 2 jrs d'autonomie et c) 3 jrs d'autonomie.



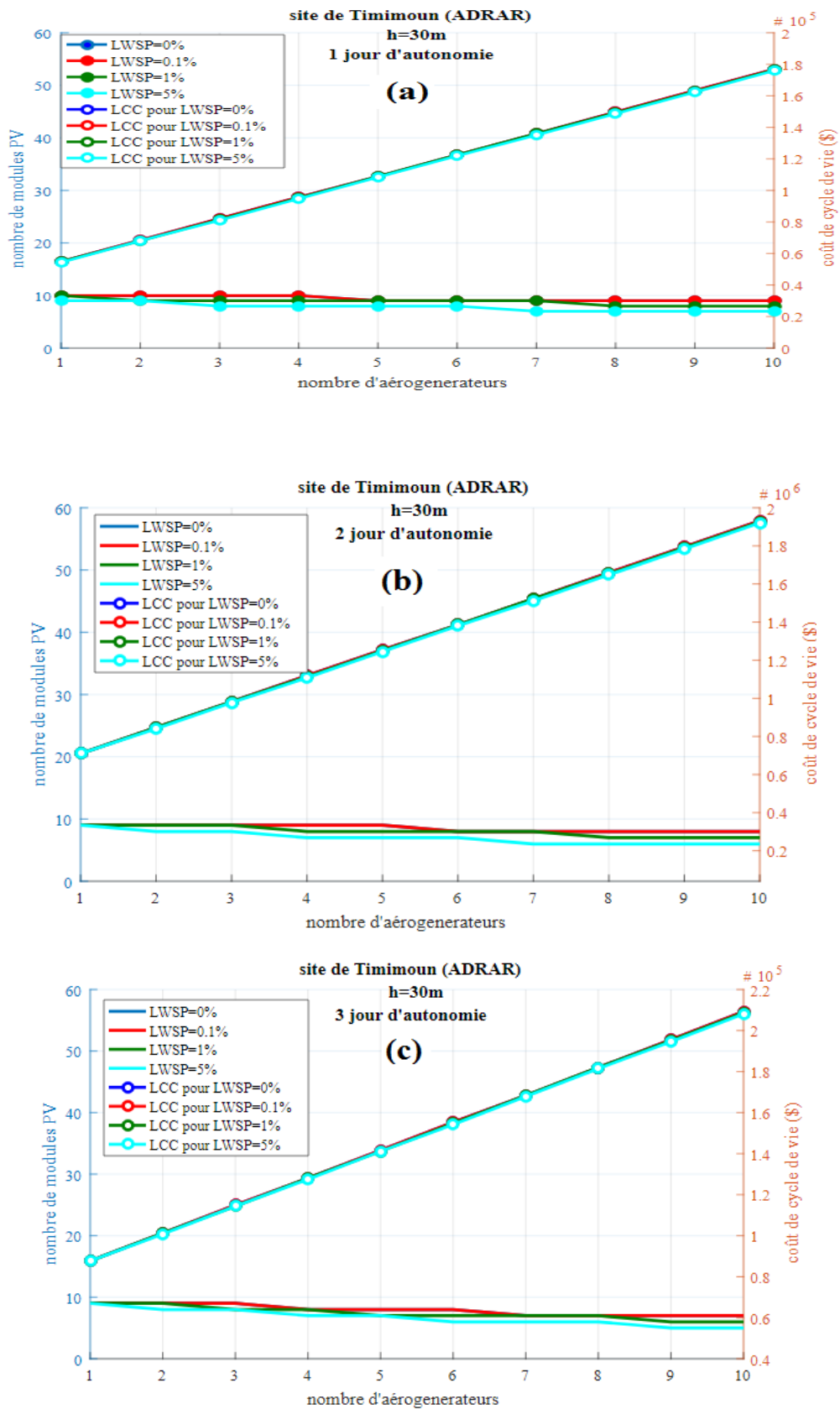


Figure 4. 14 Configuration et Coût du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour une hauteur

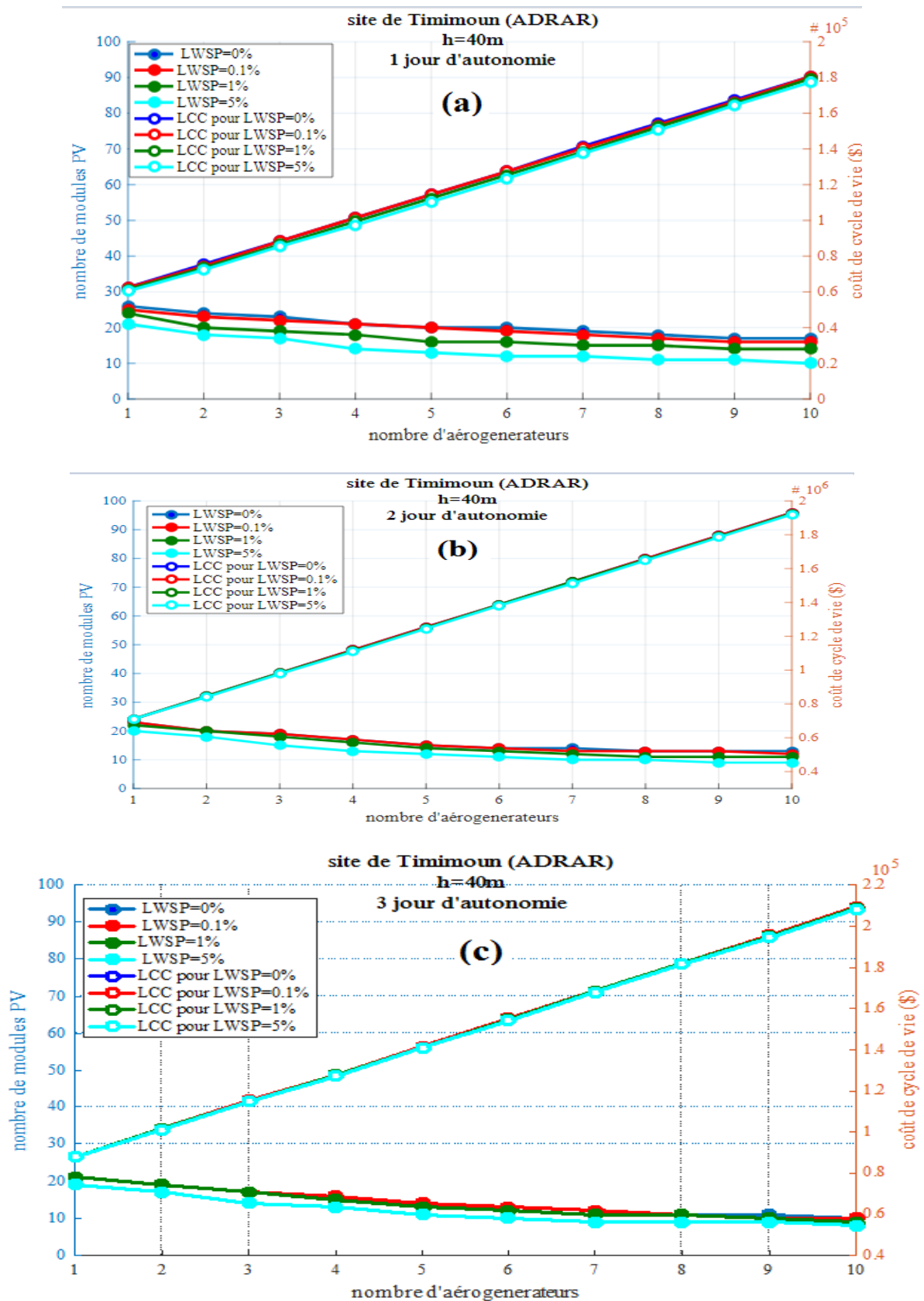
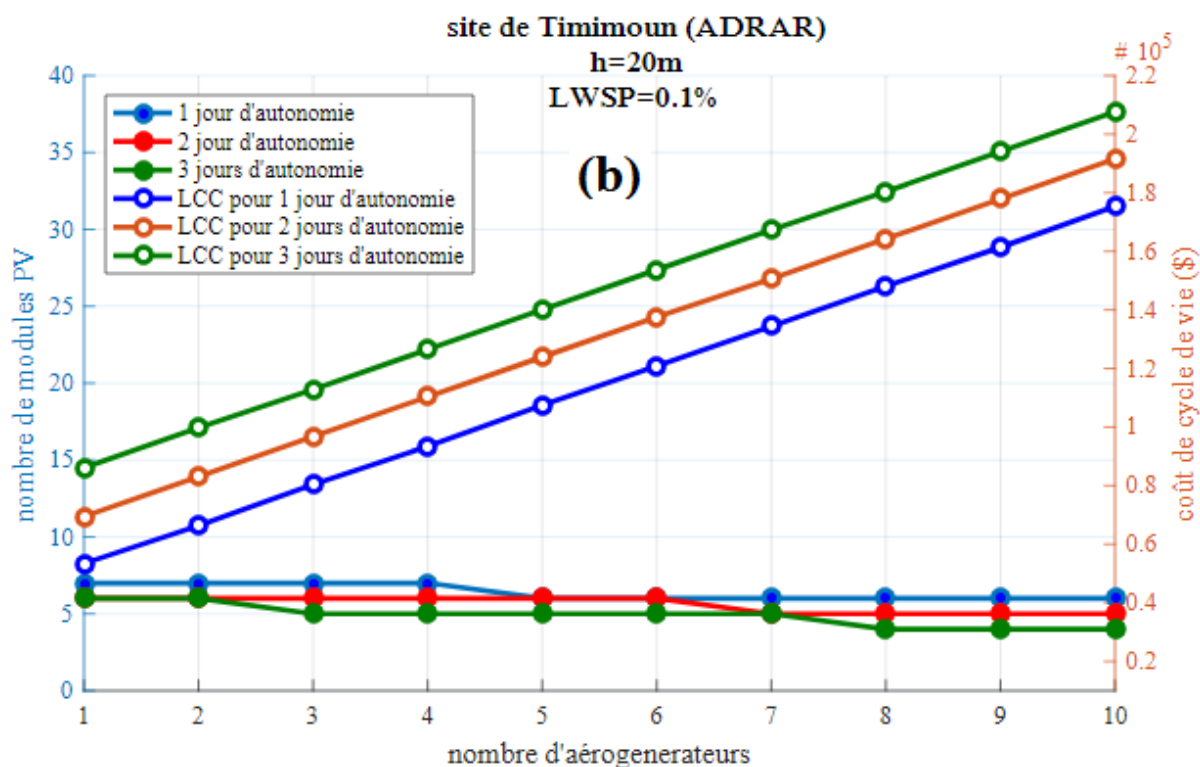
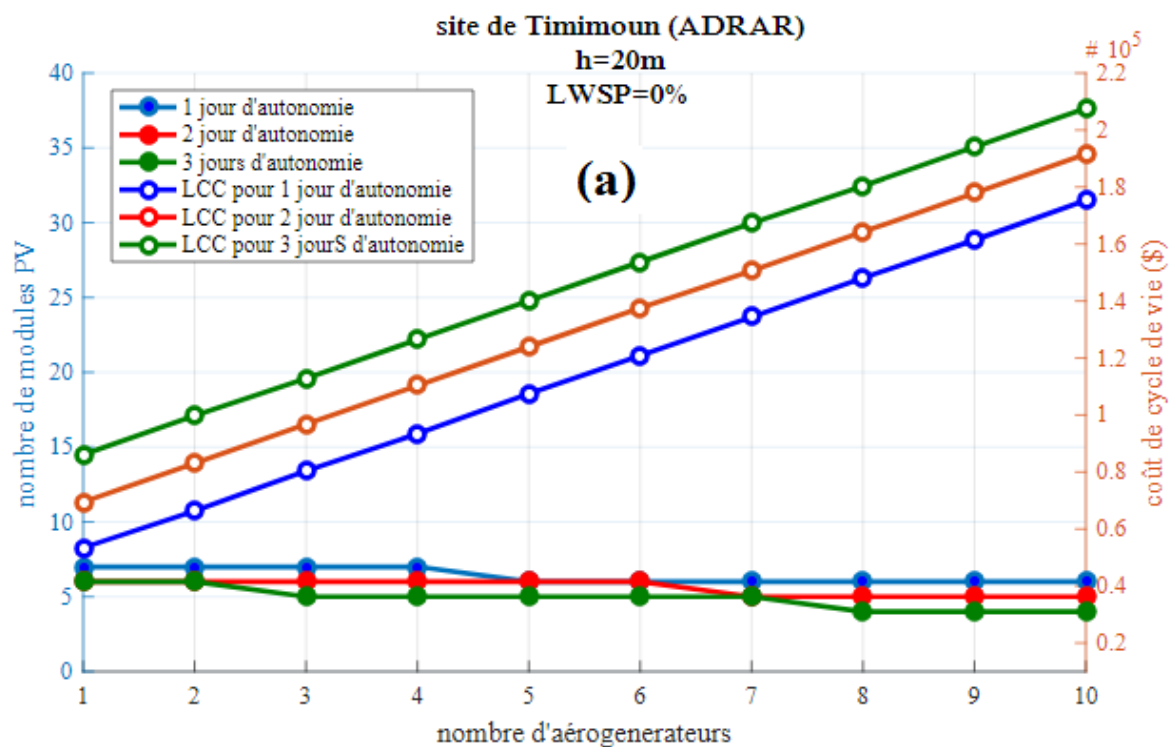


