

Evaluation d'un swap climatique basé sur l'électricité photovoltaïque : une opportunité pour la Tunisie

Yacin JERBI^{#1}, Chaima BAAZAOU^{*2}

[#] *Département des Méthodes Quantitatives, Faculté des Sciences Economiques et de Gestion de Mahdia
Tunisie*

¹ *yacin.jerbi@gmail.com*

^{*} *Faculté des Sciences Economiques et de Gestion de Sfax
Tunisie*

² *chaima.baazaoui@gmail.com*

Résumé— Le climat a un effet significatif sur plusieurs sphères de l'activité économique et les économistes envisagent un avenir prometteur pour les dérivés climatiques en matière de la gestion du risque climatique. La Tunisie se dote d'une richesse actuelle encore non négligeable en matière de l'énergie solaire et ses bienfaits. Ces dernières années, la Société tunisienne de l'électricité et du gaz (STEG) s'est penchée sur la maîtrise et l'introduction de l'énergie solaire photovoltaïque en Tunisie. Ce papier s'intéresse à la recherche d'une méthodologie pour l'évaluation d'un contrat swap climatique dans la région de Sfax. En se référant au modèle de puissance entrée/sortie de l'énergie produite par un générateur photovoltaïque, nous définissons une fonction de la production de l'électricité photovoltaïque basé sur la température et l'ensoleillement ainsi que des hypothèses plausibles pour déterminer la formule d'un swap climatique afin de calculer ses prix prévisionnels sur la période 2015-2017.

Mots clés— Swap, température, ensoleillement, production de l'électricité photovoltaïque, méthodologie Box-Jenkins

I. INTRODUCTION

Presque toutes les activités économiques sont exposées aux conditions climatiques (Alexandridis et Zapranis, 2013), parfois de façon cyclique comme pour le secteur de l'agriculture (Machek et Spicka, 2013), de l'énergie et du gaz (Benth, Lange et Myklebustz, 2012; Pérez-González et Yun, 2013) ou de façon irrégulière, comme dans l'industrie touristique et de loisirs (Bank et Wiesner, 2011) ou dans l'industrie de la construction (Dischel, 2002).

Vers la fin des années 90, une nouvelle catégorie d'instruments financiers appelés dérivés climatiques a été introduite pour permettre aux entreprises de gérer leur "risque volumétrique" résultant des conditions météorologiques défavorables (Geman, 1999). Les dérivés climatiques sont des produits financiers sur un sous-jacent qui est un indice météorologique lié à la température, à la pluie, à la vitesse du vent ou à toute autre variable climatique. Il existe trois principaux types : les swaps, les options et les contrats à terme "futures" ou "forward". Le marché des produits dérivés climatiques s'est rapidement développé au cours de la dernière

décennie. Il a pris son envol aux États-Unis d'abord et puis un peu partout dans le monde mais à des vitesses différentes (Dischel, 2002 ; PWC, 2011). Les "énergéticiens" américains ont été à l'origine de la création, c'est pour cette raison, le secteur de l'énergie illustre le mieux l'impact du climat sur l'activité économique. Aujourd'hui, la consommation excessive de stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Cependant, pour remédier à cela, de nouvelles énergies dites "énergies renouvelables", ont émergé.

Depuis plus de deux décennies, la Tunisie s'est orientée vers l'utilisation rationnelle de l'énergie et le développement des énergies renouvelables. La filière étudiée dans ce papier est l'énergie solaire photovoltaïque. Parmi les principaux acteurs qui peuvent influencer et faire avancer le développement du marché photovoltaïque en Tunisie était la STEG. Pour cela, nous proposons d'évaluer un contrat d'échange entre la STEG et ses clients ayant des panneaux photovoltaïques installés dans la ville de Sfax. Ce swap sera présenté comme une solution optimale à une situation fictive de gestion de risque climatique impliquant ces deux contreparties ayant des profils de risque financier opposés.

II. REVUE DE LITTÉRATURE

Nous passerons en revue les modèles d'estimation des variables météorologiques, les modèles mesurant l'énergie de l'électricité photovoltaïque ainsi que les méthodes d'évaluation du swap climatique.

