



Taux d'Impact Carbone

Guide pédagogique





6

BONNES RAISONS D'INSTALLER DES PANNEAUX SOLAIRES

01

Cœuvrer pour la transition énergétique

02

Décarboner ses usages

03

Gagner en autonomie énergétique

04

Créer de la valeur tout en maîtrisant ses coûts

05

Valoriser son foncier

06

Être en conformité avec la réglementation

SOMMAIRE

1 CONNAÎTRE LE CONTEXTE & LES ENJEUX DU TIC

1.1 Qu'est-ce que le TIC?

1.2 Les raisons pour lesquelles CVE a développé son propre outil TIC

1.3 L'approche & la mise en oeuvre

2 INTERPRÉTER & COMPRENDRE LES RÉSULTATS

2.1 Comprendre les résultats du TIC

2.2 Comprendre le détail du calcul du TIC

2.3 Les principaux enseignements du TIC

2.4 Trouver les réponses à mes questions

3 AMÉLIORER LE BILAN CARBONE DE LA CENTRALE PV

3.1 Les macro-leviers pour améliorer le bilan carbone de la centrale solaire

3.2 Les leviers d'amélioration, équipement par équipement



1

CONNAÎTRE LE CONTEXTE & LES ENJEUX DU TIC

1.1 Qu'est-ce que le TIC?

Un outil développé par CVE pour mesurer le Taux d'Impact Carbone des projets solaires portés par CVE, c'est-à-dire le contenu carbone de l'électricité produite par ses centrales solaires.

Cet outil est basé sur la méthodologie d'analyse du cycle de vie (ACV), appliquée à l'impact « émissions de gaz à effet de serre » (GES) uniquement.

Une ACV est une méthodologie normalisée (ISO 14040 à 14044) permettant de réaliser un **bilan environnemental multicritère et multiétape d'un système** (produit, service, entreprise, procédé), en mesurant les effets quantifiables de ce dernier. L'ACV permet ainsi de comparer différents systèmes.

L'ACV considère tout le cycle de vie du système.

Ainsi, l'outil TIC de CVE calcule **les émissions de gaz à effet de serre (GES) sur l'ensemble du cycle de vie d'un projet solaire CVE.**

Le résultat est exprimé en « **gramme de CO2 équivalent** » émis, ou **gCO2 eq**, pour une quantité standard d'électricité produite (un kilowattheure, ou kWh).

En effet, les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas que sous forme de dioxyde de carbone (CO2) : d'autres molécules comme le méthane (CH4) et le dioxyde d'azote (NO2) ont aussi un pouvoir réchauffant. Cependant, par convention et pour faciliter les comparaisons, le pouvoir réchauffant de chaque gaz à effet de serre est exprimé en équivalent CO2.

En bref...



Taux d'impact carbone

Exprimé en gCO₂/kWh

Quantité de GES émis, sur l'ensemble du cycle de vie de la centrale PV, pour produire 1 kWh d'électricité

=



Total des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie du projet (en kgCO₂ eq.)

Total de l'énergie produite par la centrale PV sur toute sa durée de vie (en kWh).



* Analyse de Cycle de Vie

1.2 Les raisons pour lesquelles CVE a développé son propre outil TIC

Disposer d'un chiffre fiable tenant compte des améliorations technologiques de la filière

L'industrie du solaire photovoltaïque a beaucoup évolué et progressé en dix ans, sans que les améliorations apportées soient toujours prises en compte dans le calcul de l'impact carbone des projets. Ainsi, la littérature surestime souvent l'impact carbone de l'électricité produite par des centrales électriques solaires.

Pallier l'absence d'une méthode partagée et exhaustive

Il n'existe pas de méthode commune et partagée par tous pour l'évaluation de l'impact carbone des projets solaires sur leur cycle de vie. Plusieurs démarches et initiatives existent en ce qui concerne la comptabilité carbone, toutefois ces méthodes se limitent à une partie du cycle de vie des projets (généralement le bilan carbone des modules PV, qui est un critère intégré par la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) dans ses appels d'offres depuis plusieurs années).