Figure 4. 15 Configuration et Coût du système en fonction de la capacité de stockage pour différentes LWSP pour une hauteur de 40 mètres : a) 1 jr d'autonomie, b) 2 jrs d'autonomie et c) 3 jrs d'autonomie



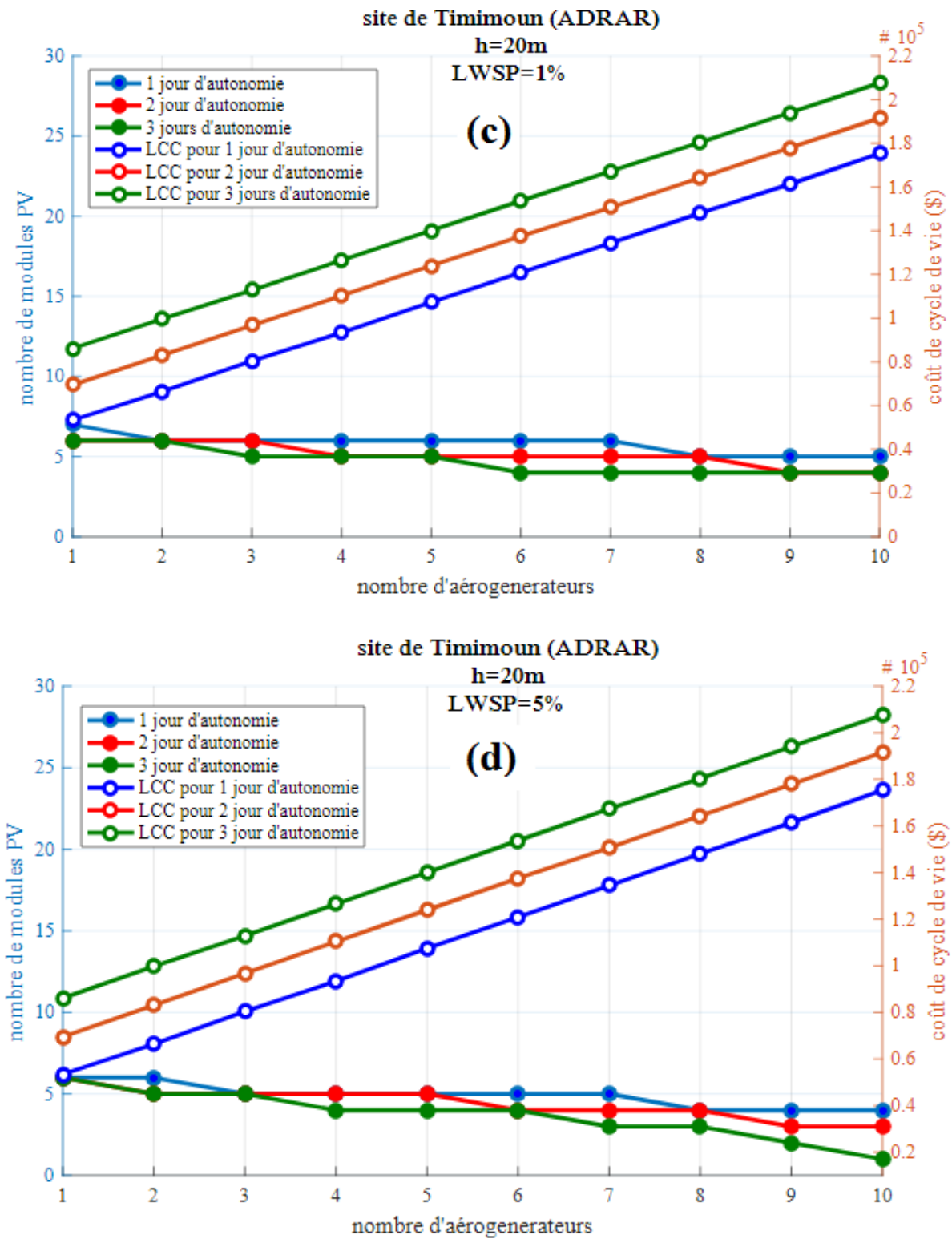
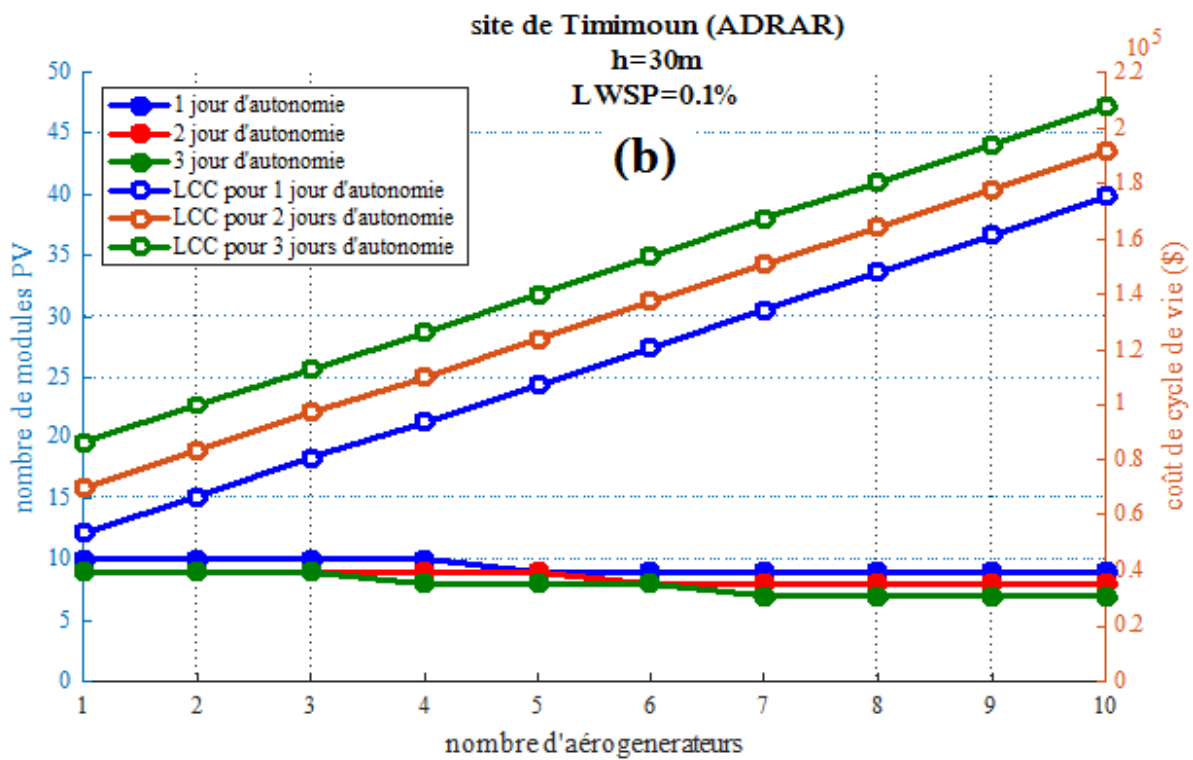
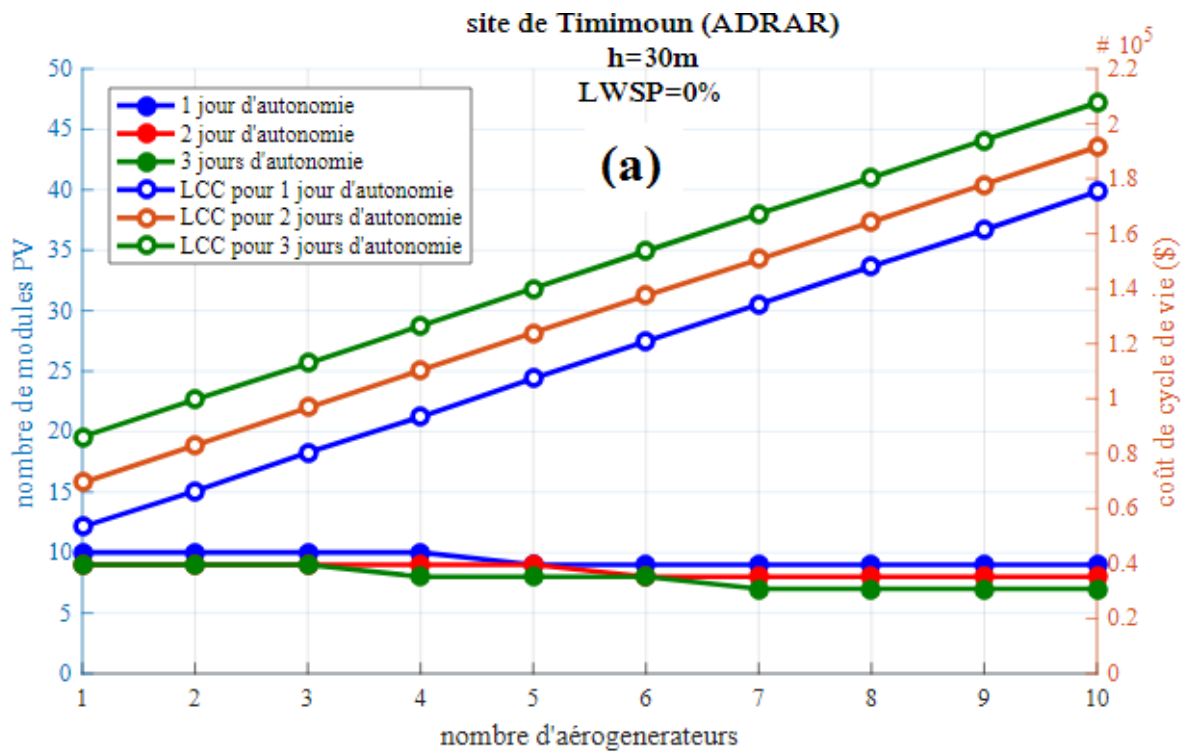


Figure 4. 16 Configuration et Coût du système en fonction de LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 20 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP=0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%.