A. Modélisation des variables climatiques

Plusieurs auteurs ont modélisé la variable climatique en faisant appel aux processus ARIMA. L'un des premiers modèles est un processus général AR(p) qui a été proposé par Carmona (1999). Une amélioration a été apportée par Moreno (2000) qui a calibré son modèle pour la température sur deux sites en France, Paris-Orly et Marseille. Il a considéré que la volatilité n'est pas constante et qu'elle est saisonnière. En 2001, il a mis en évidence et modélisé la persistance de la pluie. Cao et Wei (2000) ont utilisé un modèle autorégressif

pour capter les caractéristiques uniques de l'indice DAT (Daily Average Temperature). Pour simuler la température de la ville de Lyon, Roustant (2003) a constitué une version plus générale que celle de Cao et Wei (2000). Le modèle comporte un écart-type qui est parfaitement lisse et une composante cyclique paramétrique. En outre, il a attribué à la température une structure ARMA. Campbell et Diebold (2005) ont utilisé des données de températures quotidiennes entre 1960 et 2001 au niveau de dix localités situées aux Etats-Unis. Ils ont utilisé un AR, mais l'originalité de leur spécification qu'ils ont mis en avant une volatilité GARCH périodique. Caballero et al. (2002) ont modélisé la température désaisonnalisée et sans tendance par des modèles ARFIMA (1,d,1) des trois séries de température (centre de Royaume-Uni, Chicago et Los Angeles). Le principal avantage dans l'utilisation des séries chronologiques réside dans le fait que l'on peut prendre en compte la saisonnalité ainsi que la tendance de la grandeur à estimer. Des autres modèles, très développés dans la littérature, sont les modèles stochastiques. Ils sont basés sur une modélisation dynamique du sous-jacent. Il s'agit d'introduire un processus de retour à la moyenne de type Ornstein Uhlenbeck (Alaton et al. 2002).

B. Modélisation de l'énergie photovoltaïque

En vue de sa simplicité et sa validité empirique, le modèle retenu dans cette partie pour estimer la production d'électricité moyenne mensuelle à partir de l'énergie solaire photovoltaïque est celui du modèle de puissance entrée/sortie (Jones et Underwood, 2000). Le rendement d'une cellule photovoltaïque est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule à la puissance lumineuse d'incident :

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{\theta S} \quad (1)$$

S est l'ensoleillement et θ la surface totale installée.

On a donc :

$$\eta_{\max} = \eta_0 \eta_s \eta_T \sin(\psi) \quad (2)$$

Où $\eta_s = a' - \frac{b'}{S_0}$ avec $a' = 1.059$ et $b' = 31.444w/m^2$; η_0 est le rendement de référence du module sous les conditions standards ($T_0 = 25^\circ C$, $S_0 = 1000W/m^2$), $\eta_0 = 0.92$ et ψ est l'angle d'inclinaison = $\frac{\pi}{2}$ donc $\sin(\psi) = 1$.

$$\frac{P_{\max}}{\theta S} = \eta_0 \eta_s \eta_T \quad (3)$$

$$\eta_T = \lambda(1 - \gamma(T_c - T_0)) \quad (4)$$

Avec T_0 est la température de référence, $T_0 = 25^\circ C$, λ coefficient à estimer, γ est un coefficient de température déterminé expérimentalement. Il est défini comme la variation du rendement thermique de la cellule pour une variation de $1^\circ C$ de la température de la cellule. La valeur typique de ce coefficient se situe entre 0.004 et 0.006.

T_c est la température de la cellule, il est défini :

$$T_c = T_a + \alpha S \quad (5)$$

Avec $\alpha = \frac{NOCT-20}{800}$

La norme NOCT correspond à la température normale de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Elle est définie comme la température de la cellule quant le module est sous certaines conditions (irradiation solaire $800W/m^2$, distribution spectrale AM1.5, température ambiante $T_a = 20^\circ C$, vitesse du vent de 1m/s). Les meilleurs modules fonctionnant à une NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) de $33^\circ C$, le plus mauvais à $58^\circ C$ et le module typique à $48^\circ C$ respectivement. Sous l'hypothèse $NOCT = 48^\circ C$, le coefficient $\alpha = 0.035$.

On suppose que les déperditions thermiques entre la cellule et l'ambiance sont négligés de manière à considérer la température de la cellule égale à la température ambiante.

$T_a = T_t$: Température ambiante.