Répondre au besoin exprimé par nos clients (collectivités et entreprises) et nos financeurs, pour connaître précisément l'impact carbone d'un projet donné ou d'un ensemble de projets.

Communiquer sur les vertus des projets solaires pour le climat, et ainsi favoriser leur acceptabilité locale

S'inscrire dans une démarche d'amélioration continue sur notre impact environnemental

- En identifiant les postes les plus émetteurs
- En définissant des plans d'action pour diminuer notre impact
- En engageant nos fournisseurs

L'ambition de CVE est de mettre en œuvre un modèle d'affaire à impact. En plus de mesurer la valeur de ses actifs d'un point de vue économique, cette démarche permettra d'intégrer d'autres valeurs intangibles telles que leur valeur environnementale.



Le saviez-vous ?

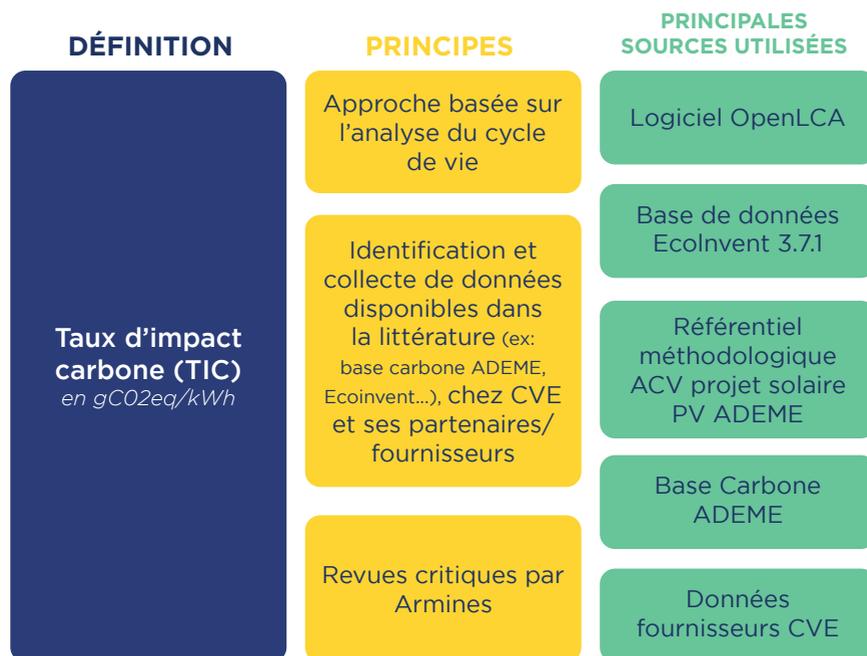
La France a été le premier (et longtemps, le seul) pays à imposer aux développeurs de projets solaires un « plafond carbone » pour les modules solaires utilisés (en kgCO₂éq/kWc) sur des projets prétendant aux subventions d'état. Cette obligation a abouti à la mise en place d'un organisme français de certification du bilan carbone des modules solaires, généralement produits en Chine.

1.3 L'approche mise en œuvre

Le périmètre/découpage du calcul, les sources de données et les revues faites par CVE