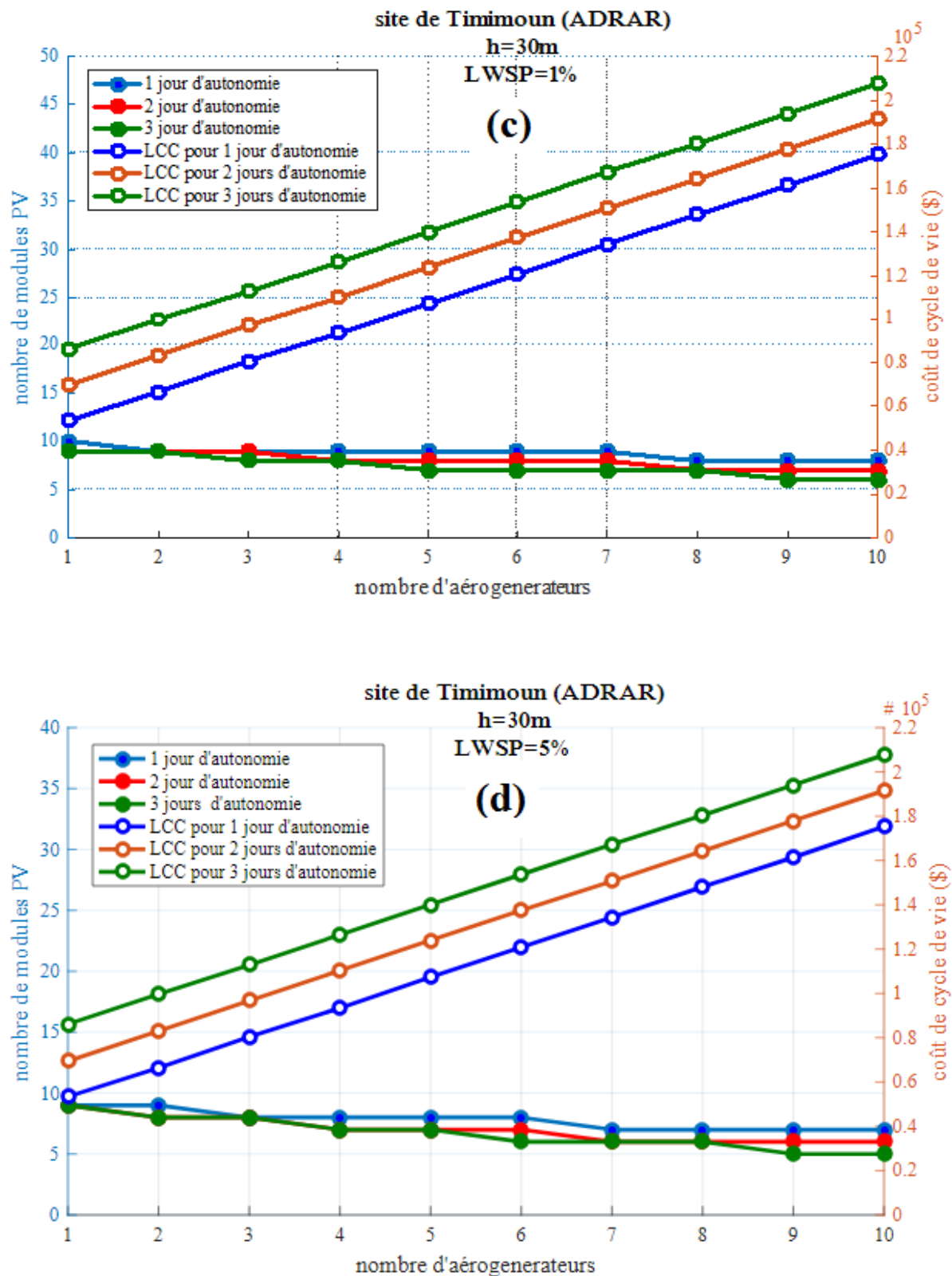
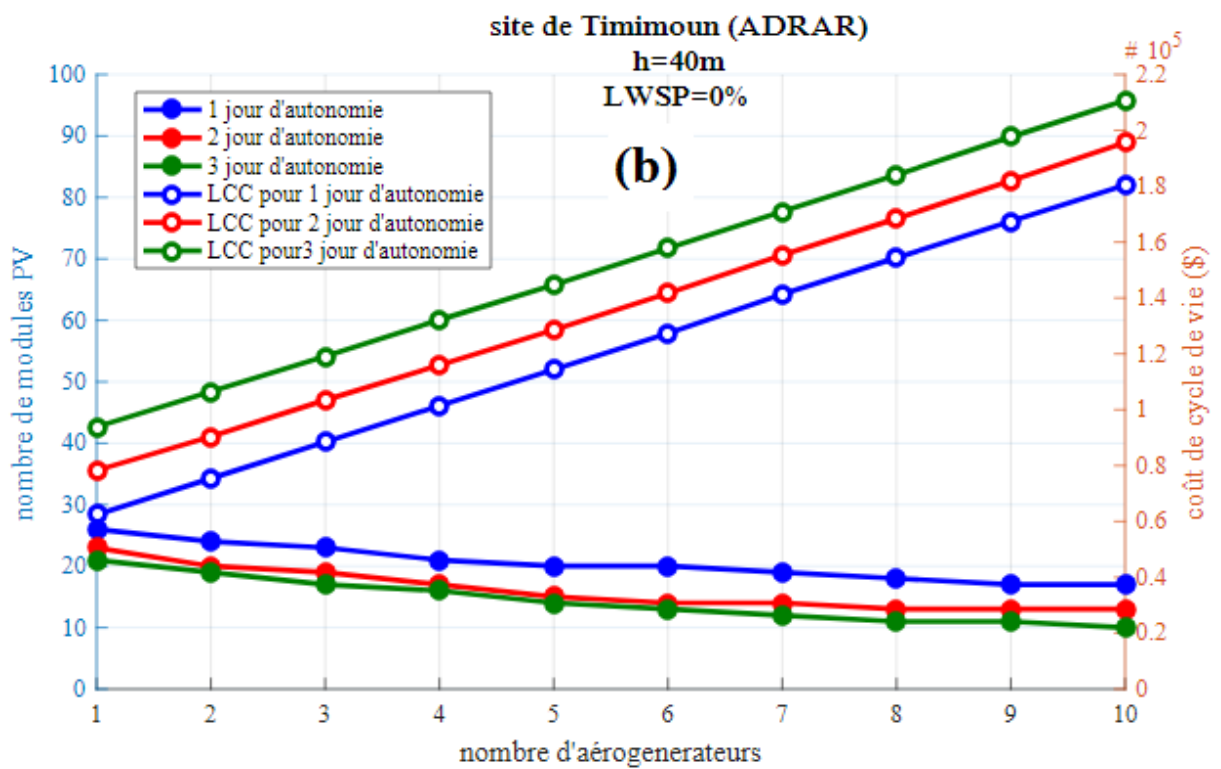
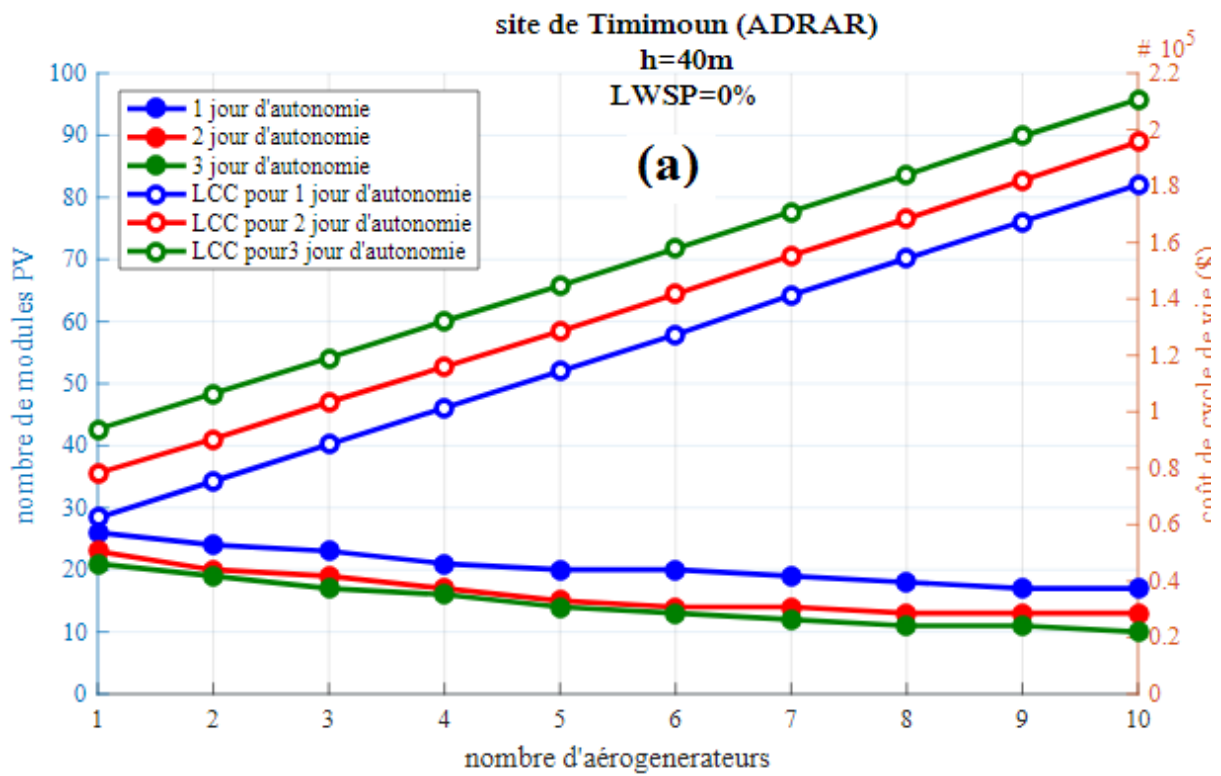


Figure 4. 17 Configuration et Coût du système en fonction de LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 30 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%.



