

Implication financière des GES pour le développement des systèmes photovoltaïques de pompage de l'eau

Belkacem Bouzidi^{1*} et Mourad Haddadi²

¹ Division de l'Energie Solaire Photovoltaïque, Centre de Développement des Energies Renouvelables,
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

² Laboratoire de Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque,
Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique,
10, Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger

(reçu le 09 Octobre 2007 – accepté le 25 Décembre 2007)

Résumé – Dans les régions sahariennes de l'Algérie, l'eau souterraine constitue la seule alternative pour satisfaire les besoins vitaux des habitants, consommation et irrigation. Pour cela, la solution la plus utilisée est le pompage de l'eau par des groupes électrogènes de faible capacité. Le rendement global le plus élevé pouvant être atteint par les moteurs en question est d'environ 42 %, le reste de l'énergie étant des pertes thermiques et dans la plupart des cas, fournissent une puissance beaucoup plus supérieure à celle qui est demandée par la charge ce qui accroît donc les pertes. D'autre part, ces systèmes d'énergie polluent l'atmosphère avec des poussières, des gaz, tels que le dioxyde de carbone, les oxydes d'azote et de soufre, déclarés comme étant les plus dangereux pour la santé humaine. L'objectif de cet article est de présenter une méthode pour l'estimation du coût du m³ d'eau pompé par des systèmes PV en tenant compte d'une part des réductions de gaz à effet de serre (GES) et des réalités du marché algérien d'autre part.

Abstract – In the of the Sahara regions of Algeria the underground water constitutes the only alternative to satisfy the vital needs of inhabitants, consumption and irrigation. For it, the most used solution is the pumping of water by diesel genset at low capacity. The most elevated global efficiency can be reached by motors is about 42 %, the remainder of the energy being some thermal losses and in most cases, provide a power a lot more superior to the one for that required by the load what increases losses. On the other hand, these systems of energy pollute the atmosphere with dusts, of gases, as the dioxide of carbon, oxides of nitrogen and sulfur, declared like being most dangerous for the human health. The objective of this article is to present a method for the evaluation of the cost of the water m³ pumped by the PV's systems while taking account on the one hand of gas reductions to greenhouse effect (GES) and of realities of the Algerian market on the other hand.

Mots clés: Pompage de l'eau - Groupe électrogène - Gaz à effet de serre – Photovoltaïque.

1. INTRODUCTION

L'électricité joue un rôle majeur dans le développement des régions arides et semi arides qui constituent plus de 80 % du territoire national. Les besoins exprimés par les populations de part leur nombre et leur densité au km², concernent, en priorité de petites quantités d'électricité destinées principalement à faire face aux besoins élémentaires: éclairage et approvisionnement en eau. Vu l'éloignement des sites, ces besoins n'ont aucune chance d'être satisfaits par une connexion au réseau électrique national, beaucoup trop coûteuse et d'autant moins rentable que les usagers sont dispersés (cas de nombreuses localités du Sud algérien, où il est enregistré une densité de moins de 1 hab/km²). De ce fait, en dehors du réseau électrique, la totalité des habitants utilisent des groupes électrogènes pour leurs besoins énergétiques (éclairage, pompage d'eau...).

Ces sites éloignés et souvent difficiles d'accès sont dotés de ressources énergétiques non négligeables disponibles localement, et pourraient utiliser les énergies renouvelables. Evitant les contraintes d'approvisionnement en carburant et réduisant celles liées à l'entretien et la

* Bouzidi_b@cdler.dz _ mourad_haddadi@yahoo.fr

maintenance des équipements (groupes électrogènes), de plus le recours à ce type d'énergie permet d'éviter les émissions de gaz à effet de serre.

Dans le cadre du protocole de Kyoto, les pays industrialisés peuvent financer une réduction des émissions sur le territoire d'un pays en développement et reçoivent en contrepartie des crédits carbone qui lui permettront de dépasser le quota d'émissions qui lui a été alloué. De ce fait, les pays en développement peuvent bénéficier d'un financement non négligeable allégeant les coûts d'exploitation pour un système d'énergie renouvelable.