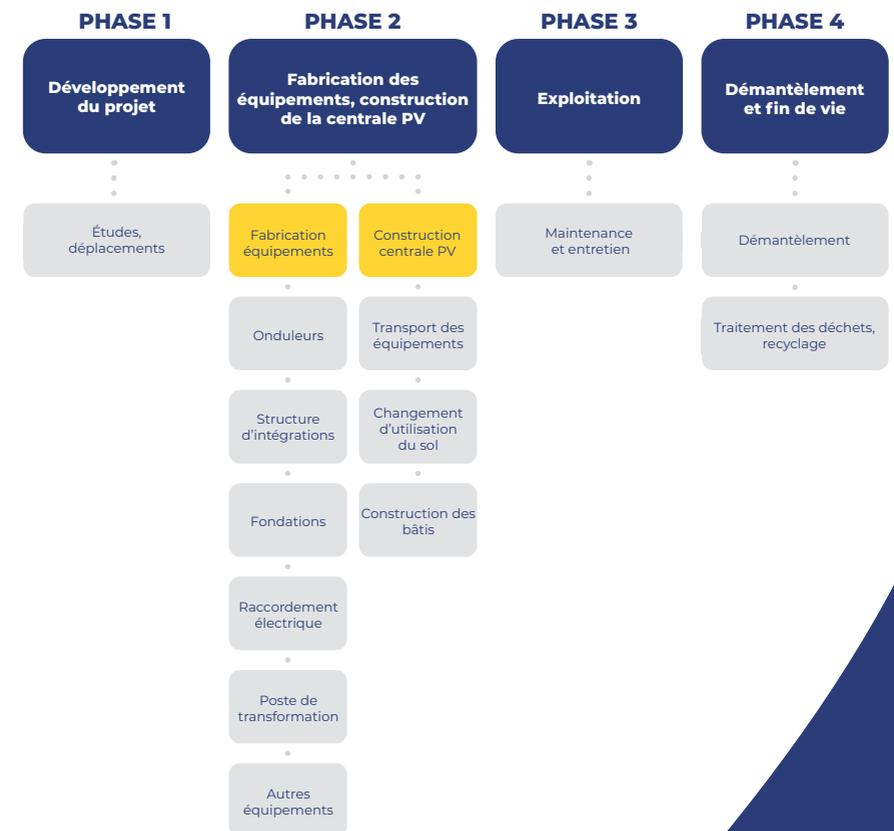
L'outil a été conçu en 2021 et fait depuis l'objet d'une démarche d'amélioration continue. En particulier, CVE a fait appel en 2022 au laboratoire du centre de recherche OIE (équipe de recherche commune MINES ParisTech - ARMINES) pour la réalisation d'une revue critique, portant sur les méthodes de calcul et les données utilisées. Le centre de recherche a reconnu la conformité de l'outil avec la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et les normes ISO 14040 et 14044.

Les grands principes et principales sources de données utilisées



D'un point de vue méthodologique, le périmètre considéré par CVE dans l'analyse du cycle de vie de la centrale solaire sur sa composante « impact carbone » est le suivant :

Périmètre d'un projet solaire considéré dans l'outil TIC CVE



SAISIR L'ESSENTIEL



Pour chacune des « briques élémentaires » explicitées ci-dessus (fabrication des modules photovoltaïques, maintenance et entretien de la centrale solaire). **L'impact carbone résulte de la multiplication d'un facteur d'émission** (quantité de gaz à effet de serre par unité, exprimé en gCO₂eq/unité) par l'unité caractéristique de cette brique (Wc, m²...).

Sont ainsi obtenues les émissions de CO₂ équivalentes pour chaque « étape élémentaire » du projet, elles même calculées selon une méthodologie ACV (par exemple **les émissions liées aux transports prennent en compte la combustion de carburant mais aussi la fabrication** des véhicules nécessaires aux transports des marchandises).

Taux d'impact carbone en gCO₂/kWh
du projet solaire

=

Somme des émissions de CO₂ équivalent de chaque brique élémentaire
Total de l'énergie produite par la centrale PV sur toute sa durée de vie (en kWh).

1

2

INTERPRÉTER & COMPRENDRE LES RÉSULTATS



3

2.1 Comprendre les résultats principaux du TIC

L'**indicateur principal** calculé par l'outil TIC est le **taux d'impact carbone** de l'électricité produite par une centrale solaire qui s'exprime en **gCO₂éq./kWh** (ou gramme de CO₂ équivalent par kilowattheure). On peut aussi parler du « contenu carbone de l'électricité produite » ou encore de « l'empreinte carbone de l'électricité produite » par la centrale solaire.