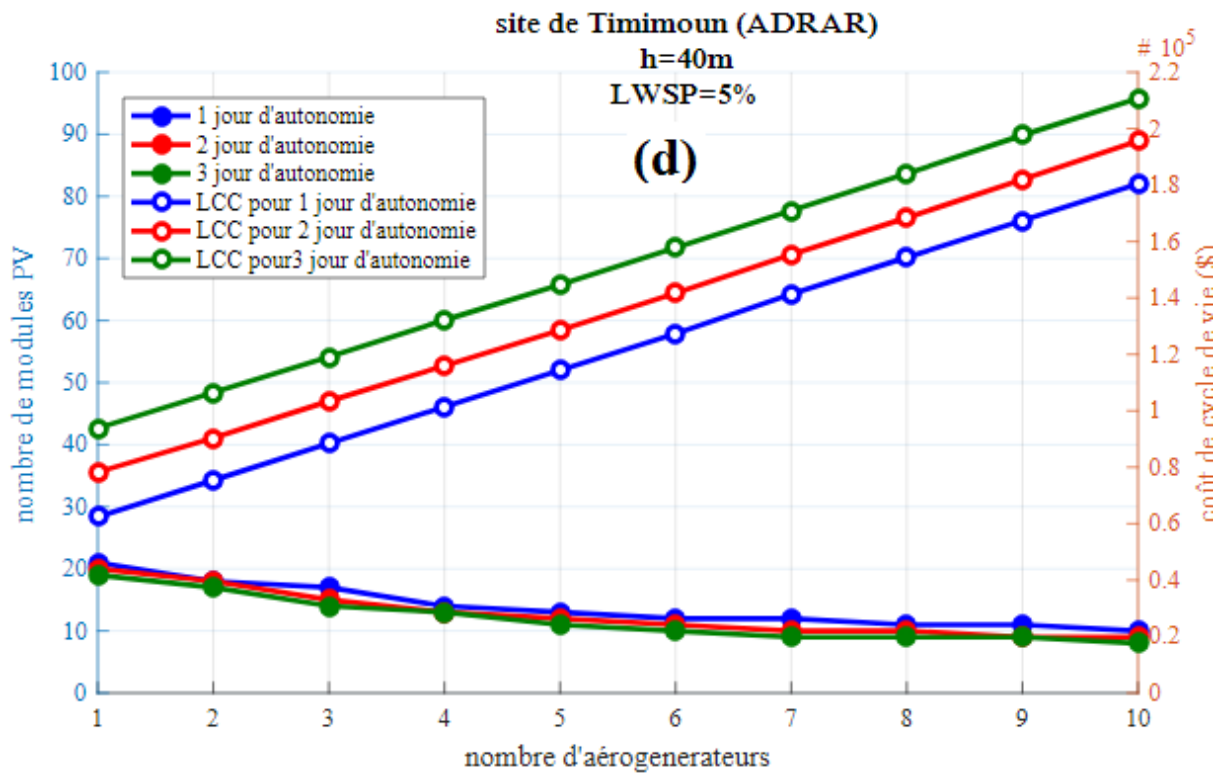
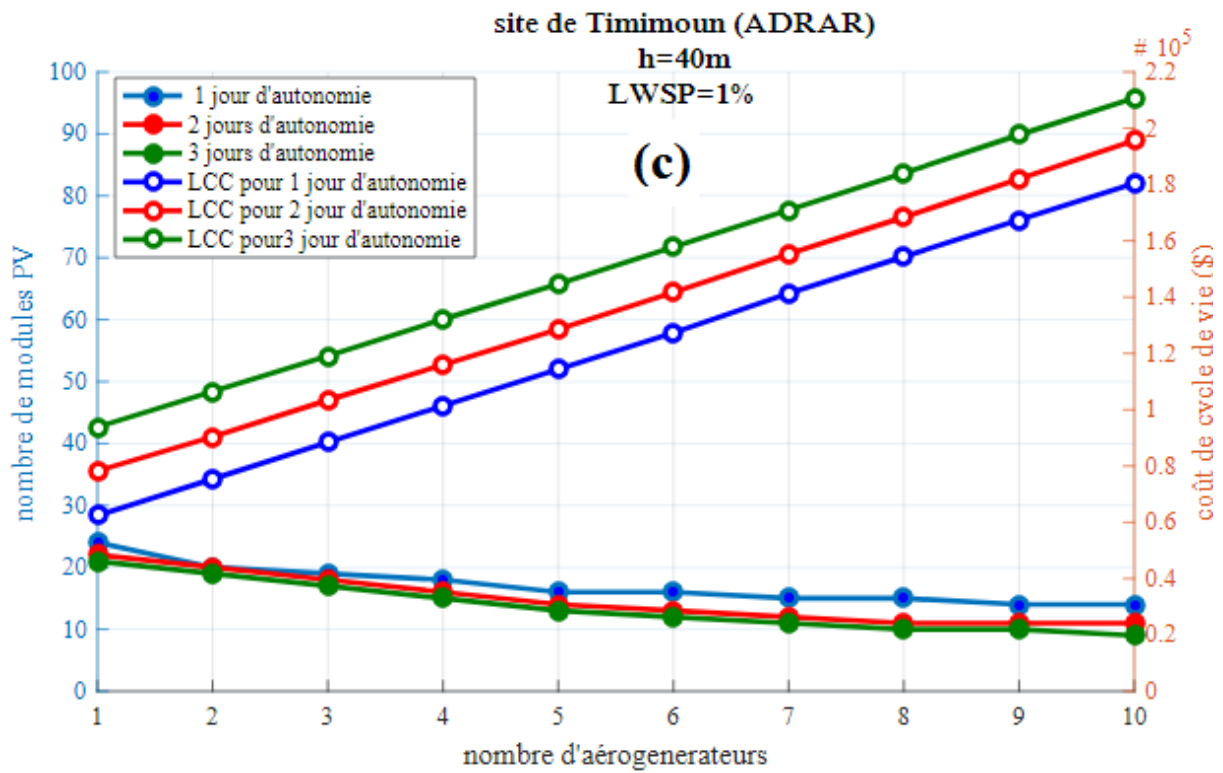
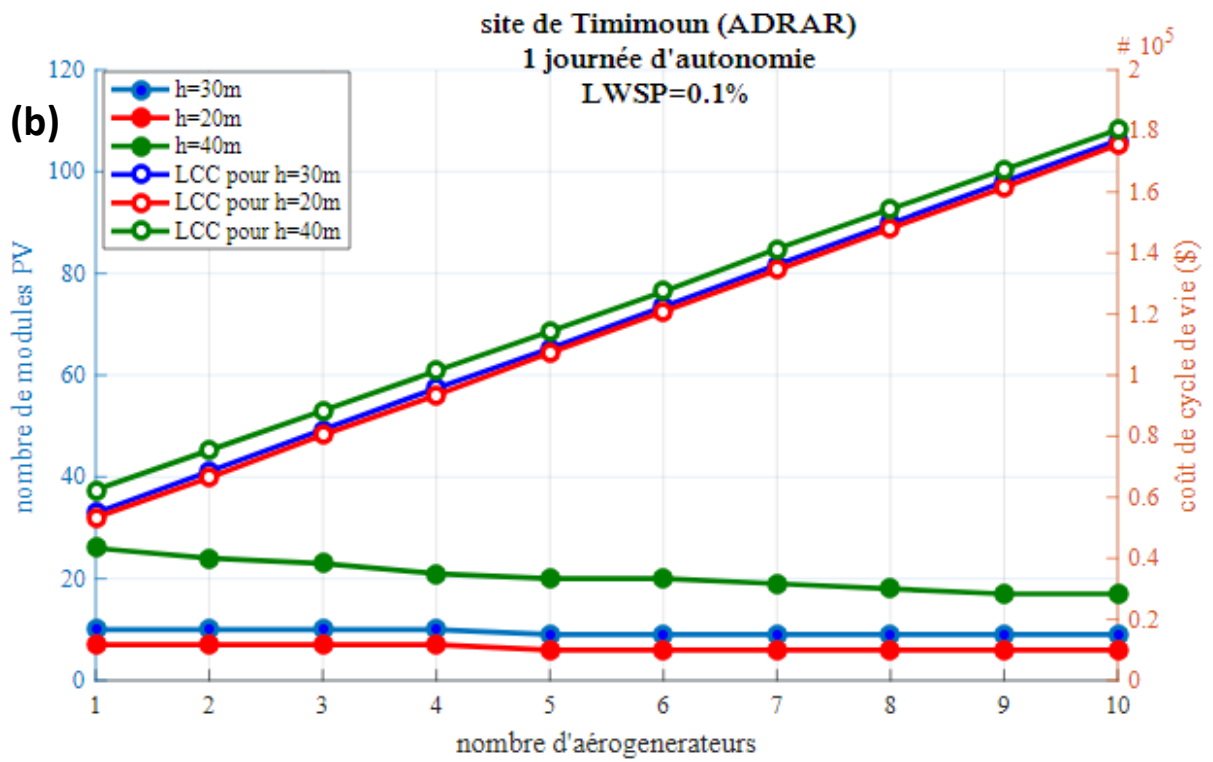
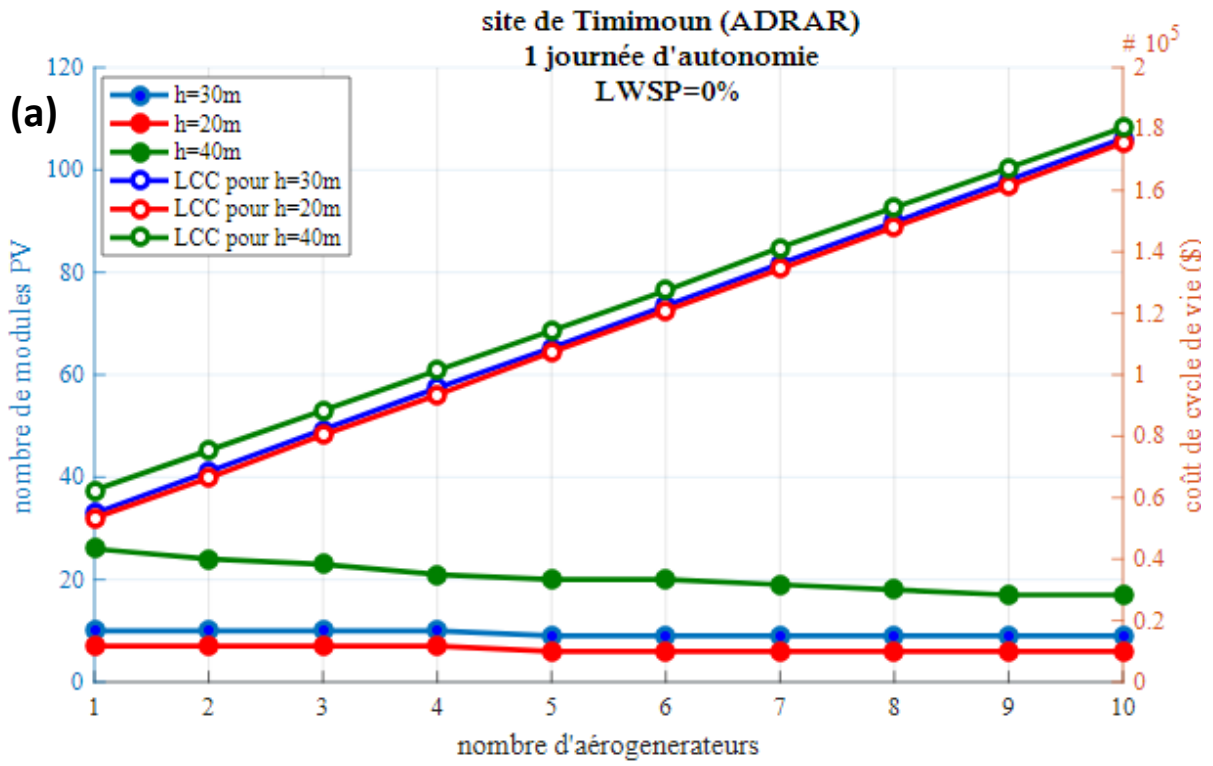


Figure 4. 18 Configuration et Coût du système en fonction de la LWSP pour différentes capacités de stockage (jours d'autonomie) pour une hauteur de 40 mètres : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c)LWSP=1% et d) LWSP= 5%.





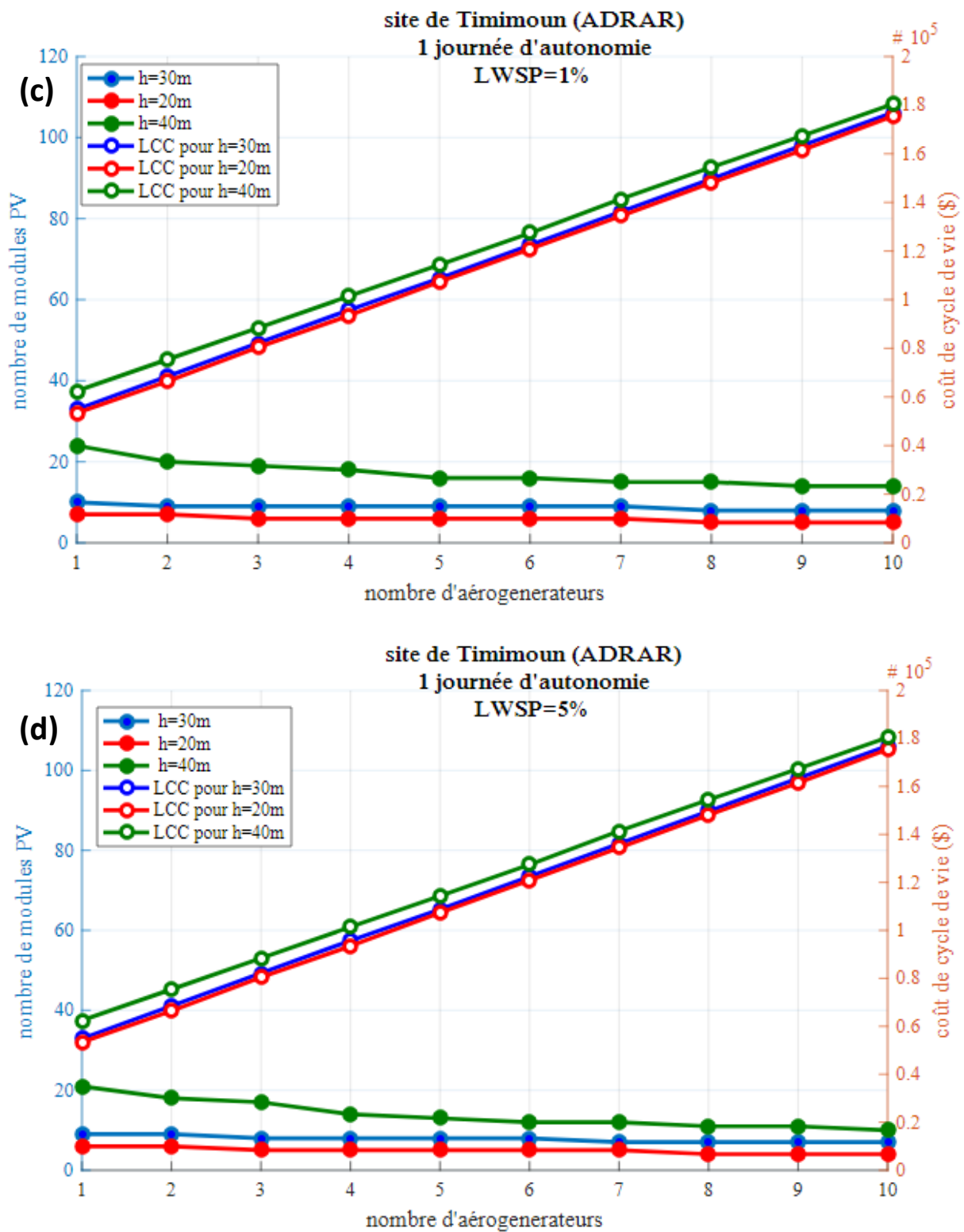
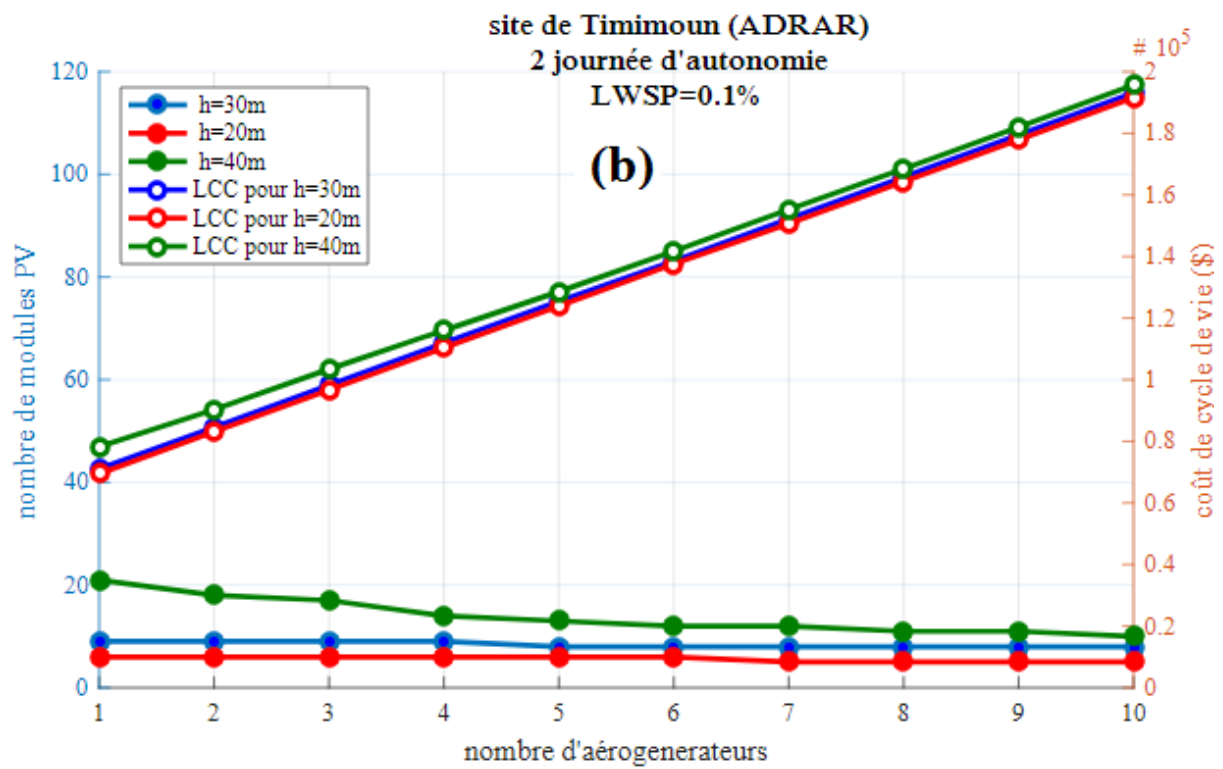
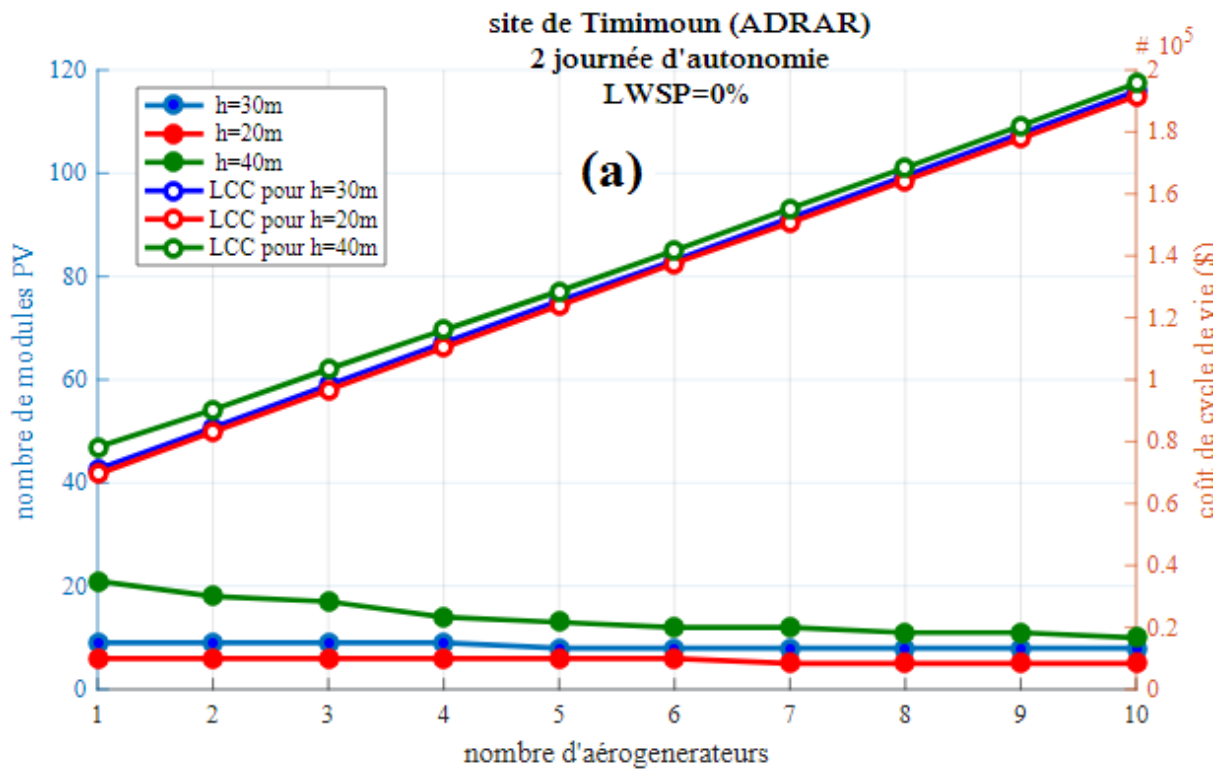


