

Evaluation carbone simplifiée

Référence du module évalué

AFP-60-250-PWT

Fabricant

Altius Fotovoltaic

Date	Révision	Objet	Diffusion
04/02/2016	V1.0	Création	
		Rédaction : Nicolas PLANCHENault Approbation : Guillaume DAVID	
	V2.0	Rédaction : Approbation :	
	V3.0	Rédaction : Approbation :	

Annexes associées
- DGEC-ADEME_Calcul CEDij Wacker ACV_20150320_v1.0

Certification ISO 9001-2008 FR12/01064

Certification ISO 14001-2004



SOLSTYCE SAS

Ingénierie solaire photovoltaïque moyenne et grande puissance

Adresse 8, rue Carnot, 93100 Montreuil

Téléphone : 01 83 62 13 27

Fax : 01 83 62 13 47

Email : contact@solstyce.fr

SOMMAIRE

I.	Introduction.....	3
II.	Synthèse de l'étude.....	4
III.	Rappels méthodologiques.....	7
	A. Principe de l'Evaluation Carbone Simplifiée.....	7
	B. Formule de calcul	8
	C. Détail des composants et processus industriel entrant dans l'évaluation.....	9
IV.	Inventaire	10
	A. Préambule	10
	B. Rappel du module évalué.....	10
	C. Inventaire des composants	11
	D. Identification des sites de production.....	12
V.	Purification du silicium	13
	A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc	13
	B. Evaluation pour le site 1	13
	A. Evaluation pour le site 2	14
	B. Evaluation pour le site 3	15
VI.	Lingots et wafers	17
	A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc	17
	B. Evaluation pour le site 1	17
VII.	Cellules photovoltaïques.....	19
	A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc	19
	B. Evaluation pour le site 1	19
VIII.	Verre	21
	A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc	21
	B. Evaluation pour le site 1	21
	C. Evaluation pour le site 2	22
IX.	EVA.....	24
	A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc	24
	B. Evaluation pour le site 1	24
	C. Evaluation pour le site 2	25
X.	PET.....	27
	A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc	27
	B. Evaluation pour le site 1	27
	C. Evaluation pour le site 2	28
XI.	Assemblage du module photovoltaïque	30
	A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc	30
	B. Evaluation pour le site 1	30
	Glossaire.....	32

I. INTRODUCTION

Solstyce, bureau d'études et société d'ingénierie, spécialisé en photovoltaïque, a été mandaté par ORAVIA pour réaliser l'évaluation carbone simplifiée du module AFP-60-250-PWT fabriqué par la société Altius Photovoltaic.

Cette évaluation est réalisée conformément à la méthodologie définie par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) dans les documents suivant :

« Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire d'une puissance supérieure à 250 kWc » (2013)

« Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations photovoltaïques sur bâtiment de puissance crête comprise entre 100 et 250 kW » (2013)

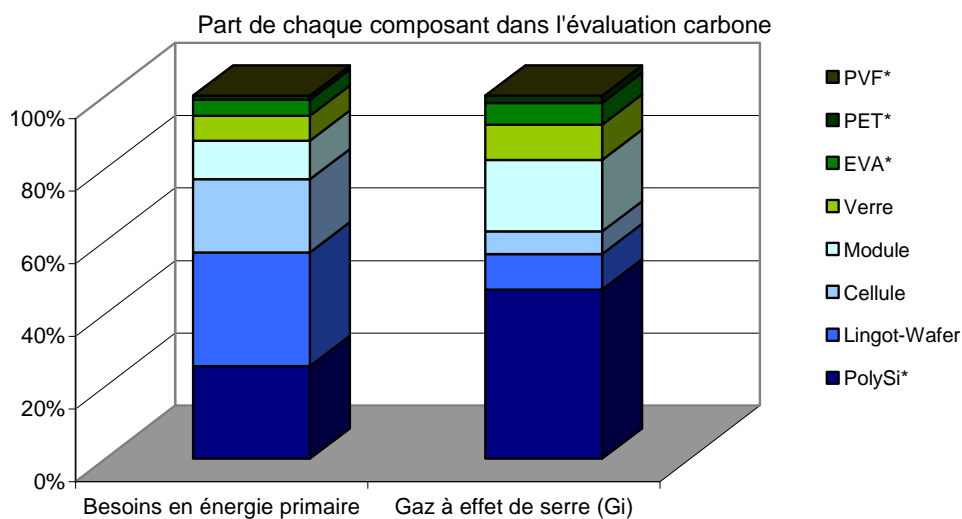
et en particulier dans leur Annexe 4 (modèle et méthodologie de l'Évaluation carbone simplifiée).

II. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE

La fabrication du laminé photovoltaïque AFP-60-250-PWT d'une puissance de 260 Wc, fabriqué par la société Altius Fotovoltaic, émet **282.1 kgCO₂* par kWc***.

$$G = 282.1 \text{ kgCO}_2 / \text{kWc}$$

Composants	Unité	Quantité pour 1 kWc	Besoins en énergie primaire Mjep*	Gaz à effet de serre (Gi) kg CO ₂ *
PolySi*	kg	2.62	3 321.6	131.5
Lingot-Wafer	wafer	231	4 071.0	27.5
Cellule	cellule	231	2 620.0	17.7
Module	m ²	6.19	1 386.7	55.6
Verre	kg	49.52	898.5	27.3
EVA*	kg	5.62	569.0	17.0
PET*	kg	1.61	139.0	5.6
PVF*	kg	0.00	0.0	0.0
TOTAL			13 006	282.1



* voir glossaire en fin de rapport

Tableau de synthèse des résultats pour l'ensemble des modules de la série AFP-60-250-PWT.

Ces valeurs ont été calculées d'après les résultats obtenus sur le module de référence.

Composant	235 Wc		240 Wc		245 Wc		250 Wc	
	Quantité par kWc	Gi kgCO2/kWc	Quantité par kWc	Gi kgCO2/kWc	Quantité par kWc	Gi kgCO2/kWc	Quantité par kWc	Gi kgCO2/kWc
PolySi	2.89	145.5	2.83	142.5	2.78	139.6	2.72	136.8
Lingot-Wafer	255	30.4	250	29.8	245	29.2	240	28.6
Cellule	255	19.6	250	19.2	245	18.8	240	18.4
Module	6.85	61.5	6.71	60.2	6.57	59.0	6.44	57.8
Verre	54.79	30.2	53.65	29.5	52.56	28.9	51.50	28.3
EVA	6.22	18.8	6.09	18.4	5.97	18.0	5.85	17.6
PET	1.78	6.2	1.75	6.1	1.71	5.9	1.68	5.8
PVF	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
TOTAL		312.1		305.6		299.4		293.4

Composant	255 Wc		260 Wc		265 Wc		270 Wc		275 Wc	
	Quantité par kWc	Gi kgCO2/kWc	Quantité par kWc	Gi kgCO2/kWc	Quantité par kWc	Gi kgCO2/kWc	Quantité par kWc	Gi kgCO2/kWc	Quantité par kWc	Gi kgCO2/kWc
PolySi	2.67	134.1	2.62	131.5	2.57	129.1	2.52	126.7	2.47	124.4
Lingot-Wafer	235	28.0	231	27.5	226	27.0	222	26.5	218	26.0
Cellule	235	18.0	231	17.7	226	17.3	222	17.0	218	16.7
Module	6.31	56.7	6.19	55.6	6.07	54.6	5.96	53.5	5.85	52.6
Verre	50.49	27.8	49.52	27.3	48.59	26.7	47.69	26.2	46.82	25.8
EVA	5.73	17.3	5.62	17.0	5.52	16.6	5.41	16.3	5.31	16.0
PET	1.64	5.7	1.61	5.6	1.58	5.5	1.55	5.4	1.52	5.3
PVF	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
TOTAL		287.6		282.1		276.8		271.6		266.7

Tableau de synthèse tel qu'exigé par la Commission de régulation de l'Energie et conforme à l'annexe 4 des cahiers des charges :

	Quantification de chaque composant pour 1 kWc de puissance	Référence type du composant	Site(s) de fabrication	Pays de fabrication	Coefficients de répartition des sources d'approvisionnement sur les différents sites de fabrication	Valeurs de CEDij unitaire
PolySi	2.616 kg	SoG-Si	Burghausen	Allemagne	80%	958.5 MJ/kg
			/	Corée	10%	2461.7 MJ/kg
			/	USA	10%	2568.1 MJ/kg
Lingot-Wafer	231 wafers	multi-Si wafer	Bourgoin-Jallieu (38)	France	100%	17.64 MJ/wafer
Cellule	231 wafers	multi-Si cell	Bourgoin-Jallieu (38)	France	100%	11.35 MJ/cellule
Module	6.19 m ²	AFP-60-250-PWT	Giurgiu	Roumanie	100%	224 MJ/m ²
Verre	49.523 kg	Solar glass 3.2mm	Lommel	Belgique	50%	18.14 MJ/kg
			Ruggell	Allemagne	50%	18.14 MJ/kg
EVA	5.621 kg	SOLARCAP NovoVellum Optima HFT01	A Coruña	Espagne	90%	101.2 MJ/kg
			Puurs	Belgique	10%	101.2 MJ/kg
PET	1.611 kg	AKALIGHT ECS dyMat PYE SPV	Vaihingen	Allemagne	50%	86.3 MJ/kg
			Gorizia	Italie	50%	86.27 MJ/kg
PVF	0 kg	NA	NA	NA	0%	0.00 MJ/kg