$T_0 = T_r$: Température de référence = $25^\circ c$

Soit l'expression suivante : $T_c = T_t + \alpha S_t$

La fonction d'énergie sera de la forme suivante :

$$f(T_t, S_t) = \lambda S_t (1 - \gamma(T_t - T_r + \alpha S_t)) \quad (6)$$

On pose :

$$X = S_t (1 - \gamma(T_t - T_r + \alpha S_t)) \quad (7)$$

Donc :

$$f(T_t, S_t) = \lambda X + \lambda_0 \quad (8)$$

Avec λ est un paramètre à estimer avec la méthode de moindre carrée ordinaire.

$$\hat{\lambda} = \frac{COV(f,X)}{V(X)} \text{ et } \lambda_0 = \bar{f} - \hat{\lambda} \bar{X}$$

C. Evaluation du swap climatique

Le swap climatique est un instrument ferme qui permet de contrôler clairement le versement d'un montant généralement plafonné de l'une des parties à l'autre en résonnant en terme de gain ou de perte. Ce type des produits dérivés climatiques a prouvé son efficacité dans d'autres pays en développement. En utilisant notre modèle théorique de la production de l'électricité photovoltaïque, le prix du contrat swap climatique est présenté par la formule suivante :

$$\text{Swap}_t = [\max(VI, 0) - \max(-VI, 0)] \quad (9)$$

Avec :

$$VI = \sum_{i=1}^n [f(T_t - S_t) - K_i] e^{-r\Delta t} \quad (10)$$

Où K_i est le niveau d'exercice durant le mois i , c'est la consommation moyenne mensuelle estimée de l'électricité du client $e^{-r\Delta t}$ avec un facteur d'actualisation pour le mois $r=5\%$. Ce swap donne lieu à un versement unique, généralement plafonné de l'une des parties à l'autre en fonction du niveau atteint par rapport à un Strike convenu.

III. DONNEES, METHODOLOGIE, RESULTATS

A. Données

L'étude porte sur les séries de la température moyenne journalière en degré Celsius et les séries de l'ensoleillement journalier en joules de la ville de Sfax qui sont collectées auprès de l'institut national de la météorologie. Les séries couvrent la période de 01-01-2004 à 31-12-2014 et comportent chacune un total de 4018 observations. La consommation et la production moyenne mensuelle

d'électricité en KWh des clients qui ont des panneaux photovoltaïques dans la région de Sfax pour la période allant de 2012 à 2014, les données recueillies proviennent de la STEG. On présente un swap d'électricité échangé entre la STEG et son client dans Fig. 1.

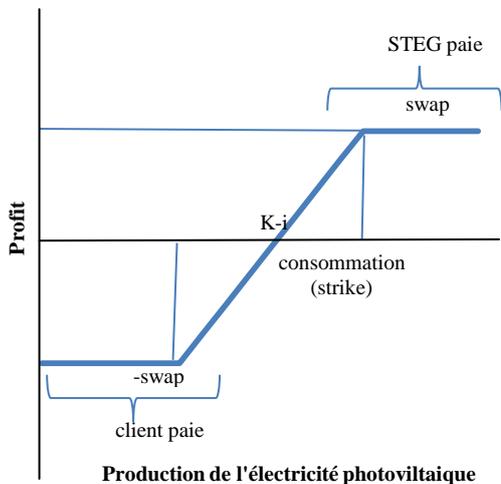


Fig. 2 Swap d'électricité photovoltaïque entre la STEG et son client

B. Méthodologie

Pour réaliser notre étude empirique, nous nous sommes intéressés à l'estimation de la dynamique des chroniques désaisonnalisée et corrigée de la tendance de la température et de l'ensoleillement de la ville de Sfax par la méthodologie du Box-Jenkins. A la présence du phénomène d'hétéroscédasticité, le modèle de la famille ARCH/GARCH sera utilisé pour la modélisation de la variance considérée comme mesure de risque. Nous reviendrons sur les modèles trouvés pour prévoir les valeurs mensuelles de la température et de l'ensoleillement pour les années 2015-2016. Par la suite, nous évaluerons un swap climatique sur la production de l'électricité photovoltaïque. D'une part, nous allons utiliser le modèle théorique décrit précédemment pour prévoir la production des panneaux solaires photovoltaïques qui a été prise comme le sous-jacent de notre contrat. D'autre part, nous allons approximer la consommation moyenne mensuelle qui a été retenu comme le prix d'exercice du swap étudié.