L'objectif de cet article est d'estimer par une étude de simulation, l'effet des crédits d'émission de la quantité CO_2 équivalent sur le coût du m^3 d'eau pompé par chacun des quatre systèmes de pompage en les remplaçant par des systèmes de pompage photovoltaïques, en utilisant la méthode du coût sur la durée de vie, tout en tenant compte des réalités du marché algérien et aussi évaluer par divers scénarios, l'effet de cette participation sur le coût d'exploitation, principal paramètre de la pérennité de chaque installation.

2. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

A cause du très bas prix du litre diesel, soit 13,70 DA, les groupes électrogènes figurent parmi les moyens de production d'électricité plus particulièrement dans les régions isolées loin du réseau électrique. Le fonctionnement d'un groupe électrogène se base sur le principe suivant lequel l'énergie mécanique est produite par un moteur à gaz ou un moteur diesel (moteur thermique), qui entraîne un alternateur produisant de l'électricité (le rendement global le plus élevé pouvant être atteint avec les moteurs en question est d'environ 42 %, le reste de l'énergie étant des pertes thermiques) [1].

2.1 Liens entre les groupes électrogènes et la protection de l'environnement

Parmi les principaux polluants de l'eau et du sol, on trouve les hydrocarbures pétroliers. Les équipements, qui sont en relation directe avec un moteur thermique, sont les réservoirs de combustible (pour les moteurs fonctionnant au gasoil) et les réservoirs de moyens opérationnels (réservoir d'huile, etc.) d'une part. Les groupes électrogènes polluent l'atmosphère avec des poussières, des gaz, tels que le dioxyde de carbone, les oxydes d'azote et de soufre. Ces polluants contribuent aux pluies acides et à l'effet de serre, déclarés comme étant les plus dangereux pour la santé humaine d'autre part.

Les gaz à effet de serre (GES) permettent au rayonnement solaire d'entrer dans l'atmosphère terrestre, mais empêchent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre de s'échapper en l'absorbant. Les gaz à effet de serre réémettent alors partiellement cette énergie vers la terre, sous forme de radiation thermique, ce qui la réchauffe. Les gaz à effet de serre qui sont les plus pertinents aux projets d'analyse énergétique sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'oxyde nitreux (N_2O) [1-4].

2.2 La protection de l'environnement en Algérie

En Algérie, compte tenu de son immense territoire et une insolation moyenne de 5 kWh/j/m^2 qui, extrapolée sur la superficie totale du pays, donne un potentiel technique journalier avoisinant 315 Milliards de Tep. De ce fait, les énergies renouvelables ont à jouer un rôle majeur pour permettre aux régions isolées d'accéder au développement économique sans atteinte à l'environnement.

Dans les régions sahariennes, les jardins de faibles superficies, ne dépassant généralement pas deux hectares, sont le plus souvent situés à l'extérieur du village et loin du réseau électrique. La seule source énergétique disponible pour satisfaire à leur besoin de consommation et à l'irrigation de leurs jardins, est l'utilisation de système de pompage par groupe électrogène. Mais cette utilisation pourrait avoir un effet négatif sur l'environnement: le dégagement des gaz à effet de serre et le déversement du fuel et ses dérivées dans le sol, polluant la nappe souterraine, unique source existante. Comme la majorité des parcelles agricoles des régions éloignées sont irriguées à partir des groupes électrogènes, et au vu de la production électrique par le diesel durant l'année

2003 qui s'élève à 112 10³ de Tep, (**Tableau 1**) [5], nous pouvons déjà imaginer l'ampleur de la contribution annuelle de cette production à l'émission de gaz à effet de serre.

Tableau 1: Electricité produite en 2003 (10³ Tep*)

Production totale d'électricité	8679
1. Produite par la Sonelgaz	8567
2. Production autonome	112
Electricité produite par Diesel	112

*Tep: Tonne Equivalent Pétrole (# 11600 kWh)

3. ESTIMATION DE LA REDUCTION ANNUELLE DES GAZ A EFFET DE SERRE (GES)

Le modèle décrit ci-après, permet l'estimation du potentiel global des réductions des émissions de gaz à effet de serre pour un projet proposant l'utilisation d'un système d'énergie solaire. Il calcule également le profil des émissions de GES d'un projet de référence (énergie conventionnelle) et le profil des émissions de GES du projet proposant l'utilisation d'une énergie propre (projet proposé). Le potentiel des réductions des émissions de gaz à effet de serre est obtenu en combinant la différence des facteurs d'émissions de GES avec la quantité annuelle d'énergie fournie.