III. RAPPELS METHODOLOGIQUES

A. Principe de l'Évaluation Carbone Simplifiée

L'évaluation carbone simplifiée vise à calculer les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication du laminé photovoltaïque (module hors cadre), selon le modèle et la méthodologie précisés en annexe 4 du *Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire d'une puissance supérieure à 250 kWc* et du *Cahier des charges de l'appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations photovoltaïques sur bâtiment de puissance crête comprise entre 100 et 250 kW*.

Cette évaluation intègre toutes les étapes de fabrication du laminé photovoltaïque, de l'extraction des matières premières jusqu'à l'encapsulation des cellules.

Périmètre de l'Évaluation Carbone Simplifié



B. Formule de calcul

La quantité de gaz à effet de serre par kWc* (G) est définie selon la formule suivante :

$$G = \sum_{\text{composants } i \text{ du laminé}} G_i = \sum_{\text{composants } i \text{ du laminé}} Q_i \times \left(\sum_{\text{sites } j \text{ de fabrication du composant}} x_{ij} \times \text{CED}_{ij} \text{ unitaire} \times \text{EM}_j / F_j \right)$$

Où :

- G, exprimé en kg-eq CO₂* par kWc, représente la quantité de gaz à effet de serre émise lors de la fabrication d'1 kWc de module,
- G_i, exprimé en kg-eq CO₂* par kWc, représente la valeur d'émission de gaz à effet de serre de du composant i du module rapportée à 1 kWc,
- Q_i représente la quantité du composant i contenue dans un kWc de module photovoltaïque
- x_{ij} représente la fraction de répartition des sites j de fabrication du composant i
- CED_{ij} unitaire, exprimé en MJ d'énergie primaire* par unité de quantification du composant, représente la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication du composant i par unité de quantification du composant (par exemple le m² pour le module) dans le site de fabrication j
- EM_j, exprimé en gramme équivalent CO₂ par kWh électrique, représente le contenu CO₂ de l'électricité du pays de fabrication j du composant i
- F_j, exprimé en MJ d'énergie primaire par kWh électrique représente la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité par pays

Dans la suite de l'étude, on évalue pour chaque composant la valeur G_i, selon la formule suivante :

$$G_i = Q_i \times \left(\sum_{\text{sites } j \text{ de fabrication du composant}} x_{i,j} \times G_{i,j} \text{ unitaire} \right) = Q_i \times \left(\sum_{\text{sites } j \text{ de fabrication du composant}} x_{i,j} \times \text{CED}_{i,j} \text{ unitaire} \times \text{EM}_j / F_j \right)$$

où

- G_{i,j}unitaire = CED_{i,j}unitaire x EM_j x F_j
- G_{i,j}unitaire est la quantité de gaz à effet de serre émise pour produire une unité du composant i sur le site j.