Cet indicateur traduit la **quantité d'émissions de gaz à effet de serre** qui a été émise pour produire une unité standard d'énergie électrique, en considérant les émissions de GES totales liées à la **centrale** sur l'ensemble de sa **durée de vie**.

Ce résultat peut être mis en perspective avec :

- Le contenu carbone de **l'électricité circulant sur le réseau français** (le « mix français », qui dépend à l'instant «t» des moyens de production électrique activés en France mais aussi du contenu carbone de l'électricité importée, le cas échéant). En 2021, le contenu carbone moyen de l'électricité consommée en France était de 61 gCO₂/kWh. En 2023, il était de 53 gCO₂/kWh (source : electricity maps).
- Le contenu carbone de **l'électricité produite par une centrale à charbon** est d'environ 1000 gCO₂/kWh et, pour le gaz, d'environ 500 gCO₂/kWh (source, Electricity maps, France).

Un second indicateur calculé par l'outil TIC est **le total des émissions de gaz à effet de serre évitées**, grâce à la mise en place du projet photovoltaïque sur un an et sur toute sa durée de vie. Ce calcul simplifié vise à être révisé au sein de la filière à travers l'initiative « Dividendes Climat » que CVE a rejoint en 2024.

Pour évaluer ces émissions évitées, 2 scénarios sont comparés : le scénario où la **centrale solaire est mise en service**, et le scénario où la **centrale solaire n'est pas mise en service** et où une quantité équivalente d'électricité est produite, avec un contenu carbone équivalent au mix français. Le contenu carbone de l'électricité produite par la centrale photovoltaïque étant meilleur que celui du « mix moyen français », il en résulte des émissions de GES évitées par rapport au scénario « sans centrale photovoltaïque ».

2.2 Comprendre le détail du calcul du TIC

Les émissions de CO₂éq. d'une centrale solaire sont très principalement liées à la **production des équipements** qui constituent la centrale solaire (modules solaires, structures acier, onduleurs, câbles pour le raccordement, fondations béton, etc.) Généralement, ce poste d'émissions compte pour ~95% des émissions de GES de la centrale solaire. Ces émissions ont lieu **en amont** de la mise en service de la centrale solaire.

Viennent ensuite, dans l'ordre chronologique :

En amont de la mise en service de la centrale solaire

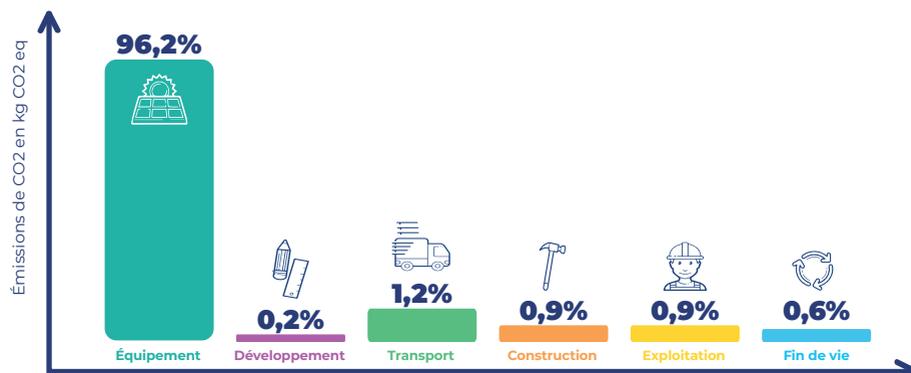
- Les émissions liées aux **activités de développement** de la centrale solaire (études) ;
- Les émissions liées aux **transports des équipements** depuis leurs lieux d'assemblage jusqu'au site de la centrale solaire ;
- Les émissions liées à la **construction de la centrale solaire** : travaux d'installation, construction des bâtis ;

Pendant la vie de la centrale solaire

- Les émissions liées à **l'exploitation de la centrale solaire** : consommation d'énergie de la centrale, gestion opérationnelle, entretien et nettoyage...