3.1 Sommaire des réductions d'émissions de GES – électricité

Les réductions des émissions de GES, Δ_{GES} , sont calculées par la relation (1) [3, 6].

$$\Delta_{\text{GES}} = (F_{\text{ref}} - F_{\text{prop}}) \times E_{\text{ann.}} \quad (1)$$

où F_{ref} est le facteur d'émission de GES du niveau de référence ($t_{\text{CO}_2}/\text{MWh}$), F_{prop} est le facteur d'émission de GES pour le projet proposé ($t_{\text{CO}_2}/\text{MWh}$), $E_{\text{ann.}}$ la quantité annuelle d'électricité produite par le projet proposé (MWh).

3.2 Facteur d'émission de GES

L'expression (1), nécessite donc le calcul des facteurs d'émissions de GES, définis comme étant la masse de GES émise par unité d'énergie produite. Pour un seul mode de production d'énergie, la relation (2) [3, 6], est utilisée pour calculer le facteur d'émissions de GES de la source d'énergie de référence.

$$F_{\text{emis}} = (F_{\text{CO}_2} \times P_{\text{CO}_2} + F_{\text{CH}_4} \times P_{\text{CH}_4} + F_{\text{N}_2\text{O}} \times P_{\text{N}_2\text{O}}) \times \frac{1}{\eta} \quad (2)$$

où, F_{CO_2} , F_{CH_4} et $F_{\text{N}_2\text{O}}$ sont respectivement les facteurs d'émissions de CO_2 , CH_4 et N_2O pour la source d'énergie considérée. P_{CO_2} , P_{CH_4} et $P_{\text{N}_2\text{O}}$ sont les potentiels de réchauffement planétaire de CO_2 , de CH_4 et de N_2O . η est le rendement de conversion de la source d'énergie.

Les potentiels de réchauffement de GES sont définis comme étant un multiple d'une unité de référence, qui est le potentiel de réchauffement planétaire du dioxyde de carbone (CO_2), auquel il a été assigné la valeur de référence de 1. Les valeurs standards utilisées sont présentées dans le **tableau 2** [3, 6].

Tableau 2: Potentiels de réchauffement planétaire de différents gaz à effet de serre

Gaz à effet de serre	P
CO_2	1
CH_4	21
N_2O	310

Les facteurs d'émissions varient selon le type et la qualité du combustible. Les valeurs standards utilisées sont représentées sur le **tableau 3**.

Tableau 3: Facteurs d'émissions et rendements de conversion par défaut

Source	F _{CO₂} (kg/GJ)	F _{CH₄} (kg/GJ)	F _{N₂O} (kg/GJ)	η %
Charbon	94,6	0,0020	0,0030	35
Gaz Naturel	56,1	0,0030	0,0010	45
Nucléaire	0	0	0	
Diesel	74,1	0,0020	0,0020	30
Géothermie	0	0	0	
Biomasse	0	0,0320	0,0040	25
Eolien	0	0	0	
Solaire	0	0	0	
Propane	63,1	0,0010	0,0010	45
Essence	69,3	0,0200	0,0006	

4. DESCRIPTION ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME PV

Nous simulons le remplacement de quatre systèmes de pompage de l'eau alimentés par des groupes électrogènes par des systèmes photovoltaïques. Chaque système de pompage est implanté dans un ksar de la commune de Timimoun (Latitude 29.25N, Longitude 0.23E, Altitude 312 m).

En plus de leur grande fiabilité de fonctionnement, les systèmes PV de pompage sont les plus adoptés durant ces deux dernières décennies [7] et sont les plus appropriés pour les régions isolées. Les systèmes photovoltaïques devraient satisfaire les besoins estimés en eau, qui sont résumés dans le **tableau 4**. Le scénario du mois le plus critique du point de vue irradiation [8] et une charge constante [9, 10], c'est-à-dire un besoin quotidien en eau constant, a été retenu.