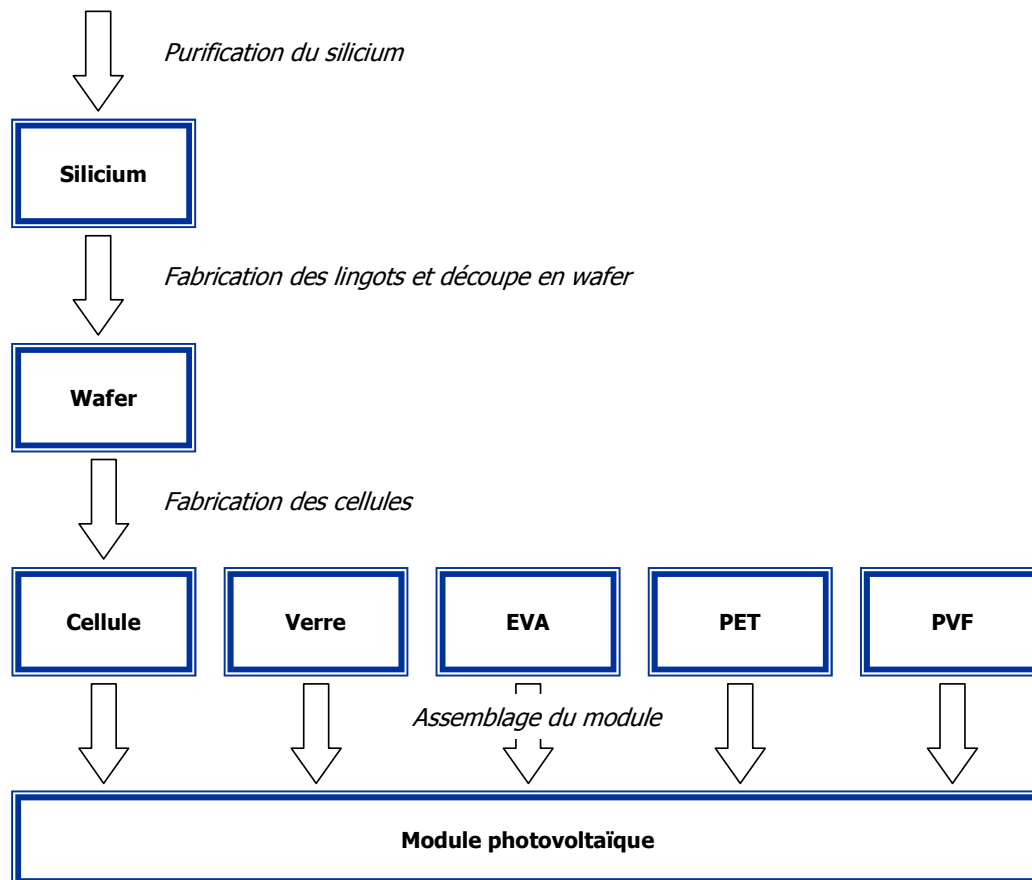
* voir glossaire en fin de rapport


C. Détail des composants et processus industriel entrant dans l'évaluation

Le processus de fabrication du laminé photovoltaïque est décomposé en huit étapes distinctes, correspondant à sept composants intermédiaires et l'assemblage final du module :

- Purification du silicium (de l'extraction des matières premières au silicium de qualité solaire (SoG-Si) ou équivalent),
- Cristallisation des lingots et fabrication des wafers,
- Fabrication des cellules photovoltaïques,
- Fabrication du verre (verre plat à faible teneur en fer), trempé ou non,
- Fabrication de l'EVA,
- Fabrication du PET,
- Fabrication du PVF,
- Assemblage du module photovoltaïque (hors pose du cadre).

Le schéma suivant représente les 8 composants et les étapes de fabrication associées :



 Unités étudiées dans l'évaluation carbone simplifiée

IV. INVENTAIRE

A. Préambule

L'inventaire réalisé en vue de l'analyse du bilan carbone comporte deux volets :

- **L'inventaire des composants** est la première étape de l'évaluation carbone simplifiée. Il s'agit de répertorier les composants utilisés et de déterminer la quantité de chacun d'eux contenue dans un kilowatt-crête de modules photovoltaïques.
- L'inventaire comprend également **l'identification des différents sites de fabrication** et leur contribution respective à la production du composant (**coefficient d'approvisionnement**).

Dans le cadre de cette étude, l'inventaire a été réalisé de la façon suivante :

- Collecte des données par ORAVIA auprès d'Altius et ses fournisseurs,
- Révision des données par Solstyce : complétude des données, vérification de leur pertinence sur la base de benchmark et de données techniques telles que la puissance du module ou l'épaisseur des cellules photovoltaïques

B. Rappel du module évalué

Fabricant :	Altius Fotovoltaic
Référence :	AFP-60-250-PWT
Puissance du module (Wc) :	260
Longueur (mm) :	1640
Largeur (mm) :	942

C. Inventaire des composants

L'inventaire des composants du module évalué, selon les unités définies par la Commission de Régulation de l'Energie, est le suivant :

Composant	Unité	Quantité par kWc
PolySi*	kg	2.62
Lingot-Wafer	nb	231
Cellule	nb	231
Module	m ²	6.19
Verre	kg	49.52
EVA*	kg	5.62
PET*	kg	1.61
PVF*	kg	0.00

La quantité de silicium a été calculée sur la base du poids d'un wafer : 11.3g

La quantité de verre a été calculée à partir des données suivantes :

- surface d'un module photovoltaïque : 1.61m²
- épaisseur du verre : 3,2mm
- densité du verre : 2500 kg/m³

La quantité d'EVA a été calculée à partir des données suivantes :

- surface de film EVA : 3.32m²
- épaisseur d'EVA : 0.46mm
- densité de l'EVA : 957 kg/m³

La quantité de PET a été calculée à partir des données suivantes :

- surface de film en face arrière : 1.8m²
- épaisseur de PET : 0.175mm
- densité du PET : 1330 kg/m³

Les modules ne comportent pas de PVF.

