

# **Modules : Energies renouvelables et non renouvelables**

## **Etude de cas 1**

**Analyse économique d'un projet de production  
d'électricité photovoltaïque sur réseau.**

Sous la direction de

Adrian ILINCA

et

Cécile ROBIN

## SOMMAIRE

### Consignes

1) Calcul de l'éclairement énergétique annuel total dans le plan des modules	page 3
2) Calcul de la productivité énergétique annuelle Ea25	page 4
3) Calculer les ratios et données caractéristiques du projet pour son analyse de rentabilité économique	page 5
4) Calculer le prix de revient CGA du kWh produit	page 7
5) Calcul des paramètres de rentabilité	page 8
6) Etude de sensibilité	page 9
Annexe : Feuille de calcul PVGIS (avec une inclinaison de 25°)	page 10
Annexe : Feuille de calcul PVGIS (avec une inclinaison optimale de 37°)	page 11

# Consignes

L'objectif de cette application est de réaliser **une analyse économique d'un projet de production d'électricité photovoltaïque sur réseau**.

Cet exercice évalué compte pour **50 %** de l'évaluation totale du module. Le temps proposé pour réaliser cet exercice est de 3 heures. Votre production est à envoyer au tuteur.

## Enoncé

Un maître d'ouvrage privé veut faire une opération ponctuelle d'installation d'un système photovoltaïque relié au réseau à un bâtiment commercial à Montélimar (France) qui présente les caractéristiques suivantes :

- Puissance crête nominale :  $P_c = 10$  kW (somme des puissances crêtes des modules photovoltaïques installés). Technologie des modules : 25 degrés par rapport à l'horizontale, face au sud.
- Projet sans crédit d'impôt ni subventions mais éligible au tarif « PV intégré au bâtiment »  $TV = 0,55$  c€/kWh garanti dans le contrat d'achat sur 20 ans (on négligera en première approche l'effet de l'inflation et de l'indexation du tarif à l'intérieur du contrat d'achat de l'électricité)
- Le coût d'investissement initial total est de 60 000 € et le maître d'ouvrage (qui assurera lui même l'exploitation) a prévu un budget prévisionnel global de 1 200 €/an pour l'exploitation, l'entretien-maintenance et les provisions pour grosses réparations.
- Le coût moyen pondéré des ressources en capital pour ce projet (CMPRC) est de 6 % réel. 1).

**1). Calcul de l'éclairement énergétique annuel total dans le plan des modules (3 points)** (terme anglais: "annual in plane total solar irradiation") Eia25 en se reportant au site internet suivant : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=fr&map=europe>

- Déterminer la valeur de Eia25 demandée ici en explicitant son unité.
- Déterminer la valeur optimale (maximale) Eiaopt si l'on avait pu être libre de l'inclinaison des modules, toujours orientés "plein sud" et l'angle d'inclinaison correspondant.
- Calculer la différence en % de Eia25 par rapport à Eiaopt. Quelle conclusion en tirez vous ?

**2). Calcul de la productivité énergétique annuelle Ea25 (4 points)**, toujours en se reportant à la rubrique du site ci dessus puis à la rubrique "Applications" en choisissant "PV estimation" avec les paramètres correspondant au projet et avec une estimation des pertes systèmes de 14 %.

- Quelle est la valeur de Ea25 (préciser son unité) ?
- En déduire la valeur du "coefficient de performance" ("performance ratio") qui sous-tend le calcul de Ea par la formule:  $Ea_{25} = K_p * Eia_{25} * S$  où  $K_p$  est le coefficient de performance et  $S$  est la surface du panneau.

**3). Calculer les ratios et données caractéristiques du projet pour son analyse de rentabilité économique (4 points)**

- $N_h$  = Productivité en heures de fonctionnement équivalentes à puissance nominale.
- $I_u$  = Coût d'investissement au kW.
- $K_{em}$  = Ratio de coût annuel d'exploitation et d'entretien-maintenance.
- Indiquez et justifiez votre choix des paramètres d'actualisation (taux d'actualisation réel  $t$ , durée d'observation économique  $N$ ) et en déduire la valeur du coefficient  $K_a(t, N)$ .

**4). Calculer le prix de revient CGA du kWh produit (3 points)**

- Comment se compare-t-il avec le tarif d'achat et que pouvez vous déjà en déduire quant à la rentabilité de l'opération ?

**5). Calcul des paramètres de rentabilité (2 points)**

- Calculer le TEC (taux d'enrichissement en capital du projet). Qu'en déduisez vous quant à la rentabilité du projet ?
- Calculer la valeur actuelle nette du projet VAN. Qu'en déduisez vous ?