Tableau 4: Besoins estimés des quatre sites de la région de Timimoun

Ksar	k(A)	k(B)	k(C)	k(D)
Hauteur totale de pompage (m)	50	50	50	50
Consommation (m ³ /j)	40	60	80	100

Bien que les systèmes PV de pompage à couplage direct utilisant un groupe motopompe continu ont été étudiés et leurs performances prouvées [11-14], pour des raisons pratiques telles que la disponibilité, le prix élevé,... le choix s'est porté sur un système alternatif triphasé standard pouvant utiliser n'importe quelle source d'énergie.

En comparaison aux moteurs continu, les moteurs à induction sont très solides, fiables et une maintenance très réduite [13, 15-18]. Les résultats de sites pour les systèmes alternatifs de pompage ont montré des figures de performance encourageantes [19, 20]. Le fonctionnement de la pompe par un moteur alternatif exige naturellement un convertisseur continu – alternatif [21].

La phase la plus délicate concerne le dimensionnement et l'optimisation du système de pompage qui est une tâche complexe, du fait de la variabilité des paramètres d'entrée. Plusieurs travaux sur le dimensionnement de système PV de pompage ont été étudiés [22-25]. Ces travaux se basent sur la simulation du fonctionnement de chaque composant de ces systèmes PV.

Le dimensionnement du générateur PV en termes d'énergie hydraulique et d'irradiation solaire est donné par la relation suivante:

$$P = \frac{\rho \times g \times h \times Q \times \eta_r}{G_T \times \eta_{pv} \times \eta_s} \quad (3)$$

P : Puissance du générateur (Wc)

η_r : Rendement du générateur à la température de référence (T_{ref} = 25 °C)

G_r : Irradiation solaire à la température de référence ($G_r = 1000 \text{ W/m}^2$)

η_{pv} : Rendement du générateur sous les conditions de fonctionnement

G_T : Irradiation solaire journalière sur la surface du générateur PV (kWh/m^2)

Q : Quantité d'eau journalière requise (m^3)

h : Hauteur totale de pompage (m)

η_s : Rendement du sous système

ρ : Densité de l'eau

g : Accélération de la pesanteur.

avec

$$\eta_{pv} = f_m [1 - \alpha (T_c - T_r)] \times \eta_r \quad (4)$$

$$T_c = T_a + \frac{G_T}{800} (\text{NOCT} - 20) \quad (5)$$

f_m : Facteur d'assortiment, qui est le rapport de la puissance de sortie du générateur PV sous les conditions de fonctionnement sur sa puissance de sortie au point de puissance maximale.

La valeur généralement acceptée pour la conception d'un système PV est de 0,9.

α : Coefficient de la température cellule = $0.2 \text{ à } 0.6 \% / ^\circ\text{C}$ (0.004 à 0.005 / $^\circ\text{C}$ pour Si)

T_r : Température de référence ($^\circ\text{C}$)

T_c : Température moyenne de la cellule ($^\circ\text{C}$).

A partir de la relation (3), il est possible de déterminer la taille requise du générateur PV pour une hauteur de pompage et un besoin d'eau donnés et d'estimer la quantité d'eau journalière produite par la taille du générateur à une irradiation donnée.

5. REMPLACEMENT DES GROUPES ELECTROGENES PAR DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

Les systèmes de pompage existants, des groupes électrogènes font actionner chacun un groupe motopompe immergé. Les groupes électrogènes sont de même puissance, par contre les motopompes immergées ont des débits différents, selon les besoins demandés et du site. La constitution physique des systèmes de pompage par groupe électrogène des différents ksars est illustrée dans le **tableau 4**.