D. Identification des sites de production

Pour chaque composant, les sites de production sont les suivants :

Composant	Site	Fournisseur	Coefficients d'approvisionnement	Référence du composant	Site(s) de fabrication	Pays de fabrication
PolySi*	Site 1	Wacker	80%	SoG-Si	Burghausen	Allemagne
	Site 2	/	10%		/	Corée
	Site 3	/	10%		/	USA
Lingot-Wafer	Site 1	Photowatt	100%	multi-Si wafer	Bourgoin-Jallieu (38)	France
Cellule	Site 1	Photowatt	100%	multi-Si cell	Bourgoin-Jallieu (38)	France
Module	Site 1	Altius	100%	AFP-60-250-PWT	Giurgiu	Roumanie
Verre	Site 1	Ducatt	50%	Solar glass 3.2mm	Lommel	Belgique
	Site 2	Interfloat	50%		Ruggell	Allemagne
EVA*	Site 1	EVASA	90%	SOLARCAP NovoVellum Optima HFT01	A Coruña	Espagne
	Site 2	Novopolymer	10%		Puurs	Belgique
PET*	Site 1	KREMPEL GmbH	50%	AKALIGHT ECS	Vaihingen	Allemagne
	Site 2	COVEME spa	50%	dyMat PYE SPV	Gorizia	Italie
PVF*	Site 1	NA		NA	NA	NA

V. PURIFICATION DU SILICIUM

A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc

La quantité de gaz à effet de serre émise par la purification du silicium pour un kWc de laminés photovoltaïques est de :

$$G_{\text{silicium}} = 131.5 \text{ kg CO}_2 / \text{kWc}$$

Tableau de synthèse du calcul de G_{silicium} :

Site	Pays	CEDij unitaire MJ/unité	Emj gCO ₂ /kWh	Fj MJ/kWh	Gi unitaire kg CO ₂ / unité	Gi kg CO ₂ / kWc
Site 1	Allemagne	958.5	441	11.2		
Site 2	Corée	2 461.7	459	12.3	50.3	131.5
Site 3	USA	2 568.1	535	12.6		

B. Evaluation pour le site 1

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un kilogramme de silicium

Valeur retenue :

$$CED_{\text{silicium}, 1} = 958.5 \text{ MJ ep / kg}$$

Dans le cadre de la première méthode de calcul de CEDij unitaire proposée par la CRE, nous retenons la valeur calculée par Solstyce sur la base des données fournies par Wacker. La note de calcul est fournie en annexe.

2. Détermination du contenu CO₂ de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$EM_1 = 441 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO2 emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$F_1 = 11.2 \text{ MJep/kWh}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

A. Evaluation pour le site 2

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un kilogramme de silicium

Valeur retenue :

$$CED_{\text{silicium}, 2} = 2461.7 \text{ MJ ep / kg}$$

Nous retenons la valeur proposée par la CRE pour la purification du silicium en Corée. Cette valeur est majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE. Les valeurs proposées par la CRE sont rappelées en annexe.

2. Détermination du contenu CO2 de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$EM_2 = 459 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO2 emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$F_2 = 12.3 \text{ MJep/kWh}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

B. Evaluation pour le site 3

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un kilogramme de silicium

Valeur retenue :

$$CED_{\text{silicium}, 3} = 2568.1 \text{ MJ ep / kg}$$

Nous retenons la valeur proposée par la CRE pour la purification du silicium aux Etats-Unis. Cette valeur est majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE. Les valeurs proposées par la CRE sont rappelées en annexe.

2. Détermination du contenu CO₂ de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$EM_3 = 535 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO₂ emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$\mathbf{F_3 = 12.6 MJep/kWh}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

VI. LINGOTS ET WAFERS

A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc

La quantité de gaz à effet de serre émise par la fabrication des wafers pour un kWc de laminés photovoltaïques est de :

$$G_{\text{wafers}} = 27.5 \text{ kg CO}_2 / \text{kWc}$$

Tableau de synthèse du calcul de G_{wafers} :

Site	Pays	CEDij unitaire MJ/unité	Emj gCO ₂ /kWh	Fj MJ/kWh	Gi unitaire kg CO ₂ / unité	Gi kg CO ₂ / kWc
Site 1	France	17.6	83	12.3	0.1	27.5

B. Evaluation pour le site 1

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un wafer

Valeur retenue :

$$CED_{\text{wafers}, 1} = 17.6 \text{ MJ ep /wafer}$$

Nous retenons la valeur issue du rapport « Photovoltaïcs » (2009) du *Swiss Centre for Life Cycle Inventory*, dans le cadre de la 2^e méthode de calcul de CEDij unitaire proposée par la CRE.