À la fin de la vie de la centrale solaire

- Les émissions liées au **démantèlement et fin de vie** : travaux de désinstallation, traitement des déchets béton et métaux.



Légende : Exemple des émissions de CO2 par poste, pour une centrale solaire au sol de plusieurs MW, Région PACA

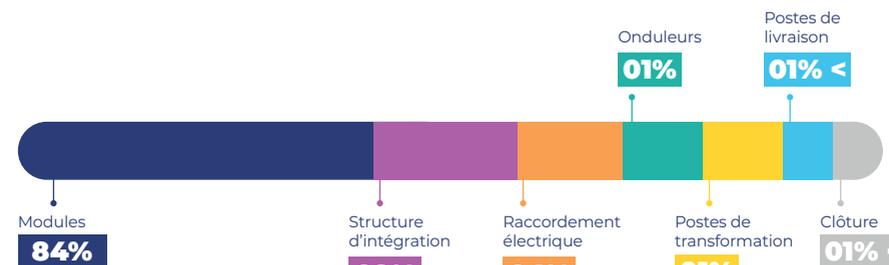
Temps

Ce sont en premier lieu les **modules photovoltaïques** qui font le bilan carbone des équipements de la centrale (entre 70 et 90 % généralement).

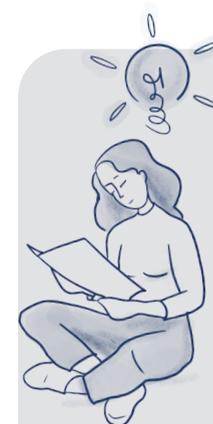
Vient ensuite le **poids des structures** d'intégration, généralement en acier – entre 7-10% (pour une centrale au sol) et 20% (pour une centrale en ombrière).

Le poids carbone du raccordement électrique varie fortement selon la distance de raccordement (et donc la quantité de câble cuivre ou aluminium utilisée) : de ~1% à près de 10% pour des raccordements nécessitant la pose de plusieurs dizaines de kilomètres de câble.

Vient ensuite l'empreinte carbone liée aux **onduleurs**, aux postes de transformation, aux postes de livraison et à la clôture entourant la centrale solaire.



Légende : Ordre de grandeur type pour une centrale au sol de 1 MWc en région PACA



Bon à savoir

Point d'attention : ne pas confondre taux d'impact carbone de la centrale solaire et bilan carbone du module photovoltaïque

Le taux d'impact carbone de l'électricité produite par la centrale solaire (exprimé en gCO2/kWh)

Calculé par **CVE**



Le bilan carbone du module solaire (exprimé en kgCO2/kWc) mesurant uniquement les émissions de GES de la centrale PV associées à la conception d'une partie des modules photovoltaïques

Demandé dans le cadre des AO CRE

Les émissions de GES des modules

 D'où proviennent ces émissions de GES ?

Elles proviennent de toutes les étapes de fabrication d'un module, depuis l'extraction du quartz jusqu'à l'assemblage des modules : purification du silicium (étape la plus consommatrice en énergie et la plus émettrice en GES), fabrication des cellules, fabrication du cadre en aluminium, fabrication du verre.

Remarque : le TIC CVE prend en compte les émissions de GES liées à l'étape amont d'extraction du quartz et de première purification du silicium jusqu'à la qualité SI-métallurgique, ainsi que les émissions de GES liées à la production du cadre en aluminium du panneau. Ces 2 étapes ne sont pas prises en compte dans les bilans carbone fournis par les fournisseurs de module pour les besoins de l'appel d'offres CRE.