Tableau 4: Constitution des systèmes de pompage par des groupes électrogènes

Ksar	k(A)	k(B)	k(C)	k(D)
Consommation (m^3/j)	40	60	80	100
Groupe Motopompe (m^3/h)	8	12	16	17
Groupe Electrogène (kVA)	5,7	5,7	5,7	5,7
Durée de fonctionnement (h/j)	5	5	5	6
Consommation moyenne (l/h)	1,41	1,41	1,41	1,41
Consommation annuelle (l/an)	2573	2573	2573	3088

Chaque système PV de pompage de l'eau proposé est constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur CC/CA triphasé en PWM et d'un groupe motopompe alternatif triphasé. L'eau pompée est stockée dans un réservoir. La taille des différents constituants du système est fonction des besoins du site.

Pour être éligible, la mise en œuvre de ces systèmes de pompage doit entraîner des réductions d'émissions de gaz à effet de serre. Une brève analyse économique est décrite ci-après, permettra ainsi de mettre en évidence l'éligibilité de l'investissement envisagé par rapport à l'option de référence, moins coûteuse certes, mais plus émissive.

5.1 Analyse du projet

Le projet vise à installer des systèmes photovoltaïques de pompage dans quatre ksars à Timimoun, afin de permettre l'alimentation en eau potable de la population locale à partir de forages et de puits existants, ayant une hauteur manométrique totale d'environ 50 m. Le système solaire viendra se substituer à ces groupes diesel: les émissions de CO₂ liées à la consommation de gasoil par ces groupes électrogènes seront ainsi supprimées.

L'évaluation quantitative des réductions d'émissions de gaz à effet de serre est suivie d'une analyse de ses implications financières en fonction du prix de la tonne de CO₂ équivalent sur les marchés de droits d'émissions. Pour cela, deux scénarios de prix ont été retenus: 15 et 25 € (équivalent approximativement à 1500,00 et 2500,00 DA) la tonne de CO₂ équivalent.

L'approche la plus classique et la plus conforme avec la logique économique d'un instrument de marché, consiste à montrer qu'il existe une alternative moins coûteuse financièrement que le projet envisagé, mais plus polluante.

Pour comparer sur le plan économique les deux technologies envisageables (systèmes avec groupes électrogènes ou avec générateurs photovoltaïques), il convient de prendre en compte:

- Le montant de l'investissement initial,
- Les coûts d'exploitations propres à chacune des deux options considérées,
- La durée de vie des systèmes étudiés est fixée à 20 ans, en considérant le remplacement de certains équipements.

5.1.1 Option de référence (groupes électrogènes)

L'investissement initial permettant le renouvellement des groupes électrogènes et des groupes motopompes dans les quatre ksars est illustré dans le **tableau 5**. Compte tenu des conditions d'utilisation locale très hostile, la durée de vie des groupes électrogènes et des groupes motopompes immergés est prise égale à sept ans [6].

Les charges d'exploitations concernent l'achat du gasoil, des lubrifiants et les dépenses d'entretien. Elles varient selon les ksars, et la durée de fonctionnement des groupes électrogènes, étant fonction du volume d'eau consommé, propre à chaque village. Concernant les prix du carburant, deux approches ont été retenus: taux d'escalade annuel de 0 % et de 5 %.

Les dépenses d'investissement ont été calculées sur une période de 20 ans. Le paiement de l'investissement se fera sous forme d'annuités en appliquant des taux d'intérêt et d'actualisation de 08 et 10 % par an respectivement.

Les coûts de maintenances typiques moyens annuels sont de 10 % du coût d'investissement. Le coût du m³ d'eau pompé par le système à groupe électrogène est représenté dans le **tableau 5**.

Tableau 5: Coûts sur la durée de vie
Option: Systèmes de pompage par groupe électrogène

Ksars	k(A)		k(B)		k(C)		k(D)	
Besoins en eau (m ³ j)	40		60		80		100	
Investissement (10 ³ DA)	341		430		410		410	
Consommation annuelle de gasoil (litres)	2573		2573		2573		3027	
Taux d'escalades	0%	5%	0%	5%	0%	5%	0%	5%
Carburant et lubrifiant (10 ³ DA)	346	532	346	532	346	532	407	625
Entretien (10 ³ DA)	335	335	420	420	403	403	403	403
Coûts de remplacement (10 ³ DA)	343	343	421	421	405	405	405	405
Coût du m ³ (DA)	4,85	5,49	3,84	4,26	2,78	3,10	2,31	2,61

5.1.2 Option proposée (systèmes solaires photovoltaïques)

L'investissement initial comprend pour chaque station, l'acquisition et l'installation du générateur photovoltaïque, le convertisseur CC/CA et le groupe motopompe immergé. La durée de vie de ces équipements est variable: les modules photovoltaïques ont une durée de vie de 20 ans, garantis par le fabricant, les autres équipements devront être renouvelés comme suit:

- Convertisseur CC/CA: 07 ans
- Groupe Motopompe: 07 ans.