C. Résultats et interprétation

Prévision des variables météorologiques

Nous appliquons la méthodologie de Box-Jenkins pour prévoir nos chroniques *dtempsfax* et *denssfax*. Il s'agit d'identifier les ordres *p* et *q* en se référant aux corrélogrammes. Les trois premières autocorrélations simples de la série *dtempsfax* et les deux premières de la série *denssfax* sont significativement différentes de zéro. En revanche, les six premières autocorrélations partielles de *dtempsfax* et *denssfax* sont significativement différentes de zéro. Nous avons choisi $q=3$ et $p=6$ pour *dtempsfax* ; $q=2$ et $p=6$ pour *denssfax*. Le modèle accepté est celui qui minimise les critères AIC, SC et qui a la valeur de LL la plus élevée. Nous avons remarqué que le modèle ARMA(1,2) représente la

dynamique de la série de la température et ARMA(2,1) représente la dynamique de la série de l'ensoleillement pour la ville de Sfax puisqu'ils ont vérifié les conditions citées. Les modèles qui ont plus des coefficients significativement différents de zéro (t-student supérieur à $|1.96|$) sont regroupés dans Table 1.

TABLE I

CRITERES DE SELECTION D'ARMA POUR LES DIFFERENTES SERIES

TABLE II
FONT SIZES FOR PAPERS

Modèle	dtempsfax			denssfax		
	AIC	SC	LL	AIC	SC	LL
AR(1)	4.076	4.080	-8241.945	5.040	5.043	-10118.59
AR(2)	4.065	4.070	-8157.347	4.940	4.945	-9914.796
AR(3)	4.043	4.049	-8110.848	4.910	4.916	-9850.938
AR(4)	4.028	4.036	-8077.926	4.881	4.889	-9788.740
AR(5)	4.011	4.021	-8040.828			
MA(1)	4.049	4.052	-8192.326	4.854	4.857	-9748.945
MA(2)	4.014	4.019	-8058.995	4.815	4.799	-9627.726
MA(3)	4.003	4.009	-8036.430			
ARMA (1.1)	4.797	4.803	-8032.717	4.805	4.805	-9626.221
ARMA (1.2)	4.002	4.009	-8032.707	4.804	4.803	-9624.272
ARMA (2.1)	4.102	4.019	-8033.679	4.795	4.802	-9623.105
ARMA (2.2)	4.241	4.247	-8033.558	4.797	4.812	-9624.214
ARMA (1.3)	4.003	4.010	-8032.927			

Nous examinons la non normalité des résidus à travers Fig. 2.

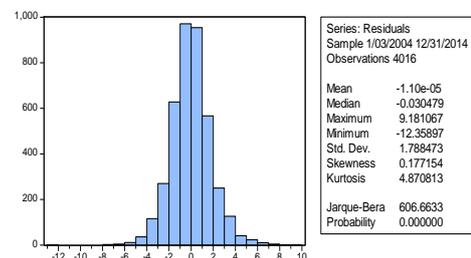
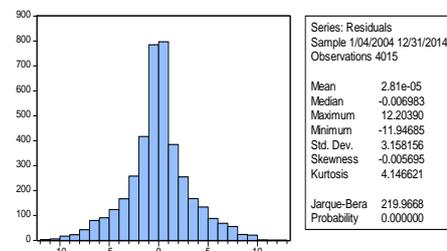


Fig. 2 Histogrammes des résidus issus de l'estimation du processus ARMA

La valeur du coefficient d'aplatissement "kurtosis" est largement supérieure à 3. De plus le coefficient d'asymétrie "Skewness" est différent de zéro. La probabilité critique associée au test de Jarque-Bera est nulle. Cela nous amène à déduire que les résidus ne sont pas des bruits blancs. Ainsi, ils présentent les caractéristiques d'une hétéroscédasticité. Afin de tenir compte de la volatilité et du caractère non linéaire de nos chroniques, nous allons déterminer l'ordre adéquat du modèle GARCH (p,q) à partir de l'analyse des corrélogrammes des résidus au carré du modèle ARMA déjà validé de chaque série de l'étude. Ce faisant, pour les autocorrélations simples, les trois premières de la série dtempfax les deux premières de la série denssfax sont significativement différentes de zéro. Par contre, la première autocorrélation partielle des deux séries est significativement différente de zéro. La comparaison des critères de sélection (AIC, SC, LL) nous amène à choisir le processus GARCH(1,2) pour la modélisation de la variance conditionnelle des séries dtempfax et denssfax. Les différents modèles retenus sont donnés dans Table 2.