Les émissions de GES des structures

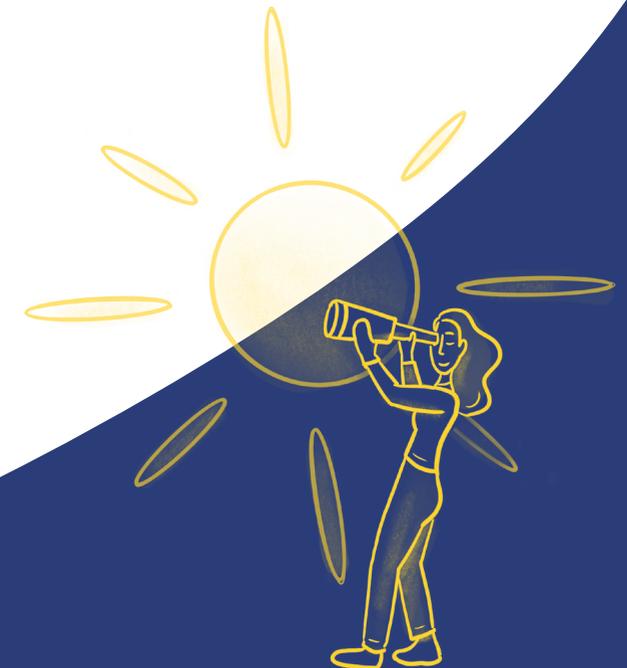
 D'où proviennent les émissions de GES de cet item ?

Elles proviennent principalement de la production des matériaux qui constituent la structure soutenant les modules solaires : acier et/ou aluminium et/ou bois traité. Dans une moindre mesure, les émissions de GES proviennent de « l'usinage » de ces matières premières pour produire les structures photovoltaïques : chauffage, stretching...

Les émissions de GES des fondations

 D'où proviennent les émissions de GES de cet item ?

Elles proviennent de la production des matériaux permettant de fixer au sol la structure d'intégration – il s'agit soit de béton, soit de matériaux à l'empreinte carbone faible ou nulle comme les pieux battus ou le gabion.



2.3 Les principaux enseignements du TIC

La majorité des émissions de GES de l'électricité produite par la centrale solaire résulte :

- Des émissions de GES liées à la **fabrication des modules photovoltaïques**. Celles-ci représentent généralement entre 60% et 80% de l'empreinte carbone de l'électricité produite par la centrale photovoltaïque.
- Des émissions de GES liées à la **fabrication des structures en acier** supportant les modules photovoltaïques. Celles-ci représentent généralement environ 9% de l'empreinte carbone de l'électricité produite par la centrale solaire.

Le **transport des équipements** (modules photovoltaïques, structures acier, équipements électriques...) depuis leurs lieux de production (Chine pour les modules solaires et les onduleurs généralement, Asie ou Europe pour les structures...) ne représente que quelques pourcents des émissions de GES de l'électricité produite par la centrale photovoltaïque. Ce résultat, non intuitif, résulte de l'empreinte carbone « raisonnable » du transport maritime.



Un trajet de Marseille à Lille en voiture émet plus de gaz à effet de serre (en vision « cycle de vie ») que le transport de 20 onduleurs de 100 kVA depuis le port de Shanghai jusqu'au port de Marseille en bateau.

L'empreinte carbone de l'électricité produite dépend fortement du productible de la centrale solaire. Le productible est la quantité d'électricité produite par unité de puissance installée, il dépend principalement du taux d'ensoleillement local.

Par exemple, prenons le cas de deux centrales solaires strictement identiques. La première centrale solaire, installée en Allemagne et disposant d'un productible de 1000kWh/kWc, produira une électricité 50% plus carbonée que la seconde centrale solaire installée dans le sud de la France et bénéficiant d'un productible de 1500 kWh/kWc.

