



Sciences
Technologies
Santé

2D

Travaux dirigés

Empreinte carbone & facteur d'émission d'un panneau photovoltaïque

Auteur :



Réalisation :



La conversion d'énergie photovoltaïque est considérée comme un élément clef de la transition énergétique. Toutefois, des interrogations à son sujet peuvent subsister, telles que l'impact de sa fabrication ou encore sa recyclabilité.

Ce TD vise à quantifier l'empreinte carbone d'un panneau photovoltaïque sur l'ensemble de son cycle de vie. Le TD s'appuie sur les données d'un article scientifique (V.M. Fthenakis, H.C. Kim / Solar Energy 85 (2011) 1609–1628) et s'applique à un panneau photovoltaïque représentatif de l'état des performances techniques (Trinasolar 450Wc Vertex S+ - commercialisé en 2026). La quantification de l'empreinte carbone est ensuite utilisée pour identifier et quantifier les moyens de la réduire.

Hypothèses & Données :

L'« Unité Fonctionnelle » sera rapportée à : « production de 1 kWh ».

Le panneau photovoltaïque (PV) étudié de 1,8 m² est constitué de :

- un châssis en aluminium (4,5kg)
- une plaque en verre (12 kg)
- deux encapsulants (résine polymère – 1,5 kg/feuille)
- cellules silicium (1,5 kg)
- une membrane Tedlar (2 kg)
- un boîtier de raccordement (15 Euros – 0,5kg)

Performances du panneau PV & paramètres de l'installation :

- le panneau est installé dans le sud de la France, l'irradiation solaire (I) moyenne journalière à cette latitude (47°) est **I=4600 Wh/m²**
- la puissance crête (Wc) est **Wc = 450 W**
- l'efficacité de conversion (η) des cellules PV est **η = 22,5 %**
- la durée équivalente d'ensoleillement (moyenne sur l'année) ou [Peak Sun Hours](#) (PSH) est **PSH=4,5 heures**
- le coefficient de performance du PV est : **CP = 0,75**
- la surface du panneau (S) est : **S = 1,8m²**
- la durée de vie du panneau PV : **30 ans**

Système fabriqué & assemblé en Asie – transport vers la France :

- Transport par ferry cargo sur 6000 km
- Transport routier sur une distance de 2000 km.
- Distance artisan-particulier par camion utilitaire = 30km (2 aller-retour pour l'installation et 1 aller-retour pour le démontage en fin de vie) – Transport de 5 panneaux PV.

Rappel énergie/puissance :

1. L'énergie s'exprime en J.
2. 1 Joule = soulever 1 pomme (~100gr) à 1m de hauteur ($E=mgh$)
3. L'énergie **électrique** est le produit de la puissance par le temps: $E = P(W) \times \text{Temps}(s)$
4. **1 Joule = 1 W.s** => 3 600 W.s = 1W.h

Partie 1 : Quantification de l’empreinte carbone

1. Collecte des facteurs d’émission utiles

Bien que très complète, certains facteurs d’émission ne sont toutefois pas disponibles dans la base empreinte. Quand c’est le cas, il faut trouver un moyen de l’estimer. Dans l’exercice proposé, c’est le cas du boîtier de raccordement que vous déterminerez en utilisant un facteur d’émission des ratios monétaires.

EC_ boîtier (en kgCO₂e) =

Facteurs d’émission utiles :

Processus	Aluminium (neuf)	Verre (neuf)	Encapsulant EVA	Silicium	Membrane Tedlar
Facteurs d’émission (FE)	7,8 kgCO ₂ e/kg	3,5 kgCO ₂ e/kg	5,5 kgCO ₂ e/kg	5 kgCO ₂ e/kg	5,5 kgCO ₂ e/kg

Processus	Boîtier raccordement	Electricité (mix Asie)	Électricité (mix français 2022)	Ratio monétaire machines et équipements (2023)
Facteurs d’émission (FE)		0,76 kgCO ₂ e/kWh	0,052 kgCO ₂ e/kWh	273 kgCO ₂ e/k€

Processus	Transport par cargo	Transport routier par camion	Camion utilitaire (<3,5t)	Machine-outil
Facteurs d’émission (FE)	0,0191 kgCO ₂ e/(t.km)	0,24 kgCO ₂ e/(t.km)	0,4 kgCO ₂ e/km	5000 kgCO ₂ e

Processus	Fin de vie DEEE (Impacts)	Fin de vie DEEE (Emissions évitées)	Fin de vie verre (impact)	Fin de vie verre (recyclage émissions évitées)	Fin de vie aluminium (impact)	Fin de vie aluminium (recyclage émissions évitées)
Facteurs d’émission (FE)	2 kgCO ₂ e/kg	-1,54 kgCO ₂ e/kg	0,3 kgCO ₂ e/kg	-3,5 kgCO ₂ e/kg	0,5 kgCO ₂ e/kg	-7,8 kgCO ₂ e/kg

Le FE du boîtier ainsi obtenu peut alors être rajouté dans le tableau des FE. Une fois tous les FE obtenus, la quantification de l’empreinte carbone peut commencer.

2. Production énergétique du PV.

Calculer l’énergie électrique quotidienne convertie par le PV (kWh)

a) à partir de l’irradiance solaire :

NRJa =

b) à partir de la puissance crête du PV et du PSH :

NRJb =

c) Déduisez l’énergie convertie par le panneau par an (en kWh), en supposant une production moyenne d’énergie journalière du panneau de 1500 Wh.