TABLE 2

CRITERES DE SELECTION D'ARCH-GARCH POUR LES DIFFERENTES SERIES

Modèle	dtempfax			denssfax		
	AIC	SC	LL	AIC	SC	LL
ARCH(1)	3.975	3.988	-7970.238	4.781	4.790	-9591.377
ARCH(2)	3.963	3.978	-7945.864	4.773	4.784	-9575.108
ARCH(3)	3.959	3.975	-7936.187			
GARCH (1.1)	3.953	3.964	-7930.344	4.748	4.760	-9525.413
GARCH (1.2)	3.948	3.961	-7920.380	4.745	4.758	-9518.457

Pour réaliser la prévision de nos variables climatiques, nous utilisons les modèles ARMA(1.2)-GARCH(1,2) et ARMA(2.1)-GARCH(1,2) qui ont décrit bien la dynamique des séries de la température moyenne journalière et de l'ensoleillement journalier pour la ville de Sfax sur la période allant du 1^{er} janvier 2004 au 31 décembre 2014. Fig. 3 et Table 3 montrent les résultats.

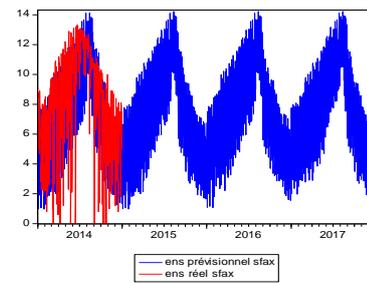
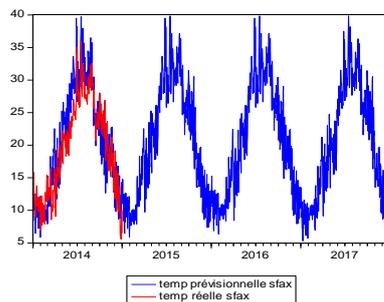


Fig. 3 Prévision de la température moyenne journalière et de l'ensoleillement journalier (2014-2017)

TABLE 3

RESULTATS DE LA PREVISION DE LA TEMPERATURE ET DE L'ENSOLEILLEMENT (2015-2017)

Mois	Température prévisionnelle			Ensoleillement prévisionnel		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Jan	11.321	11.814	10.236	5.442	5.801	6.165
Fév	10.049	10.841	10.869	6.614	7.222	6.729
Mars	15.831	15.903	14.285	7.692	7.921	7.011
Avr	18.268	17.211	17.779	7.760	8.478	8.022
Mai	24.325	22.771	20.335	8.413	8.759	7.843
Juin	31.335	31.565	29.157	11.573	10.900	10.546
Juil	33.208	32.350	33.492	10.672	10.159	10.965
Août	32.873	33.325	32.701	12.161	12.580	11.844
Sept	26.272	28.639	27.946	7.493	7.015	8.738
Oct	21.669	23.632	25.253	7.043	6.735	6.138
Nov	19.167	18.446	16.107	6.427	6.225	5.794
Déc	13.578	12.891	12.213	5.393	5.754	5.221

Prévision de la production et la consommation moyenne mensuelle

La prévision de la production et la consommation moyenne mensuelle sur la période du début janvier 2015 jusqu'au 31 décembre 2017 des clients installés dans la ville de Sfax, est réalisé comme suit : En premier lieu, nous utilisons le modèle GARCH pour la prévision de la consommation. En second lieu, nous calibrons notre modèle de base de production en fonction des valeurs prévisionnelles de la température et de l'ensoleillement pour déduire la fonction de la production d'énergie.

Le coefficient de corrélation désigné par $\rho_{(X,Y)}$ mesure le degré de liaison entre la température moyenne journalière, l'ensoleillement journalier et la production d'énergie. Plus ce coefficient est proche de 1 et plus forte est la corrélation

$$\rho_{(X,Y)} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

Où n : la taille de l'échantillon i : l'indice allant de 1 à n, X_i et Y_i : les valeurs des variables étudiées, \bar{X} et \bar{Y} : les valeurs moyennes.

D'après Table 4, les coefficients calculés sont supérieurs à 0,7 et la corrélation a un niveau stable d'une année à une autre.