La valeur actualisée des dépenses d'investissement et d'exploitation a été calculée en appliquant des taux d'intérêt et d'actualisation de 08 % et 10 % respectivement. Le coût du m³ d'eau pompé par les systèmes photovoltaïques est présenté dans le **tableau 6**.

Tableau 6: Coûts sur la durée de vie
Option: Systèmes de pompage par Energie solaire photovoltaïque

Ksars	k(A)	k(B)	k(C)	k(D)
Besoins en eau (m ³ /j)	40	60	80	100
Investissement (10 ³ DA)	2 100	2 900	2 900	3 640
Entretien (10 ³ DA)	366	366	366	366
Coûts de remplacement (10 ³ DA)	554	632	616	616
Coût du m ³ (DA)	9,14	8,12	6,06	5,95

Au vu de ces résultats obtenus (**tableaux 5 et 6**), nous constatons que les systèmes de pompage par groupe électrogène présentent des coûts sur la durée de vie plus faibles que ceux proposés par les systèmes solaires photovoltaïques, mais sont plus émissives de gaz à effet de serre, en plus de la pollution environnementale et cela, malgré la prise en considération d'une éventuelle augmentation annuelle de 5 % du prix du litre de carburant.

6. QUANTIFICATION DES REDUCTIONS D'EMISSIONS ATTRIBUABLES AU PROJET

Le projet relève de la procédure simplifiée mise en place pour les projets de faible ampleur (puissance inférieure à 15 MW) [26]. Pour quantifier les émissions de CO₂ résultantes de l'utilisation de groupes électrogènes, deux méthodes sont proposées [4, 26].

- Calcul de la consommation électrique annuelle des pompes, puis application du facteur d'émission: 1,4 kg de CO₂ par kWh de consommation électrique [26]
- Calcul de la consommation annuelle de gasoil des groupes électrogènes, puis application du coefficient d'émission: 3,2 kg de CO₂ par kg de gasoil consommé [26].

Pour ne pas avoir à faire à la fluctuation du carburant lors du vieillissement du groupe électrogène au fil des heures de fonctionnement et des conditions climatiques extrêmes, la méthode consistant à prendre en considération la consommation électrique annuelle des pompes fut adoptée. Donc, la méthode consiste à déterminer la consommation électrique annuelle des groupes motopompes, exprimée en kWh, qui sera multipliée par le facteur d'émission, égal à 1,4 kg de CO₂ par kWh.

Le **tableau 7**, donne la quantité d'équivalent carbone pouvant être évitée par l'utilisation des systèmes photovoltaïques de pompage de l'eau.

Tableau 7: Calcul des émissions causées par la source de référence

Ksars	k(A)	k(B)	k(C)	k(D)
Puissance Groupe électrogène (KVA)	5.7	5.7	5.7	5.7
Durée de fonctionnement/jour	5	5	5	6
Durée de fonctionnement/An.	1825	1825	1825	2190
Consommation électrique/An.	10402	10402	10402	12483

Emissions annuelles d'équivalent CO ₂	14563	14563	14563	17476
Emissions annuelles d'équivalent CO ₂ totales		61 165 kg /CO ₂		
Emissions d'équivalent CO ₂ (Vie du projet)		1 223 300 kg /CO ₂		

Sur les quatre ksars considérés, la consommation électrique annuelle est de 43689 kWh, soit, pour un facteur d'émission de 1,4 kg de CO₂ par kWh, des émissions annuelles égales à 61165 kg de CO₂ en utilisant l'option de référence, c'est-à-dire groupes électrogènes diesel. Sur la durée de vie considérée (20 ans), les émissions atteindront 1223,3 tonnes équivalent CO₂.