Figure 4. 19 Configuration et Coût du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de 1 journée d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%.



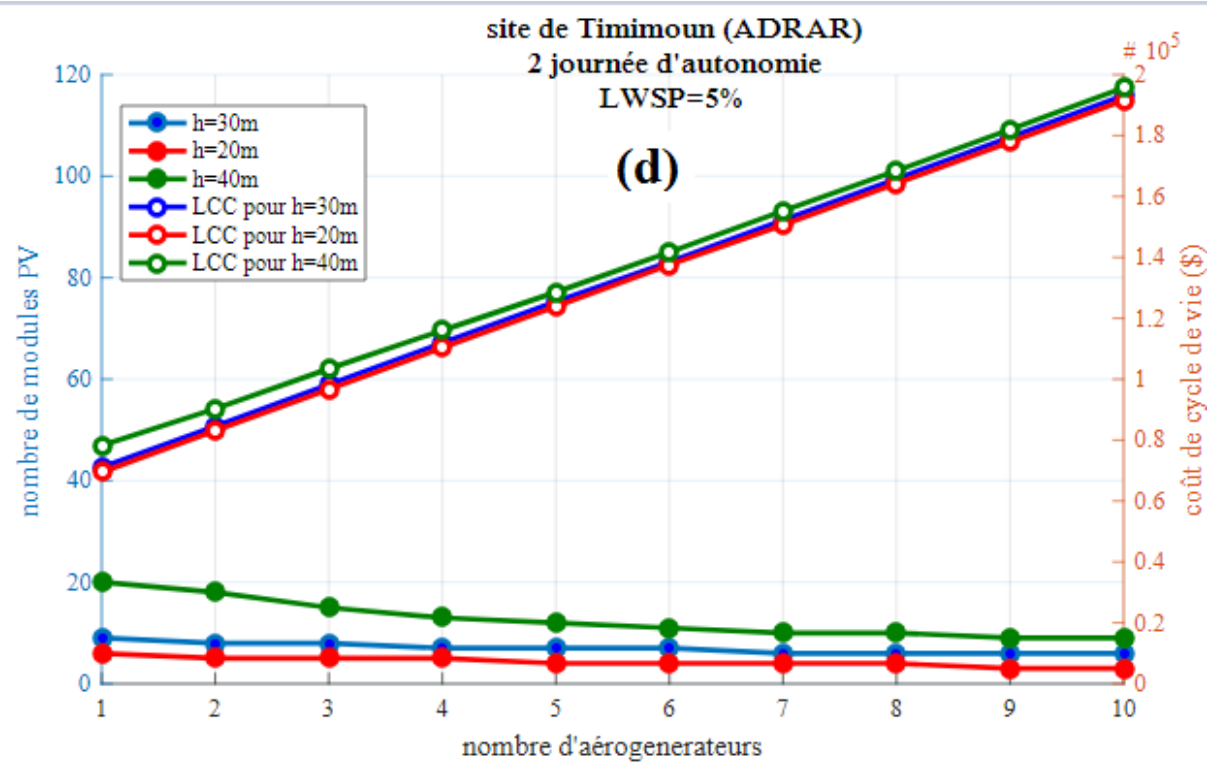
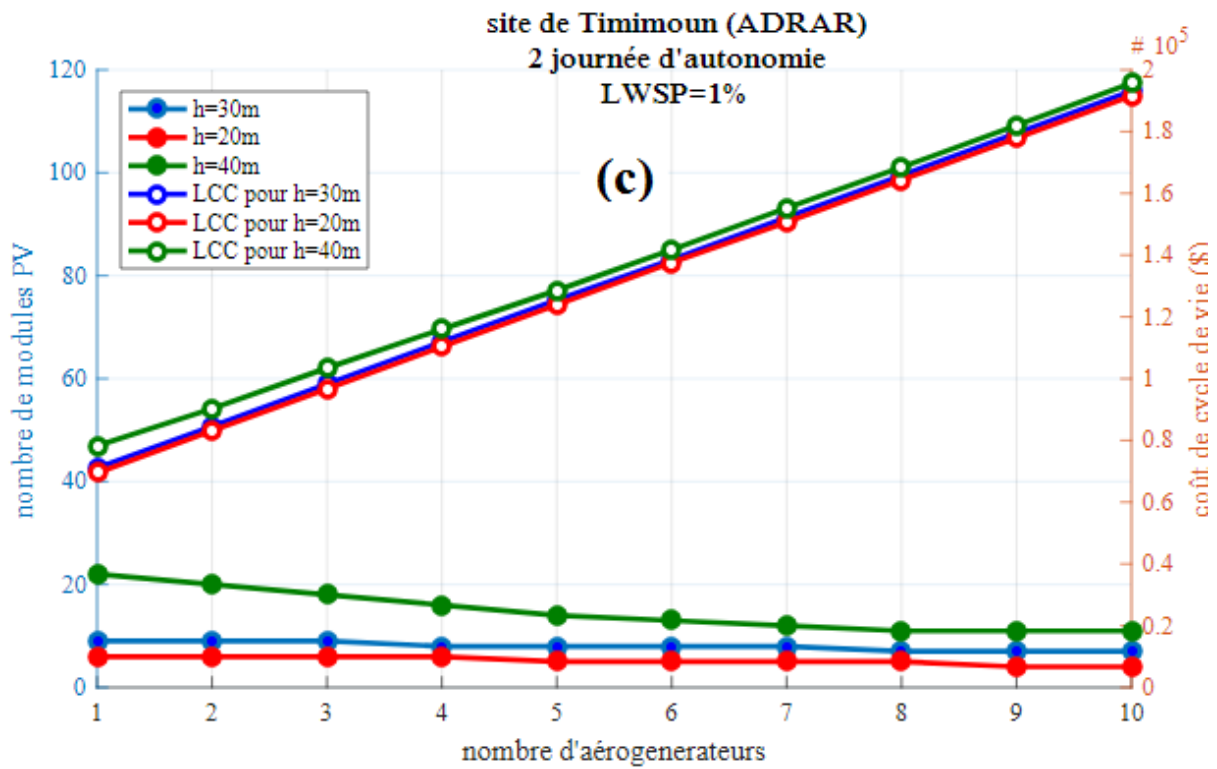
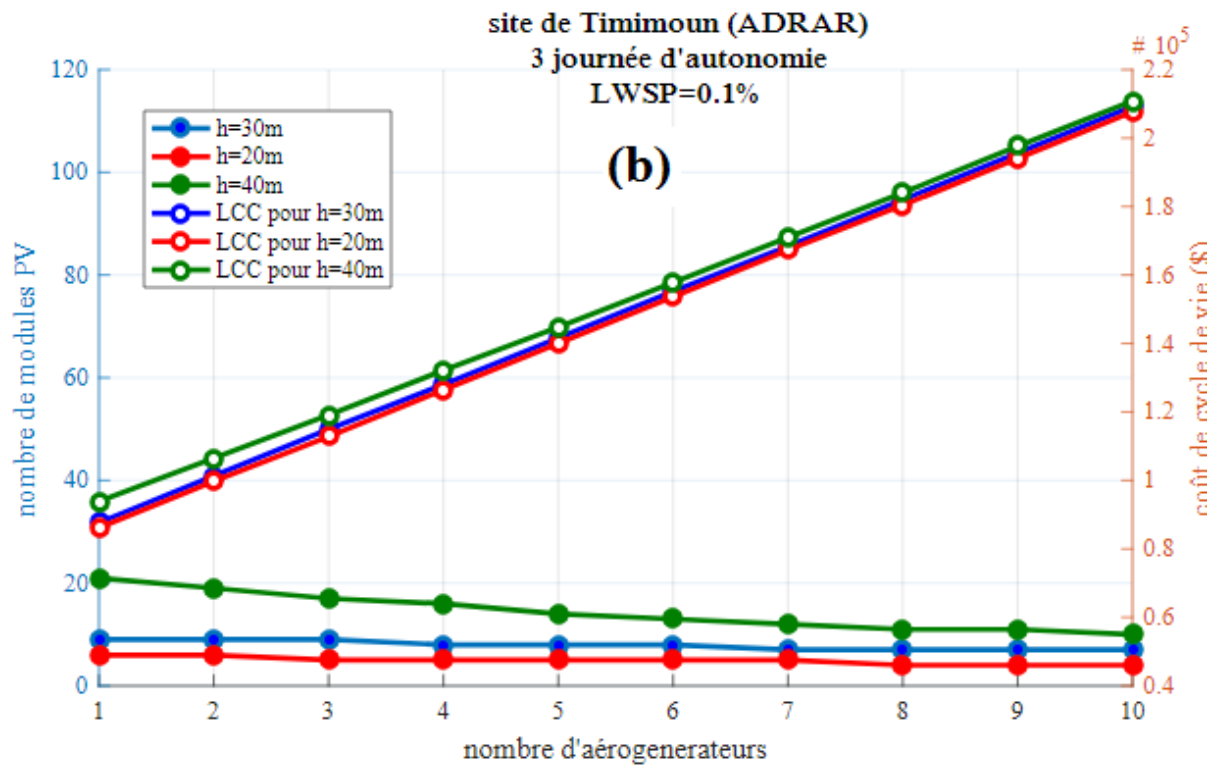
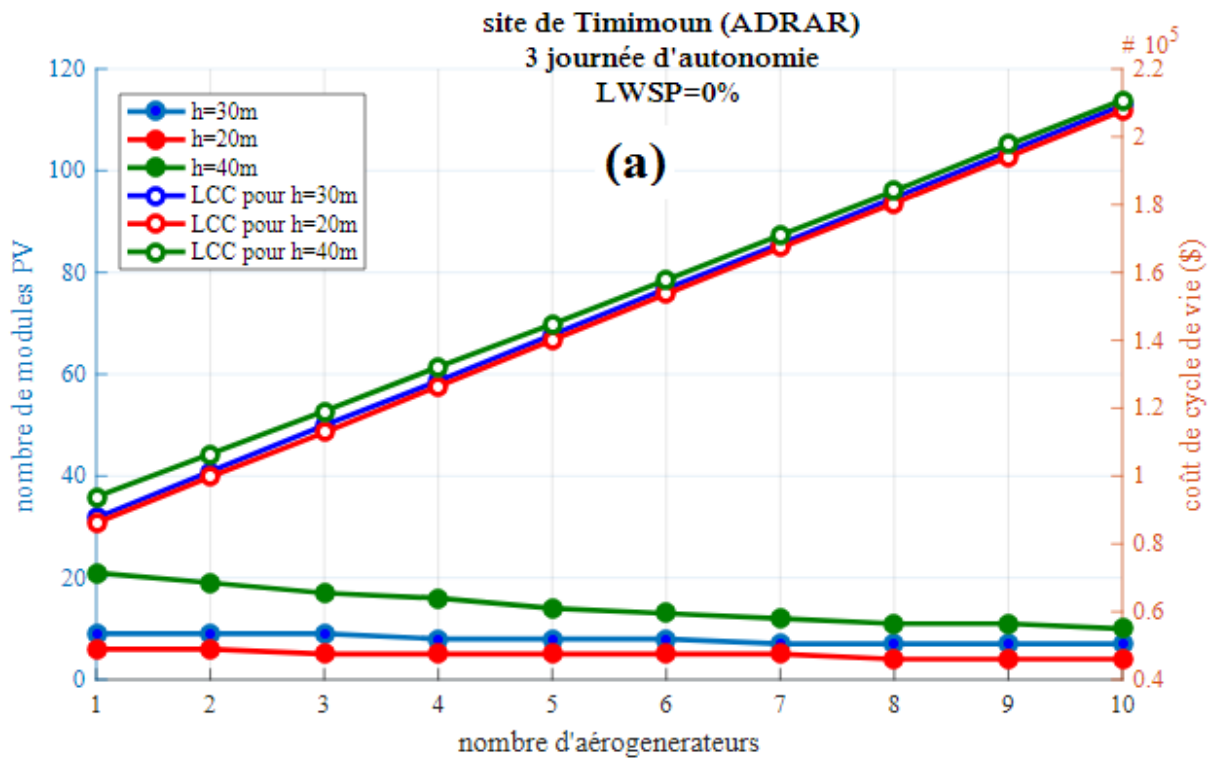