**6). Etude de sensibilité (2 points)**

- Quel devrait être le ratio de coût d'investissement maximal  $I_{u_{max}}$  (toutes autres choses égales par ailleurs) pour que le TEC cible de l'opération soit égal à 0,2 ?
- Pensez vous que cette valeur puisse être obtenue, et si oui à quelles conditions et à quel horizon temporel ?

**Recommandations** Les calculs feront l'objet d'un minimum de détails (raisonnement, formules utilisées, hypothèses, analyse des résultats)

# 1) Calcul de l'éclairage énergétique annuel total dans le plan des modules

*Déterminer la valeur de Eia25 demandée ici en explicitant son unité.*

*Déterminer la valeur optimale (maximale) Eiaopt si l'on avait pu être libre de l'inclinaison des modules, toujours orientés "plein sud" et l'angle d'inclinaison correspondant.*

*Calculer la différence en % de Eia25 par rapport à Eiaopt. Quelle conclusion en tirez vous ?*

Pour trouver la valeur de l'éclairage énergétique annuel, nous avons utilisé PVGIS via le site de l'union européenne<sup>1</sup>. Après avoir entré les données relatives au calcul de Eia25<sup>2</sup>, nous avons trouvé : Eia25 = 1820 kWh/m<sup>2</sup>.

Cette valeur correspond à une inclinaison du panneau solaire de 25°. Cependant, si l'on se concentre uniquement sur l'inclinaison du panneau, celle-ci ne permet pas d'obtenir une valeur optimale de l'éclairage énergétique annuel. En effet, après calcul, la valeur de Eiaopt<sup>3</sup> est de 1850 kWh/m<sup>2</sup> pour une inclinaison de 37°.

La différence Eia25 et Eiaopt est de 30 kWh/m<sup>2</sup>. En considérant que l'Eiaopt corresponde à 100% de l'éclairage énergétique annuel total et en utilisant la règle de proportionnalité, on trouve alors une différence de 1,6% entre Eia25 et Eiaopt (Eia25 = 98,4 %) <sup>4</sup>.

On peut donc en conclure que l'inclinaison des panneaux solaires est une composante essentielle de leur installation. Une étude préalable est vivement encouragée dans la réalisation du projet.

L'installateur tout comme l'utilisateur doivent être conscients de cette exigence et prendre en considération les contraintes liées à l'installation. Par exemple, si les panneaux sont intégrés au bâtiment, ils peuvent être difficiles à orienter et incliner convenablement pour obtenir un éclairage énergétique annuel optimal.

L'installation des panneaux peut alors nécessiter l'utilisation d'un support afin d'obtenir un angle adéquat ou tout du moins s'en approcher.

---

1 <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=fr&map=europe>

2 Cf Annexe page 10.

3 Cf Annexe page 11.

4 Par soucis de clarté, nous avons arrondi les valeurs précédentes en essayant de rester le plus proche possible des valeurs de base. Cette opération sera renouvelée par la suite dans notre travail

## 2) Calcul de la productivité énergétique annuelle Ea25

*Quelle est la valeur de Ea25 (préciser son unité) ?*

*En déduire la valeur du "coefficient de performance" ("performance ratio") qui sous-tend le calcul de Ea par la formule:  $Ea25 = Kp * Eia25 * S$  où Kp est le coefficient de performance et S est la surface du panneau.*

Sur notre feuille de calcul réalisée par PVGIS et disponible en annexe, nous avons trouvé une valeur de 12900 kWh pour la productivité énergétique annuelle ( $Ea25 = 12900$  kWh).

Afin d'aller plus loin, nous allons à présent définir la valeur du coefficient de performance que l'on nommera Kp.

$Kp = 1$  – le pourcentage des pertes globales

Les pertes globales estimées dans notre feuille de calcul sont de 28,5% (= 0,285), on trouve alors :

$$Kp = 1 - 0,285$$

$$Kp = 0,715$$

Nos précédentes valeurs peuvent à présent nous permettre de trouver la surface "S" du panneau solaire équipé en utilisant la formule suivante :  $Ea25 = Kp * Eia25 * S$

La surface se calcule donc ainsi :

$$S = Ea25 / (Kp * Eia25)$$

$$S = 12900 / (0,715 * 1820)$$

$$S = 12900 / 1301,3$$

$$S = 9,9 \text{ m}^2$$

La surface du système photovoltaïque est donc d'environ 10 m<sup>2</sup>

### 3) Calculer les ratios et données caractéristiques du projet pour son analyse de rentabilité économique

$N_h$  = Productivité en heures de fonctionnement équivalentes à puissance nominale.