7. IMPLICATIONS FINANCIERES

La mise en œuvre du projet de systèmes photovoltaïques pour le pompage d'eau se traduirait par des réductions d'émissions égales à 1223,3 tonnes de CO₂ sur la durée de vie du projet (20 ans). Le projet pourrait donc recevoir des crédits d'émissions à hauteur de 1223 tonnes de CO₂ équivalent. Cet apport apportera un complément au financement du projet, d'autant plus important que le prix de la tonne sera élevé. En se basant sur les deux scénarios retenus relatifs au prix de la tonne de CO₂ équivalent, le taux de couverture des coûts d'exploitation des systèmes photovoltaïques par les crédits carbone est illustré dans le **tableau 8**.

Tableau 8: Taux de couverture par les crédits carbone des coûts d'exploitation des systèmes photovoltaïques des ksars concernés

Coût d'exploitation totale annuelle (DA)	213000,00	
Emissions totales annuelles (tonnes de CO ₂)	62	
	1 ^{er} scénario	2 ^{ème} scénario
Prix de la tonne de CO ₂ (DA)	1500,00	2500,00
Valeur marchande des crédits carbone (DA)	93000,00	155000,00
En % des coûts d'exploitation	44 %	73 %

Nous pouvons remarquer dans le **tableau 8** que, quelque soit le prix de vente des crédits carbone, la validation du projet permettrait de couvrir une part importante des coûts d'exploitation des systèmes photovoltaïques destinées au pompage de l'eau pour la consommation ou l'irrigation, qui sera d'autant plus importante que le prix de la tonne de CO₂ sera élevé.

Cet apport financier permettrait d'alléger la participation financière des usagers aux coûts d'exploitation et de ce fait contribuer à la pérennité de l'installation.

8. CONCLUSION

L'exploitation d'un groupe électrogène peut être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'eau et du sol et a d'innombrables conséquences pour notre santé, notre environnement et notre économie.

Les groupes électrogènes polluent l'atmosphère avec des poussières, des gaz, tels que le dioxyde de carbone, les oxydes d'azote et de soufre. Ces polluants contribuent aux pluies acides et à l'effet de serre. Les particules fines provenant des moteurs diesel ont été déclarées comme étant parmi les polluants, les plus dangereux pour la santé humaine.

Les pays industrialisés peuvent accumuler des crédits pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre en investissant dans des projets de réduction d'émission dans des pays en voie de développement. Ces réductions financées dans les pays en développement présentent des avantages certains:

- Les régions isolées plus particulièrement implantées au sud algérien peuvent tirer profit de ce type de financement des projets d'énergie renouvelable nécessaire au développement

économique; tels que les projets d'une grande utilité socio-économique pour la population (pompage, éclairage, froid, chauffage, télécommunication,...).

- Alléger la participation financière des usagers par rapport aux coûts d'exploitation, principale préoccupation pour la pérennité de l'installation.
- Encourager l'utilisation des systèmes d'énergie renouvelable en particulier si le financement des équipements pourrait faire l'objet de mesures incitatives (subvention, taux d'intérêt réduit, taxes,...).