L'étude fournit les valeurs de CED pour la fabrication d'un mètre carré de wafers (wafers de 0.156*0.156m²) en Europe, incluant la purification du silicium. Nous décomptons donc la consommation d'énergie associée à la purification du silicium (selon les hypothèses de l'étude), afin de ne garder que le processus de fabrication des wafers à partir du silicium. Nous convertissons ensuite la donnée en MJ/wafer, et nous obtenons la valeur de 16.0 MJ/wafer. Cette valeur est enfin majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE.

La publication utilisée comme source est fournie en annexe :

Photovoltaics (2009), Niels Jungbluth, Matthias Stucki, Rolf Frischknecht - Swiss Centre for Life Cycle Inventory.

2. Détermination du contenu CO₂ de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$\mathbf{EM_1 = 83 \text{ gCO}_2/\text{kWh}}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO₂ emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$\mathbf{F_1 = 12.3 \text{ MJep/kWh}}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

VII. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc

La quantité de gaz à effet de serre émise par la fabrication des cellules pour un kWc de laminés photovoltaïques est de :

$$G_{\text{cellules}} = 17.7 \text{ kg CO}_2 / \text{kWc}$$

Tableau de synthèse du calcul de G_{cellules} :

Site	Pays	CEDij unitaire MJ/unité	Emj gCO ₂ /kWh	Fj MJ/kWh	Gi unitaire kg CO ₂ / unité	Gi kg CO ₂ / kWc
Site 1	France	11.4	83	12.3	0.1	17.7

B. Evaluation pour le site 1

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'une cellule

Valeur retenue :

$$CED_{\text{cellules, 1}} = 11.4 \text{ MJ ep / cellule}$$

Nous retenons la valeur issue du rapport « Photovoltaïcs » (2009) du *Swiss Centre for Life Cycle Inventory*, dans le cadre de la 2^e méthode de calcul de CEDij unitaire proposée par la CRE.

L'étude fournit les valeurs de CED pour la fabrication d'un mètre carré de cellules (cellules de 0.156*0.156m²) en Europe, incluant la fabrication des wafers. Nous décomptons donc la consommation d'énergie associée à la fabrication des wafers (selon les hypothèses de l'étude), afin d'obtenir une valeur pour le processus de fabrication des cellules uniquement. Nous convertissons ensuite la donnée en MJ/cellule, et nous obtenons la valeur de 10.3 MJ/cellule. Cette valeur est enfin majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE.

La publication utilisée comme source est fournie en annexe :

Photovoltaics (2009), Niels Jungbluth, Matthias Stucki, Rolf Frischknecht - Swiss Centre for Life Cycle Inventory.

2. Détermination du contenu CO₂ de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$\mathbf{EM_1 = 83 \text{ gCO}_2/\text{kWh}}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO₂ emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$\mathbf{F_1 = 12.3 \text{ MJep/kWh}}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

VIII. VERRE

A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc

La quantité de gaz à effet de serre émise par la fabrication du verre pour un kWc de laminés photovoltaïques est de :

$$G_{\text{verre}} = 27.3 \text{ kg CO}_2 / \text{kWc}$$

Tableau de synthèse du calcul de G_{verre} :

Site	Pays	CEDij unitaire <i>MJ/unité</i>	Emj <i>gCO2/kWh</i>	Fj <i>MJ/kWh</i>	Gi unitaire <i>kg CO2 / unité</i>	Gi <i>kg CO2 / kWc</i>
Site 1	Belgique	18.1	249	11.7	0.6	27.3
Site 2	Allemagne	18.1	441	11.2		

B. Evaluation pour le site 1

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un kilogramme de verre

Valeur retenue :

$$CED_{\text{verre}, 1} = 18.1 \text{ MJ ep / kg}$$

Le module évalué est composé d'un verre trempé. La valeur finale de CED_{verre} est donc la somme des CED du verre plat et de la trempe du verre.

Pour le verre plat (non trempé), nous retenons la valeur issue du rapport « Life Cycle Inventory of Building products » (2007) du *Swiss Centre for Life Cycle Inventory*, dans le cadre de la 2^e méthode de calcul de CEDij unitaire proposée par la CRE.

L'étude fournie pour la fabrication d'un kilogramme de verre en Europe une valeur de CED de 12.9MJ/kg. La valeur est enfin majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE.

Pour la trempe du verre, nous retenons la valeur proposée par la CRE (3.59MJ/kg). Cette valeur est majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE.

La publication utilisée comme source est fournie en annexe :

Life Cycle Inventory of Building products (2007), Daniel Kellenberger, Hans-Jörg Althaus, Tina Künniger, Martin Lehmann, Niels Jungbluth - Swiss Centre for Life Cycle Inventory.