$I_u$  = Coût d'investissement au kW.

$K_{em}$  = Ratio de coût annuel d'exploitation et d'entretien-maintenance.

Indiquez et justifiez votre choix des paramètres d'actualisation (taux d'actualisation réel  $t$ , durée d'observation économique  $N$ ) et en déduire la valeur du coefficient  $K_a(t,N)$ .

Nous allons à présent nous pencher sur les valeurs nécessaires pour estimer la rentabilité économique de ce projet.

Premièrement, nous avons besoin de calculer la productivité en heures de fonctionnement équivalentes à puissance nominale ( $N_h$ ).

$N_h$  = productivité énergétique annuelle / la puissance crête nominale

$$N_h = E_{a25} / P_c$$

$$N_h = 12900 / 10$$

$$N_h = 1290$$

La productivité en heures de fonctionnement équivalentes à puissance nominale est donc de 1290 heures par an.

Deuxièmement, le coût d'investissement rapporté aux kilowatts installés ( $I_u$ ).

$I_u = I/P$  où  $I$  représente l'investissement initial (60 000 €) et  $P$  la puissance installée (10 kW)

$$I_u = 60000 / 10$$

$$I_u = 6000 \text{ €/kW}$$

Ensuite, le ratio de coût annuel d'exploitation et d'entretien-maintenance ( $K_{em}$ ) rapporté à l'investissement initial nous intéresse aussi :

$$K_{em} = Dem / I$$

Dem = dépense moyenne d'exploitation et d'entretien-maintenance (1 200 € / an)

I = investissement initial (60 000 €)

$$K_{em} = 1200 / 60000$$

$$K_{em} = 0,02$$

Le ratio de coût annuel d'exploitation et d'entretien-maintenance est de 2% par an

Enfin, pour les calculs suivants, nous avons choisi comme taux d'actualisation "t" le « coût moyen pondéré des ressources en capital avant impôts » (CMPRC). Pour calculer un « prix de revient », il est vivement recommandé de prendre comme taux d'actualisation le CMPRC. Le coût moyen pondéré des ressources en capital avant impôt étant de 6 %, notre valeur "t" sera donc égale à 0,06.

En ce qui concerne la valeur "N" correspondant à la durée d'observation, nous avons décidé de la faire concorder avec la durée du contrat d'achat c'est-à-dire 20 ans.

Pour finir, le coefficient  $K_a$ , que nous allons utiliser par la suite, se calcule ainsi :

$$K_a = t / (1 - (1 + t)^{-N})$$

$$K_a = t / (1 - (1 + t)^{-20})$$

$$K_a = 0,06 / (1 - (1 + 0,06)^{-20})$$

$$K_a = 0,06 / (1 - 1,06^{-20})$$

$$K_a = 0,06 / (1 - 0,312)$$

$$K_a = 0,06 / 0,688$$

$$K_a = 0,09$$

#### 4) Calculer le prix de revient CGA du kWh produit

*Comment se compare-t-il avec le tarif d'achat et que pouvez vous déjà en déduire quant à la rentabilité de l'opération ?*

Tout d'abord, définissons ce qu'est le coût global actualisé (CGA). L'institut national de l'énergie solaire nous propose cette définition :

*"Le coût global actualisé est la somme ramenée à l'année 0 de l'investissement et de toutes les dépenses futures pendant la durée de vie prévisionnelle de l'équipement étudié. Il est basé sur la notion d'actualisation, qui considère qu'un euro dépensé dans le futur à moins de "valeur" qu'un euro dépensé aujourd'hui. Cette préférence pour le présent est prise en compte dans le taux d'actualisation. Le choix de la valeur de ce paramètre est assez délicat, et la sensibilité du résultat à la valeur choisie est importante."<sup>5</sup>*

Le coût global actualisé va donc nous permettre de calculer la rentabilité ou tout du moins la viabilité du projet. Il se calcule de la manière suivante :

$$\text{CGA} = (I + (\text{Dem}/\text{Ka})) / (\text{Ea}/\text{Ka})$$

$$\text{CGA} = (60000 \text{ €} + (1200 \text{ €/an} / 0,09)) / (12900 \text{ kWh/an} / 0,09)$$

$$\text{CGA} = (60000 + 13333,33) / 143333,33$$

$$\text{CGA} = 73333,33 / 143333,33$$

$$\text{CGA} = 0,5 \text{ €/kWh}$$

Le coût global actualisé est d'environ 50 centimes d'euro par kilowatt-heure. Le tarif d'achat étant fixé à 55 centimes d'euro le kilowatt-heure, on peut en déduire que le projet est économiquement viable.