TABLE 4

VALEURS DE LA CORRELATION ENTRE LA TEMPERATURE, L'ENSOLEILLEMENT ET LA PRODUCTION

Variable	2012	2013	2014
Temp-Ens	0.753	0.708	0.777
Prod-Temp	0.803	0.847	0.815
Prod-Ens	0.819	0.703	0.775

L'association de la prévision de l'évolution des paramètres climatiques au cours du temps permet de fournir une prévision de l'énergie produite par un modèle théorique de puissance entrée/sortie dans la région de Sfax.

$$f_{\text{Sfaxprv}}(T_t, S_t) = 20.529 X + 25.358 \quad (12)$$

Dans notre étude, la consommation moyenne mensuelle a été prise comme le prix d'exercice du sous-jacent de notre contrat swap climatique. En se référant à plusieurs travaux l'estimation de ce prix a été effectuée en utilisant le modèle GARCH (Regnard et Zakoïan, 2011 ; Keles et al. 2012). En se basant sur Table 5, nous avons retenu le processus GARCH(1.2) qui minimise les critères AIC, SC, LL et dont les coefficients sont positifs.

TABLE 5

CRITERES DE SELECTION DU MODELE DE LA CONSOMMATION MOYENNE MENSUELLE

Modèle	CONSSFAX			
	AIC	SC	LL	Contrainte de positivité
ARCH(1)	10.224	10.420	-180.135	Non respect
ARCH(2)	10.226	10.415	-180.076	Non respect
GARCH(1.1)	10.198	10.325	-178.689	respect
GARCH(1.2)	10.195	10.306	-178.509	respect

Les résultats de la prévision de la production et la consommation moyenne mensuelle sont reportés dans Table 6.

TABLE 6

RESULTATS DE LA PREVISION DE LA PRODUCTION ET LA CONSOMMATION MOYENNE MENSUELLE EN KWH (2015-2017)

Mois	Production prévisionnelle			Consommation prévisionnelle		
	2012	2013	2014	2012	2013	2014
Janv	143.102	146.631	162.284	210.841	208.353	202.905
Fév	169.137	178.866	174.176	228.137	226.595	222.451
Mars	188.887	192.699	172.319	189.670	176.568	174.466
Avr	188.786	201.625	191.608	144.177	154.799	154.080
Mai	218.868	208.545	192.185	215.492	223.551	220.775
Juin	256.528	247.899	234.947	208.560	200.833	203.541
Juil	236.930	227.493	245.458	224.381	225.229	228.135
Août	266.717	271.559	256.610	137.310	144.782	161.399
Sept	178.238	172.129	199.410	146.076	148.679	149.841
Oct	171.727	157.251	154.137	114.042	123.711	124.510
Nov	160.267	148.394	143.438	172.831	171.810	162.703
Déc	141.046	137.110	140.935	209.672	212.449	208.211

Swap prévisionnel

En se référant à la formule théorique du swap (Equation 34), Table 7, nous donne les valeurs prévisionnelles des swaps

échangés entre la STEG et ses clients installés dans la région de Sfax pour chaque échéance.

TABLE 7

VALEURS PREVISIONNELLES DES SWAPS POUR LES DIFFERENTES MATURITES

Valeurs	
Echéance	Sfax
2015	16586.975
2016	21809.142
2017	30050.908

Pour comparer les résultats de l'évaluation de notre swap climatique, nous commençons d'abord par calculer dans Table 8 les valeurs du swap en se basant sur les valeurs réelles de la consommation, la production, la température et l'ensoleillement. Après cela, nous allons calculer dans Table 9 les taux de variation (erreur relative) entre les valeurs prévisionnelles de swap et celles réelles et ce pour les trois maturités.

TABLE 8

VALEURS REELLES DES SWAPS POUR LES DIFFERENTES MATURITES

Valeurs du swap	
Echéance	Sfax
2015	19824.110
2016	28912.165
2017	34231.258

TABLE 9

ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DES VALEURS PREVISIONNELLES ET REELLES DES SWAPS POUR LES DIFFERENTS MATURITES

Erreur quadratique moyenne	
Echéance	Sfax
2015	0.164
2016	0.223
2017	0.421

D'un point de vue empirique, nous trouvons qu'un swap de production d'énergie photovoltaïque de maturité de 2 ans (2015,2016) donne lieu à de plus faibles erreurs relatives par rapport à d'autres échéances. Une explication à cela pourrait être que, pour une durée d'un an (2017), le modèle n'est pas encore très stable. Par ailleurs, pour une maturité de 3 ans, le modèle perd de son efficacité et ne prendrait plus en considération des changements inattendus causés par le réchauffement climatique telles que, par exemple, les vagues de chaleur, les canicules de la chaleur et de l'humidité accablantes. D'un autre côté, nous remarquons que, sur les périodes 2012-2014 et 2015-2017, les formes des séries chronologiques des variables météorologiques, de la production et de la consommation moyenne mensuelle restent stables. Cette stabilité est de nature à permettre de définir un contrat standard et elle engendre une stabilité au niveau des cash-flow récoltés par la STEG.