REFERENCES

- [1] Document, 'Les Groupes Electrogènes du Point de Vue de la Protection de l'Environnement', exp 143,e/f, Loi du 10 Juin 1999 relative aux établissements classés, France, Version 2003.
- [2] J.M. Jancovici, 'Le Réchauffement Climatique', 2003. <http://www.manicore.com/>
- [3] Document, Retscreen International, 'Modèle d'Analyse des Réductions d'Emissions de GES', 2001.
- [4] Document, 'Lignes Directrices du GIEC pour les Inventaires Nationaux de Gaz à Effet de Serre', Manuel Simplifié (Vol. 2), 1996. <http://www.ipcc-ggip.iges.or.jp/public/gl/french.htm>
- [5] Document, 'Bilan Energétique de l'Année 2003', Ministère de l'Energie et des Mines, 2003.
- [6] B. Bouzidi, M. Haddadi et A. Malek, 'La Rentabilité Economique des Systèmes Photovoltaïques', CNIE'04, Oran, Algérie, 2004.
- [7] T.D. Short and R. Oldach, 'Solar Powered Water Pumps: the Past, the Present-and the Future ?', Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 125, N°1, pp 76 - 82, 2003.
- [8] M.G. Thomas, 'Water Pumping: The Solar Alternative', SAND8T-0804, Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories Photovoltaic Systems Design Center, 1993.
- [9] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, 'Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 8, N°1, pp. 19 - 26, 2005.
- [10] A.N. Celik, 'Techno-Economic Analysis of Autonomous PV-Wind Hybrid Energy Systems Using Different Sizing Methods', Energy Conversion and Management, Vol. 44, N°12, pp. 1951 - 1968, 2003.
- [11] A.A. Ghoneim, 'Design Optimization of Photovoltaic Powered Water Pumping Systems', Energy Conversion and Management, Vol. 47, N°11-12, pp. 1449 - 1463, 2006.
- [12] A. Hadj Arab, M. Benghanem and F. Chenlo, 'Motor-Pump System Modelization', Renewable Energy, Vol. 31, pp. 905 -913, 2006.
- [13] K. Benlarbi, L. Mokrani and M. Naït-Saïd, 'A Fuzzy Global Efficiency Optimization of a Photovoltaic Water Pumping System', Solar Energy, Vol. 77, N°2, pp. 203-216, 2004.
- [14] M. Kolhe, J.C. Joshi and D.P. Kothari, 'Performance Analysis of a Directly Coupled Photovoltaic Water-Pumping System', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, pp. 613 - 618, 2004.
- [15] I. Odeh, Y.G. Yohanis and B. Norton, 'Economic Viability of Photovoltaic Water Pumping Systems', Solar Energy, Vol. 80, pp. 850 -860, 2006.
- [16] Y. Yaho, P. Baustameute and RS. Ramshow, 'Improvement of Induction Motor Drive Systems Supplied by Photovoltaic Array with Frequency Control', IEEE Transactions of Energy Conversion, Vol. 8, N°1, pp. 47 - 52, 1994.
- [17] A. Zaki and M. Eskander, 'Matching of Photovoltaic Motor-Pump Systems for Maximum Efficiency Operation', Renewable Energy, Vol. 7, N°3, pp. 279 - 288, 1996.
- [18] M. Eskander and A. Zaki, 'A Maximum Efficiency Photovoltaic Induction Motor Pump System', Renewable Energy, Vol. 10, N°1, pp. 53 - 60, 1997.
- [19] O. Olorunfemi, 'Analyse of Current Source Induction Motor Drive Fed from Photovoltaic Energy Source', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, N°1, pp. 99 - 106, 1991.

- [20] I. Odeh and M. Mahmoud, '*Field Results of Photovoltaic Water Pumping Systems*', Applied Solar Energy, Vol. 31, N°3, pp. 20 - 29, 1995.
- [21] M. Alonso-Abella, E. Lorenzo and F. Chenlo, '*PV Water Pumping Systems Based on Standard Frequency Converter*', Progress in Photovoltaic, Research and Applications, Vol. 11, pp. 1 - 13, 2003.
- [22] A. Hadj Arab, M. Benghanem and A. Gharbi, '*Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 8, N°1, pp. 19 - 26, 2005.
- [23] A. Hadj Arab, F. Chenlo and M. Benghanem, '*Loss-of-Load Probability of Photovoltaic Pumping Systems*', Solar Energy, Vol. 76, pp. 713 - 723, 2004.
- [24] A. Hadj Arab, F. Chenlo, K. Mukadam and J.L. Balenzategui, '*Performance of PV Water Pumping Systems*', Renewable Energy, Vol. 18, pp. 191 - 204, 1999.
- [25] A. Hamidat, '*Simulation of the Performance and Cost Calculations of the Surface Pump*', Renewable Energy, Vol. 18, pp. 383 - 392, 1999.
- [26] Document, '*Amendment to Appendix B of the Simplified Modalities and Procedures for Small-Scale CDM Project Activities*', <http://cdm.unfccc.int/EB/014/eb14refran02.pdf>