---

<sup>5</sup> <http://ines.solaire.free.fr/solth/page147.html>



## 5) Calcul des paramètres de rentabilité

Calculer le TEC (taux d'enrichissement en capital du projet). Qu'en déduisez vous quant à la rentabilité du projet ?

Calculer la valeur actuelle nette du projet VAN. Qu'en déduisez vous ?

Le taux d'enrichissement en capital (TEC), qui caractérise l'enrichissement généré par euro investi, va nous permettre de pousser notre étude de rentabilité du projet un peu plus loin.

$$\text{TEC} = (\text{Nh}/(\text{Ka} \cdot \text{Iu})) * \text{TV} - (1 + (\text{Kem}/\text{Ka}))$$

$$\text{TEC} = (1290/(0,09 \cdot 6000)) * 0,55 - (1 + (0,02 / 0,09))$$

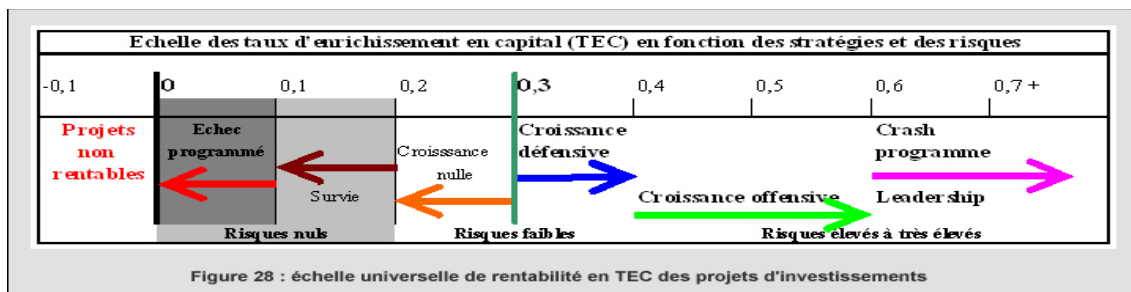
$$\text{TEC} = (1290 / 540) * 0,55 - (1 + 0,222)$$

$$\text{TEC} = 2,389 * 0,55 - 1,222$$

$$\text{TEC} = 1,314 - 1,222$$

$$\text{TEC} = 0,092$$

L'indice d'enrichissement en capital de notre projet est d'environ 0,1. Ce qui nous donne un taux de 10%.



Selon l'échelle universelle de rentabilité en TEC des projets d'investissements, on remarque que notre projet n'est économiquement pas intéressant car son indice se situe sous la barre de 0,3 qui garantit la viabilité d'un projet.

La valeur actuelle nette (somme des cash-flows annuel, que l'on trouve après soustraction de toutes les dépenses annuelles aux bénéfices) va nous permettre d'avoir une autre approche de la rentabilité de notre projet.

$$\text{VAN} = \text{TEC} \cdot \text{I}$$

$$\text{VAN} = 0,1 \cdot 60000$$

$$\text{VAN} = 6000$$

La valeur nette actualisée de notre projet est de 6000€. Cette valeur étant positive, notre projet est donc rentable mais selon le TEC, celui-ci n'est pas assez rentable.

## 6) Etude de sensibilité

*Quel devrait être le ratio de coût d'investissement maximal  $I_{\max}$  (toutes autres choses égales par ailleurs) pour que le TEC cible de l'opération soit égal à 0,2 ?*

*Pensez vous que cette valeur puisse être obtenue, et si oui à quelles conditions et à quel horizon temporel ?*

Pour obtenir un indice d'enrichissement en capital égal à 0,2, il nous faudrait un investissement par kilowatt inférieur à celui que nous avons actuellement (6000 €/kW).

$$\text{TEC} = (\text{Nh}/(\text{Ka} \cdot \text{Iu})) * \text{TV} - (1 + (\text{Kem}/\text{Ka}))$$

$$0,2 = (1290/(0,09 \cdot \text{I}_{\max})) * 0,55 - (1 + (0,02 / 0,09))$$

$$0,2 = ((1290 \cdot 0,55) / 0,09 \cdot \text{I}_{\max}) - (1 + 0,222)$$

$$0,2 = 709,5 / (0,09 \cdot \text{I}_{\max}) - 1,222$$

$$709,5 / 0,09 \cdot \text{I}_{\max} = 0,2 + 1,222$$

$$709,5 / 0,09 \cdot \text{I}_{\max} = 1,422$$

$$0,09 \cdot \text{I}_{\max} = 709,5 / 1,422$$

$$0,09 \cdot \text{I}_{\max} = 498,945$$

$$\text{I}_{\max} = 498,945 / 0,09$$

$$\text{I}_{\max} = 5543,835$$

Pour que l'indice d'enrichissement (TEC) soit de 0,2, il faudrait que le coût d'investissement par kilowatt installé soit de 5544 €

Le taux d'enrichissement en capital du projet est actuellement 10% par an. Répartit sur les 20 années d'exploitation, le projet rapporte en tout 120 000 €.