2. Détermination du contenu CO₂ de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$\mathbf{EM_1 = 249 \text{ gCO}_2/\text{kWh}}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO₂ emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$\mathbf{F_1 = 11.7 \text{ MJep/kWh}}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

C. Evaluation pour le site 2

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un kilogramme de verre

Valeur retenue :

$$\mathbf{CED_{\text{verre}, 2} = 18.1 \text{ MJ ep / kg}}$$

Le module évalué est composé de deux verres trempés, en face avant et en face arrière. La valeur finale de CED_{verre} est donc la somme des CED du verre plat et de la trempe du verre.

Pour le verre plat (non trempé), nous retenons la valeur issue du rapport « Life Cycle Inventory of Building products » (2007) du *Swiss Centre for Life Cycle Inventory*, dans le cadre de la 2^e méthode de calcul de CEDij unitaire proposée par la CRE.

L'étude fournie pour la fabrication d'un kilogramme de verre en Europe une valeur de CED de 12.9MJ/kg. La valeur est majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE.

Pour la trempe du verre, nous retenons la valeur proposée par la CRE (3.59MJ/kg). Cette valeur est majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE.

La publication utilisée comme source est fournie en annexe :

Life Cycle Inventory of Building products (2007), Daniel Kellenberger, Hans-Jörg Althaus, Tina Künniger, Martin Lehmann, Niels Jungbluth - Swiss Centre for Life Cycle Inventory.

2. Détermination du contenu CO₂ de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$\mathbf{EM_2 = 441 \text{ gCO}_2/\text{kWh}}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO₂ emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$\mathbf{F_2 = 11.2 \text{ MJep/kWh}}$$

Nous retenons la valeur issue des données Enerdata "Efficiency of power generation" calculée pour le World Energy Council (WEC) committee, en partenariat avec l'ADEME. Les données sont indiquées pour l'année 2008, et sont disponibles sur internet à l'adresse suivante : <http://www.wec-indicators.enerdata.eu> La publication WEC pour le Site 2 (Philippines) est disponible en annexe.

IX. EVA

A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc

La quantité de gaz à effet de serre émise par la fabrication de l'EVA pour un kWc de laminés photovoltaïques est de :

$$G_{EVA} = 17.0 \text{ kg CO}_2 / \text{kWc}$$

Tableau de synthèse du calcul de G_{EVA} :

Site	Pays	CEDij unitaire <i>MJ/unité</i>	Emj <i>gCO2/kWh</i>	Fj <i>MJ/kWh</i>	Gi unitaire <i>kg CO2 / unité</i>	Gi <i>kg CO2 / kWc</i>
Site 1	Espagne	101.2	326	10.6	3.0	17.0
Site 2	Belgique	101.2	249	11.7		

B. Evaluation pour le site 1

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un kilogramme d'EVA

Valeur retenue :

$$CED_{EVA, 1} = 101.2 \text{ MJ ep / kg}$$

Nous retenons la valeur proposée par la CRE pour la fabrication de l'EVA en Europe (pas de donnée spécifique pour l'Espagne). Cette valeur est majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE. Les valeurs proposées par la CRE sont rappelées en annexe.

2. Détermination du contenu CO2 de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$EM_1 = 326 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO2 emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$F_1 = 10.6 \text{ MJep/kWh}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

C. Evaluation pour le site 2

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un kilogramme de EVA

Valeur retenue :

$$CED_{EVA, 2} = 101.2 \text{ MJ ep / kg}$$

Nous retenons la valeur proposée par la CRE pour la fabrication de l'EVA en Europe (pas de donnée spécifique pour la Belgique). Cette valeur est majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE. Les valeurs proposées par la CRE sont rappelées en annexe.

2. Détermination du contenu CO2 de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$EM_2 = 249 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO2 emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$\mathbf{F_2 = 11.7 MJep/kWh}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

X.PET

A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc

La quantité de gaz à effet de serre émise par la fabrication du PET pour un kWc de laminés photovoltaïques est de :

$$G_{PET} = 5.6 \text{ kg CO}_2 / \text{kWc}$$

Tableau de synthèse du calcul de G_{PET} :

Site	Pays	CEDij unitaire MJ/unité	Emj gCO ₂ /kWh	Fj MJ/kWh	Gi unitaire kg CO ₂ / unité	Gi kg CO ₂ / kWc
Site 1	Allemagne	86.3	441	11.2	3.5	5.6
Site 2	Italie	86.3	398	9.7		

B. Evaluation pour le site 1

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un kilogramme de PET

Valeur retenue :

$$CED_{PET, 1} = 86.3 \text{ MJ ep / kg}$$

Nous retenons la valeur proposée par la CRE pour la fabrication du PET en Allemagne. Cette valeur est majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE. Les valeurs proposées par la CRE sont rappelées en annexe.