NRJ_PV =

L’énergie nécessaire à la fabrication du PV est de 600 kWh. En déduire la durée du « remboursement » de l’énergie nécessaire à la fabrication du PV (dit EPBT) :

EPBT =

Calculer l’énergie convertie par le PV sur sa durée de vie.

NRJ_PV =

3. Empreinte carbone matière du PV (en précisant les unités).

Compléter le tableau ci-dessous :

	Flux	Facteurs d’émission	Empreinte Carbone (kgCO2e)
Cadre aluminium (neuf)			
Plaque verre (neuf)			
Encapsulant polymère (x2)			
Cellule silicium			
Membrane Tedlar			
Boîtier raccordement			
Bilan Matière (kgCO2e)			

4. Empreinte carbone énergie liée à la fabrication du PV (usage, assemblage, etc.)

On s'intéresse maintenant à l'empreinte carbone liée à l'énergie nécessaire à la fabrication du panneau ainsi qu'à la fraction de machine-outil imputable à la fabrication du panneau.

On considère que la consommation moyenne des machines outil est de 5 kW et que le temps d'utilisation « machine-outil » par PV est de 120 heures par système. Hypothèse : fabrication en Asie.

a) En déduire l'empreinte carbone énergie (à reporter dans le tableau ci-dessous)

NRJ_fabrication =

La « durée de vie » moyenne des machines-outils est de 10h00/jour, 200 jours/an, pendant 20 ans.

b) En déduire la fraction de l'empreinte carbone de la machine outil imputable au PV (à reporter dans le tableau ci-dessous).

Fraction utilisation =

Fabrication/assemblage	Flux	FE (kgCO2e/unitéFlux)	Fabrication/assemblage (kgCO2e)
Energie			
Empreinte carbone usage machine-outil			
Bilan Fabrication			

5. Empreinte carbone de la logistique de distribution/transport

(vous complèterez le tableau ci-dessous).

Transports	Flux	FE (kgCO2e/unité_Flux)	Empreinte Carbone (kgCO2e)
Transport bateau			
Transport camion			
Transport camion utilitaire			
Bilan transport			

6. Empreinte carbone de la fin de vie

Déterminer l'empreinte carbone de la fin de vie de l'équipement.

Considérez le bilan entre l'impact des déchets et les émissions évitées selon les hypothèses de recyclage (hyp. 100 % recyclage de DEEE et 0 % pour l'aluminium et le verre).

Compléter le tableau ci-dessous.

Fin de vie	Flux	FE (kgCO ₂ e/unité_Flux)	Empreinte Carbone (kgCO ₂ e)
Déchets électroniques (DEEE)			
Fin de vie verre (impacts)			
Fin de vie aluminium (impacts)			
Fin de vie Tedlar (impacts)			
Bilan fin de vie			

Déduire des questions précédentes l’empreinte carbone du PV sur son cycle de vie puis son facteur d’émission (FE_PV en kgCO₂e/kWh)

Le panneau photovoltaïque est vendu au prix unitaire de 70 Euros. Estimer son empreinte carbone obtenue au moyen d’un FE de ratio monétaire et comparer à l’empreinte carbone que vous avez obtenue à la question précédente. (/1)

Partie 2 : Leviers d'écoconception

Une fois l'empreinte carbone obtenue, nous avons fait la moitié du chemin. Cela permet d'identifier les étapes du cycle de vie contribuant le plus à l'empreinte carbone pour ensuite proposer des leviers d'action et quantifier leur impact sur leur empreinte carbone, c'est l'objet de cette seconde partie.

- a) Justifier que, dans le cas de l'utilisation de matériaux recyclés, le FE utilisé pour la matière recyclée se ramène au FE « impact »

Fin de vie	Flux	FE_impact (kgCO2e/unité_Flux)	FE émissions Évitées (kgCO2e/	Empreinte Carbone (kgCO2e)
Déchets électroniques (DEEE)				
Fin de vie verre				
Fin de vie aluminium				
Fin de vie Tedlar				
Bilan fin de vie				

- b) Calculer le facteur d'émission du PV en remplaçant le verre et l'aluminium par des matériaux recyclés ?

- c) Calculer le facteur d'émission du PV dans l'hypothèse d'une fabrication en France du PV (hyp. Matériaux neufs) ?

- d) Calculer le FE du PV en combinant le « made in France » et l'usage de matériaux recyclés.

- e) Quels freins (individuels et collectifs) empêchent la mise en œuvre la moins impactante ? Commentez, discutez.

ANNEXE : Facteurs d'émission de différentes sources d'énergie électrique

(d'après [Base Empreinte de l'ADEME](#))

Type de conversion d'énergie	Émissions (gCO2e/kWh)
Nucléaire	3,7
Eolien	14,1
Photovoltaïque (France/Chine)	25,2/43,9
Geothermie	45
Hydraulique	6
Charbon	1060
Mix énergétique (France(2022))	52

Ce TD a été mutualisé dans le cadre d'un partenariat entre IUT Montpellier - Sète et la Fondation UVED pour la déclinaison disciplinaire de l'enseignement des enjeux de transition écologique et sociétale (TEDS).

Il est mis à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons - 4.0 International : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



Pour la formation continue ou professionnelle, les modalités d'usage sont à déterminer avec UVED et doivent faire l'objet d'un contrat définissant les conditions d'usage et de commercialisation. Contact : contact@fondation-ued.fr

Première édition : mars 2026