Figure 4. 20 Configuration et Coût du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de 2 jours d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%.



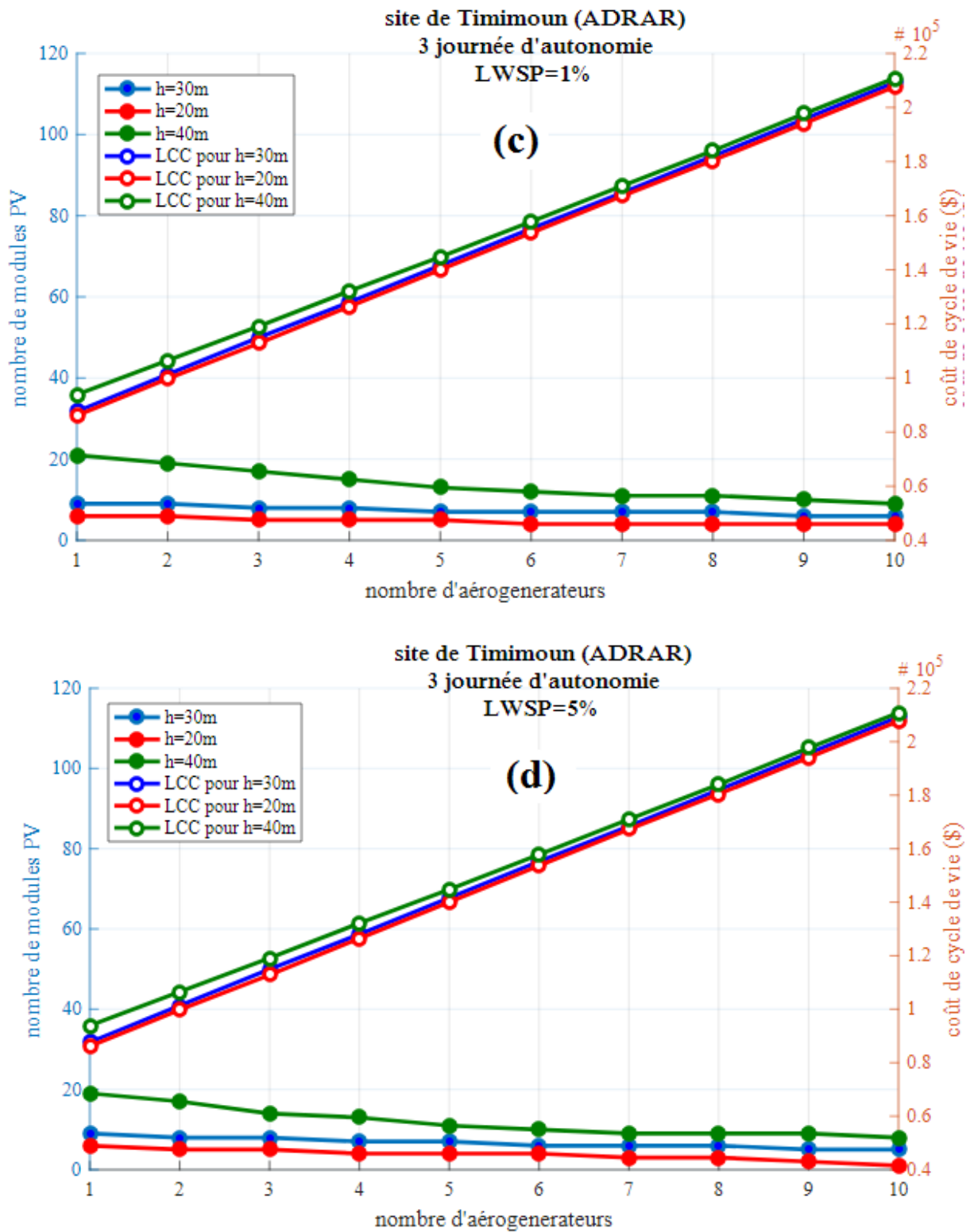


Figure 4. 21 Configuration et Coût du système en fonction de LWSP pour différentes hauteurs de pompage pour une capacité de stockage de jours d'autonomie : a) LWSP= 0%, b) LWSP= 0.1%. c) LWSP=1% et d) LWSP= 5%.

#### 4.4.Résultats du dimensionnement optimal du système

Le tableau 7 représente un récapitulatif de tous les résultats discutés et commentés antérieurement où les trois hauteurs (20m, 30m et 40m) sont présentés et pour toutes les configurations dont on a fait l'objet de simulation. Les couples optimaux sont indiqués en rouge, pour chaque niveau de fiabilité (0%,0.1%,1% et 5%) et pour chaque capacité de stockage (1 ,2 et 3 jours d'autonomie).

Tableau 7 Les couples optimaux pour différentes LWSP et capacités de stockage, pour les Différentes hauteurs prises.

<u>HAUTEUR</u> <u>(h)</u>	<u>Jours</u> <u>d'autonomie</u>	<u>LWSP</u>	<u>Configuration optimale</u>		<u>Coût</u> <u>(\$)</u>
			<u>Npv</u>	<u>Nw</u>	
20m	1jour	0%	7	1	53318
		0.1%	7	1	53318
		1%	7	1	53318
		5%	6	1	52801
	2jours	0%	6	1	69458
		0.1%	6	1	69458
		1%	6	1	69458
		5%	6	1	69458
	3jours	0%	6	1	86114
		0.1%	6	1	86114
		1%	6	1	86114
		5%	6	1	86114
30m	1jour	0%	10	1	54869
		0.1%	10	1	54869
		1%	10	1	54869
		5%	9	1	54352
	2jours	0%	9	1	71009
		0.1%	9	1	71009
		1%	9	1	71009
		5%	9	1	71009
	3jours	0%	9	1	87665
		0.1%	9	1	87665
		1%	9	1	87665
		5%	9	1	87665
40m	1jour	0%	26	1	63143
		0.1%	25	1	62626
		1%	24	1	62109
		5%	21	1	60557
	2jours	0%	23	1	78248
		0.1%	23	1	78248
		1%	22	1	77731
		5%	20	1	76697
	3jours	0%	21	1	93870
		0.1%	21	1	93870
		1%	21	1	93870
		5%	19	1	92836

#### 4.5.Conclusion

A l'issue de ce chapitre, une méthode de dimensionnement a été développée pour optimiser la taille des différents composants d'un système de pompage hybride d'eau complètement autonome utilisant un réservoir pour le stockage. La méthodologie suivie passe par trois étapes principales :

- Modélisation des différents composants de notre système de pompage hybride (voir chapitre 2).
- L'élaboration d'une méthode pour évaluer la fiabilité du système basée sur le concept de probabilité de déficit en eau (LWSP)
- Le modèle économique est basé sur le concept du coût du cycle de vie (LCC) qui est considéré comme un bon indicateur de la rentabilité économique dans le domaine des énergies renouvelables.

Un ensemble de configurations satisfaisant les niveaux de fiabilité technique désirés peuvent être obtenu en utilisant la LWSP. La configuration avec le plus bas coût LCC donne la solution optimale, comme présenté dans le tableau 4.2.

La simulation de système de pompage hybride a été effectuée par des programmes sous l'environnement MATLAB en posant quelques hypothèses simplificatrices telles que de prendre le réservoir d'eau à l'état plein, de considérer les rendements du système constants pour toutes les configurations et hauteurs choisies et prendre les indicateurs économiques à savoir : l'inflation et le taux d'intérêt fixes durant toute l'étude qui s'étale sur année (8760heures).

Les données d'entrées du programme sont :

- L'irradiation horaire globale sur le plan incliné , la température ambiante horaire
- Profil de demande en eau.
- Moteur-pompe utilisé.

Nous avons présenté nos résultats dans des graphes pour mieux voir l'influence de chaque paramètre sur les dimensions et coût du système.

Pour conclure on a affiché les solutions dans un tableau récapitulatifs afin de mieux voir et d'analyser nos configurations optimales.

On peut constater après analyse des résultats trouvés que :

- L'influence des jours d'autonomie est plus dominante par rapport aux autres paramètres notamment due au coût élevé du m<sup>3</sup> bâti
- Une journée d'autonomie est choisie comme taille de réservoir optimale
- le site de Timimoune présente des configurations élevées dans l'ensemble surtout pour les grandes hauteurs manométriques.



## Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était de développer une méthode d'optimisation de dimensionnement d'un système de pompage hybride, habile pour alimentation en eau une culture de palmiers dattiers d'une surface de 1ha dans un site isolé au sud algérien.

Afin de mener à bien notre étude nous avons d'abord résumé la situation énergétique actuelle concernant la production d'électricité à partir des énergies renouvelables dans le monde et en l'Algérie, et présenté aussi les ressources en eau dont dispose l'Algérie et en particulier le sud (Sahara), ainsi que les efforts déployés pour la promotion et le développement de telles ressources. Ce travail nous a permis de constater également, l'existence d'un potentiel énergétique renouvelable important, notamment l'hybride qui commence à prendre une ampleur petit à petit dans le secteur énergétique algérien et qui pourrait contribuer à la production d'une grande partie de l'énergie national.

Dans la partie qui suit, nous nous sommes concentrés sur la présentation et la modélisation de tous les composants de notre système hybride (module PV, l'éolienne et la motopompe). Les résultats issus de ce chapitre nous seront d'une grande utilité dans la partie du dimensionnement du système.