2. Détermination du contenu CO₂ de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$EM_1 = 441 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO2 emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$F_1 = 11.2 \text{ MJep/kWh}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

C. Evaluation pour le site 2

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un kilogramme de PET

Valeur retenue :

$$CED_{PET, 2} = 86.3 \text{ MJ ep / kg}$$

Nous retenons la valeur proposée par la CRE pour la fabrication du PET en Europe (pas de donnée spécifique pour l'Italie). Cette valeur est majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE. Les valeurs proposées par la CRE sont rappelées en annexe.

2. Détermination du contenu CO2 de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$EM_2 = 398 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO2 emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$F_2 = 9.7 \text{ MJep/kWh}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

XI. ASSEMBLAGE DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

A. Gaz à effet de serre émis pour 1 kWc

La quantité de gaz à effet de serre émise par l'assemblage du module photovoltaïque pour un kWc de laminés photovoltaïques est de :

$$G_{\text{laminé}} = 55.6 \text{ kg CO}_2 / \text{kWc}$$

Tableau de synthèse du calcul de $G_{\text{laminé}}$:

Site	Pays	CEDij unitaire MJ/unité	Emj gCO2/kWh	Fj MJ/kWh	Gi unitaire kg CO2 / unité	Gi kg CO2 / kWc
Site 1	Roumanie	224.0	417	10.4	9.0	55.6

B. Evaluation pour le site 1

1. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la fabrication d'un mètre carré de laminé

Valeur retenue :

$$CED_{\text{laminé}, 1} = 224.0 \text{ MJ ep} / \text{m}^2$$

Nous retenons la valeur issue du rapport « Photovoltaïcs » (2009) du *Swiss Centre for Life Cycle Inventory*, dans le cadre de la 2^e méthode de calcul de CEDij unitaire proposée par la CRE.

L'étude fournit les valeurs de CED pour la fabrication d'un mètre carré de modules en Europe, incluant la fabrication des cellules, le verre, l'EVA, le PET et le PVF. Nous décomptons donc la consommation d'énergie primaire associée à ces cinq composants (selon les hypothèses de l'étude), afin d'obtenir une valeur pour le processus d'assemblage du module uniquement. Nous obtenons alors la valeur de 203.6MJ par mètre carré de module assemblé. Cette valeur est enfin majorée de 10%, conformément à la méthodologie décrite par la CRE.

La publication utilisée comme source est fournie en annexe :

Photovoltaics (2009), Niels Jungbluth, Matthias Stucki, Rolf Frischknecht - Swiss Centre for Life Cycle Inventory.

2. Détermination du contenu CO₂ de l'électricité du pays de fabrication

Valeur retenue :

$$\mathbf{EM_1 = 417 \text{ gCO}_2/\text{kWh}}$$

Nous retenons la valeur fournie par la CRE, issue de la publication de l'AIE (International Energy Agency) "CO₂ emissions from fuel combustion, 2010". Les données sont indiquées pour l'année 2008. La publication de l'AIE est disponible en annexe.

3. Détermination de la quantité d'énergie primaire nécessaire à la production d'un kWh d'électricité

Valeur retenue :

$$\mathbf{F_1 = 10.4 \text{ MJep/kWh}}$$

Nous retenons la valeur proposée par la base de données Ecoinvent, version 2.2. Cette base de données est une référence pour la réalisation d'analyse de cycle de vie.

GLOSSAIRE

EVA : Ethylvinylacetate (éthylène-acétate de vinyle en français), polymère (plastique) utilisé pour l'encapsulation des cellules, en face avant et en face arrière du module

PET : Polyethylene terephthalate (polytéréphtalate d'éthylène en français), polymère (plastique), utilisé dans le film en face arrière des modules

PVF : Polyvinyle fluoride (Polyfluorure de vinyle en français), polymère (plastique), utilisé dans le film en face arrière des modules.

MJep : Abréviation de MegaJoule d'énergie primaire. Conversion en kWh : 3.6 MJ = 1 kWh.

PolySi : Désigne le silicium avant sa cristallisation. Il s'agit aujourd'hui dans l'immense majorité de « Solar grade silicon » (SoG-Si).

Wc : Watt-crête, unité de mesure de la puissance des modules photovoltaïques. Dans les conditions standard STC (ensoleillement de 1000 W/m², température de 25 °C, masse d'air de 1,5), 1Wc produit une puissance d'un Watt. 1kWc = 1000Wc

CED : Cumulative Energy Demand, énergie totale nécessaire à la fabrication d'un produit, de l'extraction des matières premières à sa fabrication.

g-eqCO₂ ou gCO₂ : grammes-équivalent CO₂, unité quantifiant les émissions de gaz à effet de serre. 1kgCO₂ = 1000gCO₂