- [16] A. D. Jones and C. P. Underwood, "A Modelling Method for building - integrated Photovoltaic Power supply", *Building Services Engineering Research and technology*, vol. 23, pp. 167-177, 3, 2000.

IV. CONCLUSIONS

A défaut d'un marché des dérivés climatiques en Tunisie, la gestion des risques climatiques n'est pas encore envisageable mais elle ne va probablement plus tarder à le devenir. Pour cette raison, ce papier a étudié l'introduction de ce type de produits sur le marché financier tunisien. En effet, l'application d'un système de prévision météorologique dans la construction des dérivés climatiques devrait permettre de réduire la variabilité des revenus pour les deux parties. Vu son climat ensoleillé, la transformation de l'énergie solaire en électricité grâce à des panneaux photovoltaïques ne cesse de prendre de l'ampleur. En plus, le type de paiement des factures a pour effet de freiner l'investissement dans ce domaine avec toutes les conséquences qui en découle car la STEG ne paye pas l'excédent et le client n'a pas intérêt de produire plus que ses besoins. C'est pourquoi l'étude d'un swap climatique en Tunisie est devenu presque indispensable vu la fragilité du secteur énergétique de l'électricité et les avantages qu'apportent ce type de contrat dans une économie en développement.

REFERENCES

- [1] A. K. Alexandridis and A. D. Zapranis, *Weather derivatives, Modeling and pricing weather-related risk*: Springer, 2013.
- [2] O. Machek and J. Špička, "Measuring Performance Growth of Agricultural Sector: A Total Factor Productivity Approach", *International Journal of Economics and Statistics*, vol. 1, pp. 200-208, 4, 2013.
- [3] F. E. Benth, N. Lange, and T. A. Myklebust, "Pricing and Hedging Quanto Options in Energy Markets", *Working paper*, SSRN, 2012.
- [4] F. Pérez-Gonzalez and H. Yun, "Risk Management and Firm Value: Evidence from Weather Derivatives", *Journal of Finance*, vol. 68, pp. 2143-2176, 2013.
- [5] M. Bank and R. Wiesner, "Determinants of weather derivatives usage in the Austrian winter tourism industry", *Tourism Management*, vol. 32, pp. 62-68, 1, 2011.
- [6] R. S. Dischel, "Climate Risk and the weather derivatives : Financial risk management with weather hedges", Risk Waters Group, 2002.
- [7] H. Geman, "Insurance and weather derivatives : from exotic options to exotic underlyings", *Risk Book*, 1999.
- [8] PwC, "Weather risk derivative survey. Rapport technique, Weather Risk Management Association, WRMA", 2011.
- [9] R. Carmona, "Calibrating degree day options. In 3rd seminar on stochastic analysis, random field and applications", Ecole Polytechnique de Lausanne, Switzerland, 1999.
- [10] M. Moreno, "Riding the temp. Futures and Options World", *Weather Derivatives Special Supplement*, 2000.
- [11] M. Cao and J. Wei, "Pricing the weather. Energy Power Risk Management", *Risk Weather Special Report*, pp. 67-70, 2000.
- [12] O. Roustant, "Produits Dérivés Climatiques : Aspects Économétriques et Financiers". Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard -Lyon 1, 2003.
- [13] S. D. Campbell and F-X. Diebold, "Weather forecasting for deather derivatives", *Journal of the American Statistical Association*, vol. 100, pp. 6-16, 2005.
- [14] R. Caballero, S. Jewson, and A. Brix, "Long memory in surface air temperature : Detection, modelling and application to weather derivative valuation", *Climate Research*, vol. 21, pp. 127-140, 2002.
- [15] P. Alaton, B. Djehiche, and D. Stillberger, "On modelling and pricing weather derivatives", *Applied Mathematical Finance*, vol. 9, pp. 1-20, 2002.