Pour que le projet rapporte 20% par an sur l'investissement initial, il faudrait doubler le temps d'exploitation du parc. Cependant, il est possible que les panneaux nécessitent des dépenses d'équipement et de maintenance plus importantes avec le temps, voire des frais de démantèlement et renouvellement. Ces frais viendraient alors fragiliser l'objectif de 20%.

## Annexe : Feuille de calcul PVGIS (avec une inclinaison de 25°)

### Performance du système PV connecté au réseau

#### PVGIS estimation de la production d'électricité solaire

Site: 44°32'48" Nord, 4°45'20" Est, Élévation: 93 m.s.n.m,

Base de données de radiation solaire employée: PVGIS-CMSAF

Puissance nominale du système PV: 10.0 kW (silicium cristallin)

Pertes estimées à cause de la température et des niveaux faibles de rayonnement: 14.4%

Pertes estimées à cause des effets de la réflectance angulaire: 2.8%

D'autres pertes (câble, onduleur, etc.): 14.0%

Pertes conjuguées du système PV: 28.5%

Système fixe: inclinaison=25 deg., orientation=0 deg.				
Mois	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	19.50	605	2.49	77.2
Fev	29.30	821	3.82	107
Mar	39.90	1240	5.39	167
Avr	41.50	1250	5.80	174
Mai	44.80	1390	6.43	199
Juin	47.60	1430	7.04	211
Jui	49.20	1530	7.33	227
Aug	45.60	1410	6.73	209
Sep	40.50	1210	5.77	173
Oct	29.80	924	4.08	126
Nov	20.30	610	2.68	80.3
Dec	17.30	538	2.21	68.6
Année	35.50	1080	4.99	152
Total pour l'année		12900		1820

Ed: Production d'électricité journalière moyenne par le système défini (kWh)

Em: Production d'électricité mensuelle moyenne par le système défini (kWh)

Hd: Moyenne journalière de la somme de l'irradiation globale par mètre carré reçue par les modules du système défini (kWh/m<sup>2</sup>)

Hm: Somme moyenne de l'irradiation globale par mètre carré reçue par les modules du système défini (kWh/m<sup>2</sup>)

## Annexe : Feuille de calcul PVGIS (avec une inclinaison optimale de 37°)



### Système d'information géographique photovoltaïque

European Commission  
Joint Research Centre  
Ispra, Italy

## Performance du système PV connecté au réseau

### PVGIS estimation de la production d'électricité solaire

Site: 44°33'20" Nord, 4°45'0" Est, Élévation: 85 m.s.n.m,

Base de données de radiation solaire employée: PVGIS-CMSAF

Puissance nominale du système PV: 10.0 kW (silicium cristallin)

Pertes estimées à cause de la température et des niveaux faibles de rayonnement: 14.8%

Pertes estimées à cause des effets de la réflectance angulaire: 2.6%

D'autres pertes (câble, onduleur, etc.): 14.0%

Pertes conjuguées du système PV: 28.6%

Système fixe: inclinaison=37 deg., orientation=0 deg. (Optimal à l'orientation donnée)				
Mois	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	21.80	676	2.80	86.9
Fev	31.90	893	4.19	117
Mar	41.60	1290	5.66	175
Avr	41.40	1240	5.80	174
Mai	43.10	1340	6.20	192
Juin	45.10	1350	6.66	200
Jui	46.90	1450	6.99	217
Aug	44.90	1390	6.64	206
Sep	41.60	1250	5.97	179
Oct	31.80	986	4.39	136
Nov	22.50	675	2.99	89.8
Dec	19.50	606	2.52	78.0
Année	38.00	1100	5.07	154
Total pour l'année		13200		1850

Ed: Production d'électricité journalière moyenne par le système défini (kWh)

Em: Production d'électricité mensuelle moyenne par le système défini (kWh)

Hd: Moyenne journalière de la somme de l'irradiation globale par mètre carré reçue par les modules du système défini (kWh/m<sup>2</sup>)

Hm: Somme moyenne de l'irradiation globale par mètre carré reçue par les modules du système défini (kWh/m<sup>2</sup>)