En vue d'établir un dimensionnement optimal du système de pompage hybride, nous avons développé dans ce mémoire une méthodologie basée sur deux critères à savoir : la fiabilité et le coût. Le critère de fiabilité est basé sur le concept de probabilité de déficit en eau (LWSP) et le critère économique basé sur la notion du coût du système sur sa durée de vie(LCC), considéré comme le meilleur test de rentabilité économique pour de tels systèmes.

L'ensemble des résultats de simulation obtenus au cours de cette étude ont été aussi, présenté. Ces résultats sont issus de l'application de la méthodologie proposée pour l'optimisation de dimensionnement de système de pompage hybride mis en place pour satisfaire le profil de demande en eau proposé.

Le système est simulé en utilisant des données radiométriques liées à la région de Timimoune à ADRAR. Ce système est destiné à alimenter en eau une culture de palmiers dattiers de 1ha dans cette région et satisfaire le profil de consommation demandé pour différents niveaux de fiabilité, capacités de stockage et pour plusieurs hauteurs manométriques.

Un ensemble de configurations répondant aux niveaux de fiabilité désirés peut être obtenu en utilisant la LWSP. La configuration avec le plus bas coût donne la solution optimale envisageable à utiliser.

Cette simulation a été effectuée à l'aide d'un programme élaboré sous MATLAB ; quelques hypothèses ont été prises pour mener à bien cette simulation, il s'agit de prendre le réservoir d'eau à l'état plein, de considérer les rendements du système constants pour toutes les configurations et hauteurs choisies et prendre les paramètres économiques, comme l'inflation et le taux d'intérêt fixes.

En perspectives à ce travail, Nous envisageons de développer d'autres méthodes de dimensionnement bien plus efficaces et plus rapides comme les méthodes d'optimisation méta heuristiques.

## References:

- [1] Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, GEA, 2012.
- [2] B. Multon, « Production d'énergies électrique par sources renouvelables », Techniques de l'ingénieur, traité D4005, 2003.pp. 1-42.
- [3] Observatoire européen LEADER/AEIDL « Sources d'énergies renouvelables, source de développement durable », 1999.
- [4] Darras, C. « Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE », Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011.
- [5] Gergaud, O. « Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et associé à un Accumulateur », Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.
- [6] Kendouli, F. Nabti, K. Abed, K. and Benalla, H. « Modélisation, Simulation et Contrôle d'une Turbine Eolienne à Vitesse Variable basée sur la Génératrice Asynchrone à double alimentation », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, 2011.
- [7] Mirecki, A. « Etude comparative de Chaînes de Conversion d'Energie dédiées à une Eolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [8] Haffen, S. « Caractéristiques Géothermiques du Réservoir Gréseux du Buntsandstein d'Alsace », Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, Septembre 2012
- [9] La matinale du 07/06/2017 En savoir plus sur <http://www.lemonde.fr/energies/article>
- [10] Algérie Presse Service mardi, 25 octobre 2016 10:01 en savoir plus <http://www.aps.dz/economie/energies-renouvelables>
- [11] Site du ministère de l'énergie 2016. En savoir plus <http://www.energy.gov.dz>
- [12] Thèse doctorat Y.BAKELLI Contribution à l'optimisation du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome
- [13] Site du ministère de l'énergie (Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie). En savoir plus <http://www.energy.gov>
- [14] Une nouvelle carte de l'Ensoleillement annuel en Algérie publiée par le CDER En savoir plus <http://portail.cder.dz>
- [15] Site ALGERIE PRESSE SERVICE. En savoir plus <https://cutt.ly/1mkmMtK>
- [16] Quelle place pour l'énergie éolienne en Algérie L'énergie éolienne a-t-elle sa place dans le sud algérien Lundi 28 novembre 2016 CDER En savoir plus <http://portail.cder.dz>.
- [17] État des lieux du secteur de l'eau en Algérie, Morgan Mozas & Alexis Ghosn Chefs de projet d'Ipemed.

- [18] VECHIU Ionel, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse Doctorat Havre 2005.
- [19] Petibon, S. « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». PhD thesis, Université de Toulouse, 2009
- [20] Eckstein, Jurgen Helmut, « Detailed Modeling of Photovoltaic Components, PHD Thesis, Solar Energy Laboratory », University of Wisconsin, Madison, 1990.
- [21] Pankow, Y. « Etude de l'intégration décentralisée dans un réseau basse Tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, France, Décembre 2004.
- [22] KAABECHE Abdelhamid «Etude comparative entre le stockage à hydrogène et les batteries au plomb dans un système hybride (Photovoltaïque / Eolien) autonome» Thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique février 2012.
- [23] POITIERS Frédéric. « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de doctorat, Nantes 2003.
- [24] KHIENNAS Abdelhamid « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation en vue d'une application pour la Conversion de l'Énergie Éolienne » Étude et réalisation. Magister EMP 2010.
- [25] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, B 8 585 1- B 8 585 21.
- [26] État de l'art dans les aérogénérateurs électriques.
- [ 27] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96
- [28] Association Danoise de l'Industrie Eolienne, "http://www.windpower.org/fr/core.htm".
- [29] CHERFIA NAÏM «Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens» Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri – Constantine, 07/ 06 / 2010
- [30] B. Ai, H. Yang, H. Shen, and X. Liao, « Computer-aided design of PV/wind hybrid system », Renewable Energy, vol. 28, no. 10, p. 1491–1512, Aug. 2003
- [31] Y. Bakelli, A. Hadj Arab, and B. Azoui, « Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept », Solar Energy, vol. 85, no. 2, p. 288–294, Feb. 2011.
- [32] KROHNE, « Signal converters instructions for electromagnetic flowmeters: Installation and operating instructions », Apr. 1998.
- [33] H. Yang, L. Lu, and W. Zhou, « A novel optimization sizing model for hybrid solarwind power generation system », Solar Energy, vol. 81, no. 1, p. 76–84, Jan. 2007.
- [34] M. R. Nouni, S. C. Mullick, and T. C. Kandpal, « Techno-economics of small wind electric generator projects for decentralized power supply in India », Energy Policy, vol. 35, no. 4, p. 2491–2506, Apr. 2007.
- [35] D. B. Nelson, M. H. Nehrir, and C. Wang, « Unit sizing and cost analysis of standalone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems », Renewable Energy, vol. 31, no. 10, p. 1641–1656, Aug. 2006.
- [36] Site energy stream , en savoir plus sur [www.energystream-wavestone.com](http://www.energystream-wavestone.com)
- [37] Bounce energy Residential Solar and Wind Systems: What are the Costs?
- [38] « solarbuzz ». [Online]. Available : <http://www.solarbuzz.com>.

- [39] « Evsolar ». [Online]. Available: <http://www.evsolar.com/inverters.html>.
- [40] Bakelli and Kaabeche - 2019 - Optimal size of photovoltaic pumping system using
- [41] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, and Z. Fang, « Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm », *Solar Energy*, vol. In Press, Corrected Proof, Mar. 2008.
- [42] H. Yang, L. Lu, and W. Zhou, « A novel optimization sizing model for hybrid solarwind power generation system », *Solar Energy*, vol. 81, no. 1, p. 76–84, Jan. 2007.
- [43] A. Rajendra Prasad and E. Natarajan, « Optimization of integrated photovoltaic – wind power generation systems with battery storage », *Energy*, vol. 31, no. 12, p. 1943–1954, Sep. 2006.
- [44] P. P. Groumpos and G. Papageorgiou, « An optimal sizing method for stand-alone photovoltaic power systems », *Solar Energy*, vol. 38, no. 5, p. 341–351, 1987.
- [45] A. S. Ahmed Shata and R. Hanitsch, « Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean Sea in Egypt », *Renewable Energy*, vol. 31, no. 8, p. 1183–1202, Jul. 2006.
- [46] P. P. Groumpos and G. Papageorgiou, « An optimal sizing method for stand-alone photovoltaic power systems », *Solar Energy*

## **Annexes**

# **Annexe A**

THE NEW VALUE FRONTIER



# KC200GT

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE



LISTED

## HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module.

The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%.

These cells are encapsulated between a tempered glass cover and a polycarbonate back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions.

The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation. Equipped with plug-in connectors.



MODEL  
KC200GT

## APPLICATIONS

KC200GT is ideal for grid tie system applications.

- Residential roof top systems
- Large commercial grid tie systems
- Water Pumping systems
- High Voltage stand alone systems
- etc.

## QUALIFICATIONS

- MODULE : UL1703 certified
- FACTORY : ISO9001 and ISO 14001

## QUALITY ASSURANCE

Kyocera multicrystal photovoltaic modules have passed the following tests.

- Thermal cycling test ● Thermal shock test ● Thermal / Freezing and high humidity cycling test ● Electrical isolation test
- Hail impact test ● Mechanical, wind and test loading test ● Salt mist test ● Light and water-exposure test ● Field exposure test

## LIMITED WARRANTY

● 1 year limited warranty on material and workmanship

● 20 years limited warranty on power output. For detail, please refer to "category 11" in Warranty issued by Kyocera.

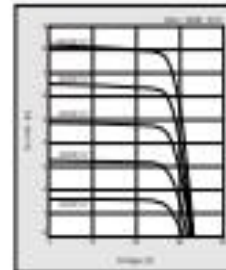
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to "Warranty" issued by Kyocera.)

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GT at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GT at various irradiance levels (1000 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 400 W/m<sup>2</sup>, 200 W/m<sup>2</sup>). The graph plots Current (A) on the y-axis (0 to 10) and Voltage (V) on the x-axis (0 to 30). The curves show that as irradiance decreases, the maximum power point shifts towards lower currents and lower voltages.

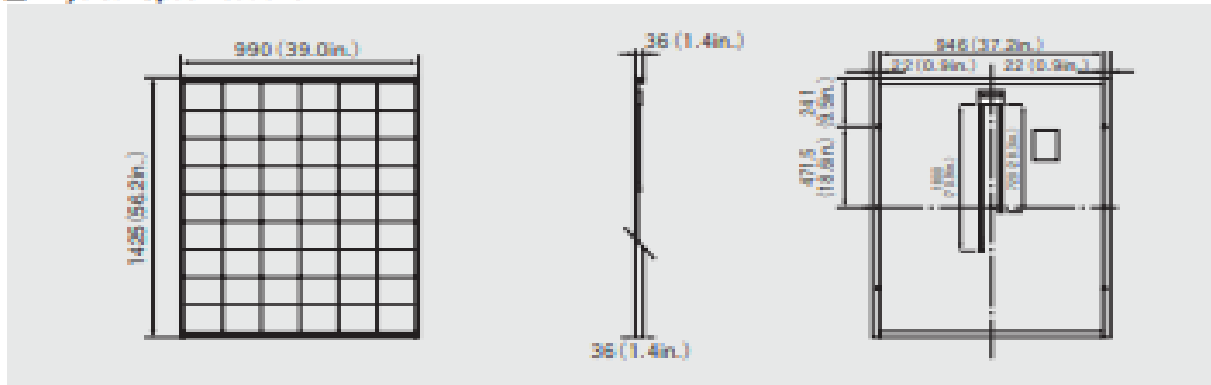


**SPECIFICATIONS**

**KC200GT**

**Physical Specifications**

Unit : mm (in.)



**Specifications**

**Electrical Performance under Standard Test Conditions (STC)**

Maximum Power (P <sub>max</sub> )	200W (±0.05%/±0.01)
Maximum Power Voltage (V <sub>mp</sub> )	29.3V
Maximum Power Current (I <sub>mp</sub> )	7.60A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	35.5V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	8.21A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	-1.53x10 <sup>-3</sup> /°C
Temperature Coefficient of Isc	3.18x10 <sup>-3</sup> /°C

\*STC : Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, AM1.5 spectrum, Module temperature 25°C

**Electrical Performance at 800W/m<sup>2</sup>, NOCT, AM1.5**

Maximum Power (P <sub>max</sub> )	142W
Maximum Power Voltage (V <sub>mp</sub> )	29.3V
Maximum Power Current (I <sub>mp</sub> )	6.13A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	35.5V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	8.60A

\*NOCT : Irradiance 800W/m<sup>2</sup>, AM1.5 spectrum, Module temperature 45°C

<b>Cells</b>	
Number per Module	54

<b>Module Characteristics</b>	
Length x Width x Depth	1425mm(56.2in.)x990mm(39.0in.)x36mm(1.4in.)
Weight	18.5kg(41.0lb.)
Cable	7x22mm(0.8in.)x120mm(4.8in.)

<b>Junction Box Characteristics</b>	
Length x Width x Depth	110mm(4.3in.)x110mm(4.3in.)x36mm(1.4in.)
IP Code	IP65

<b>Reduction of Efficiency under Low Irradiance</b>	
Reduction	7.0%

\*Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m<sup>2</sup> to 200W/m<sup>2</sup>. Module temperature 25°C

Please contact our office for further information



**KYOCERA Corporation**

**KYOCERA Corporation Headquarters**

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION  
4-1-20, Yatai-cho 2-chome  
Fushimi-ku, Kyoto  
610-8501, Japan  
TEL: (81) 75-824-2476 FAX: (81) 75-824-2475  
<http://www.kyocera.com>

**KYOCERA Solar, Inc.**

3912 East Avenue Drive  
Brentwood, NJ 08815, USA  
TEL: (908) 826-8000 or (800)222-8000 FAX: (908) 826-8001  
<http://www.kyocerasolar.com>

**KYOCERA Solar do Brasil Ltda.**

Av. Guapimirim 850, L. 11, s/n  
24796-200, Paratiba, RJ, Brazil  
TEL: (55) 21-2437-8000 FAX: (55) 21-2437-2038  
<http://www.kyocerasolar.com.br>

**KYOCERA Solar Pty Ltd.**

Level 3, 3-13 Talavera Road, North Ryde  
N.S.W. 2113, Australia  
TEL: (61) 2-9876-2000 FAX: (61) 2-9876-2000  
<http://www.kyocerasolar.com.au>

**KYOCERA Fineceramics GmbH**

Peter-Müller-Strasse 107, 73730 Badgingen, Germany  
TEL: (49) 71 41-6300-1000 FAX: (49) 71 41-6300-1000  
<http://www.kyocerasolar.eu>

**KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.**

204 Teong Ee Hoe Road, #15-0005  
Central Plaza, Singapore 108710  
TEL: (65) 6371-2000 FAX: (65) 6371-2000

**KYOCERA Asia Pacific Ltd.**

Room 801-802, Tower 1, South Bay Centre, 70 Mody Road,  
Kowloon, Hong Kong  
TEL: (852) 2707-1800 FAX: (852) 2707-1801

**KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office**

10-F, No. 88, Hanking Road, Taipei, Taiwan  
TEL: (886) 2-2650-2600 FAX: (886) 2-2650-2401

**KYOCERA(Tianjin) Sales & Trading Corporation**

20th Floor, Sinochem Building 366, Zhongyuan Rd.,  
Tianjin, China  
TEL: (86) 22-5858-2270 FAX: (86) 22-5858-2260

Kyocera reserves the right to modify these specifications without notice

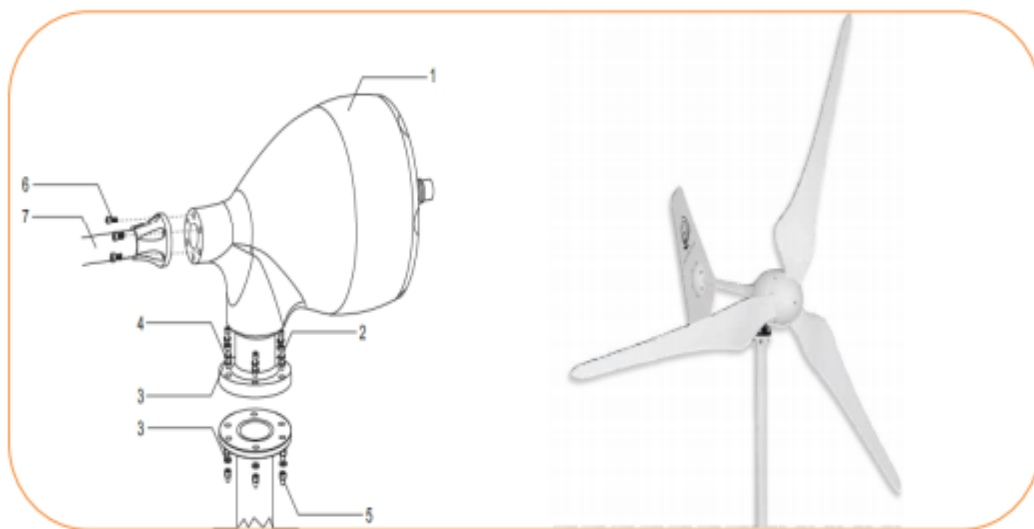
LIB:05RM0703-0409M

# **ANNEXE B**

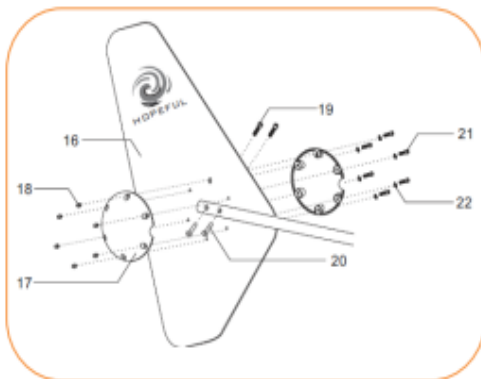
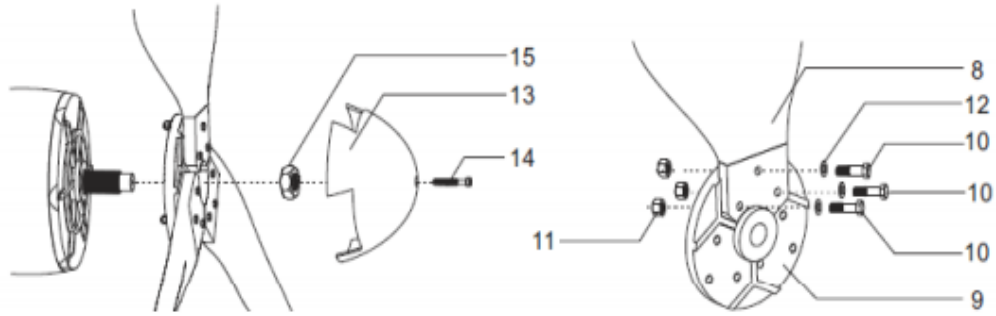


## Eolienne 48 Volts 1000 Watts complète nouvelle génération

### I. Composants

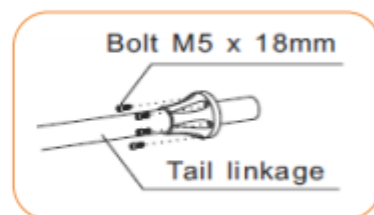
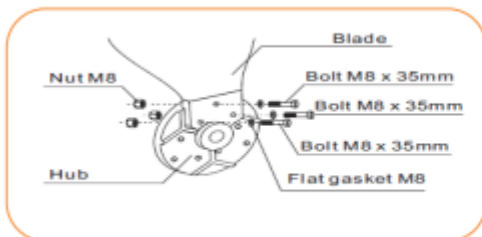


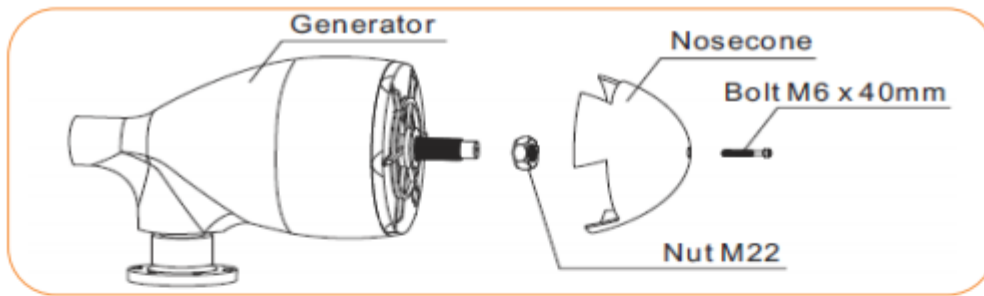
Articles	Descriptions	Quantités
1	Génératrice	1
2	Boulon de M8 x 35mm	6+1
3	Joint plat M8	12+1
4	Rondelle élastique	6+1
5	Ecrou M8	6+1
6	Boulon M5 x 18mm	6+1
7	Attaches pour la queue	1



Articles	Descriptions	Quantités
8	Pales	3
9	Platine de fixation des pâles	1
10	Boulon de M8 x 35mm	9+1
11	Ecrou M8 (écrou auto-bloquant)	9+1
12	Ecrou M6	9+1
13	Nez	1
14	Joint plat M8	1
15	Boulon M6 x 20mm	1
16	écrou M22	1
17	Fixation queue	2
18	Dérive	6
19	Boulon M6 x 40mm	2
20	Ecrou M6	2
21	Boulon M6 x 25mm	6
22	Rondelle	6

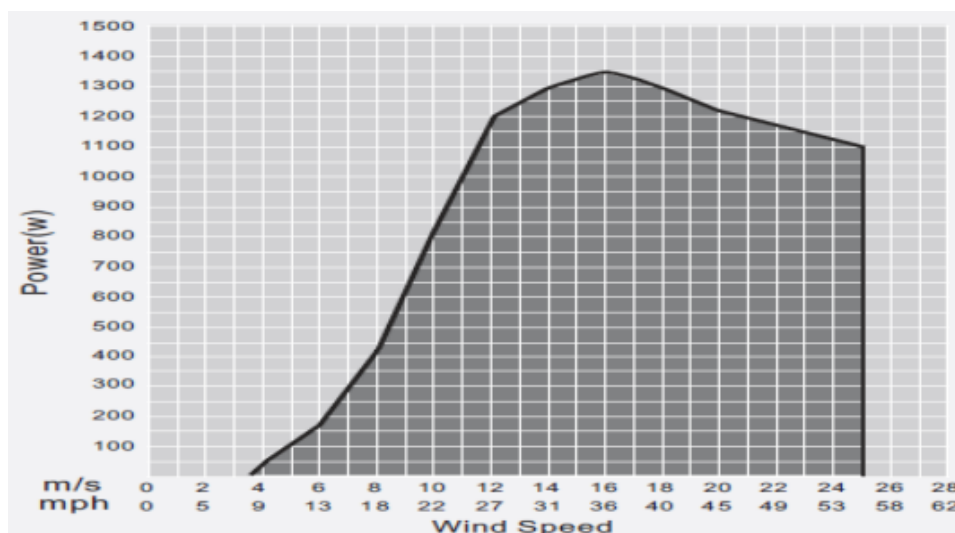
## II. Spécifications techniques :





Modèle	Eolienne
Puissance de sortie nominale	1 KW
Puissance de sortie maximale	1.35 KW
Vitesse de vent nominale	12 M/S
Vitesse du vent maximale	25 M/S
Vitesse de mise en drapeau	40 M/S
Vitesse du vent de démarrage	3,5 M/S
Vitesse de rotation nominale	860 RPM
Vitesse de rotation maximale	1150 RPM
Nombre de pales	3
Diamètre total (nez + pâles)	2.0 M
Longueur de la pale	0.95 M
Matière des pales	Nylon et fibre en verre
Génératrice	Triphasée
Système de freinage	Système de commande de freinage électromagnétique
Poids total	30 Kg
Garantie	2 ans
Régulateur	Contrôle automatique
Mât	8 M

III. Courbe de performance :

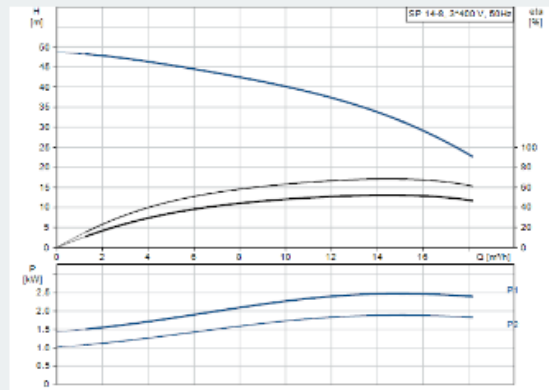


# **ANNEXE C**

## Specifications

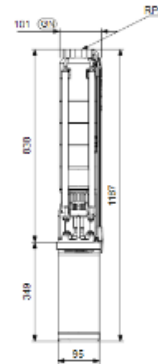
### Liquid:

Pumped liquid:	Water
Maximum liquid temperature:	40 °C
Max liquid t at 0.15 m/sec:	40 °C
Liquid temperature during operation:	20 °C
Density:	998.2 kg/m <sup>3</sup>



### Technical:

Speed for pump data:	2900 rpm
Rated flow:	14 m <sup>3</sup> /h
Rated head:	34.1 m
Shaft seal for motor:	LIPSEAL
Approvals on nameplate:	CE,EAC
Curve tolerance:	ISO9906:2012 3B
Motor version:	T40



**Electrical data:**

Motor type:	MS402
Rated power - P2:	2.2 kW
Power (P2) required by pump:	2.2 kW
Mains frequency:	50 Hz
Rated voltage:	3 x 380-400-415 V
Rated current:	5.50-5.50-5.70 A
Starting current:	440-460-470 %
Cos phi - power factor:	0.85-0.82-0.77
Rated speed:	2850-2860-2870 rpm
Start. method:	direct-on-line
Enclosure class (IEC 34-5):	IP68
Insulation class (IEC 85):	B
Built-in temp. transmitter:	no