Il n'est pas rare, pour des centrales solaires développées dans le cadre des appels d'offres CRE, et donc soumis à un plafond concernant l'empreinte carbone des modules photovoltaïques utilisés, d'atteindre une empreinte carbone de l'électricité produite de 20 à 25 gCO₂ / kWh. Ce résultat est à mettre en perspective avec le facteur d'émission moyen de l'électricité du réseau (mix électrique) en 2023 – 53 gCO₂eq/kWh).

NOS RÉPONSES À VOS QUESTIONS



« Prenez-vous en compte le changement d'affectation des sols ? »

L'outil TIC prend en compte les effets du changement d'affectation des sols, cependant il n'est pas comptabilisé d'émissions de CO₂eq lorsque le sol passe d'un statut «forêt ou prairie» à un statut «sol non imperméabilisé» de type pelouse.

Néanmoins, les hypothèses et la méthodologie les plus abouties proposées par l'ADEME en décembre 2023 sont en cours d'intégration dans l'outil pour une comptabilisation plus fine.

Cette évolution permettra une meilleure prise en compte de l'emprise du projet, l'occupation des sols (initiale et finale), les pratiques de chantier, d'exploitation et les mesures compensatoires mises en place.

Citation de la source : « Concernant l'artificialisation des sols, en première approximation, on ne retient pas de changement de stock de C dans les sols lorsque celui-ci devient un espace végétalisé (parc, jardin, pelouse de stade, etc.). Dans le cas des imperméabilisations des sols (construction de voirie, parking ou bâtiments) on appliquera par défaut une émission à hauteur du stock total de carbone contenu dans le sol. »

« Prenez-vous en compte les émissions de CO₂eq liées au recyclage des modules PV ? »

Concernant le **recyclage** des modules photovoltaïques, **3 options** sont possibles concernant la comptabilisation des émissions de CO₂eq associées :

- Considérer un **impact additionnel en termes d'émissions de CO₂eq** liées au processus de recyclage (la consommation d'énergie, l'utilisation de solvant, le transport des composants...) - principe du « pollueur payeur ».
- **Ne considérer aucun impact** en termes d'émissions de GES - Affectation des émissions liées au recyclage des modules solaires à l'utilisateur de la matière recyclée.
- **Considérer un impact CO₂eq négatif** : le recyclage permet d'éviter des émissions pour le futur utilisateur de la matière recyclée.

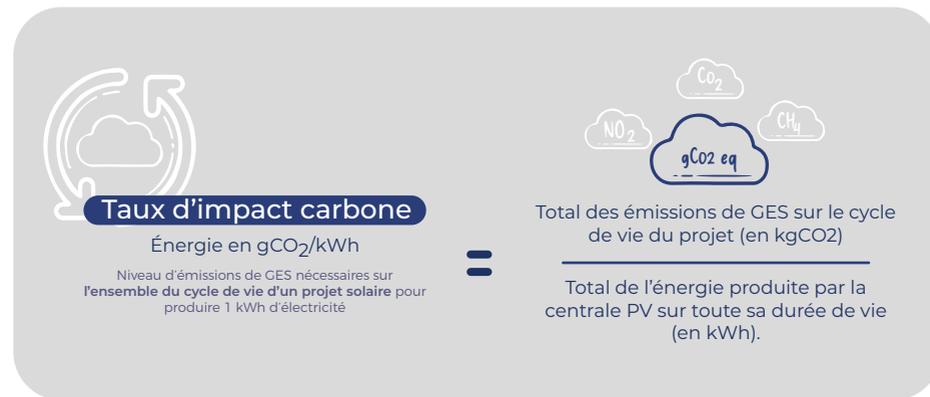
Suite à des échanges avec plusieurs **experts** indépendants et le **laboratoire** de recherche, **CVE a retenu l'option 2**. En effet, c'est la méthode de comptabilisation faisant le plus consensus parmi les experts de l'ACV : les émissions de CO₂eq liées au processus de recyclage sont d'une part faibles et d'autre part classiquement affectées à l'utilisateur de la matière recyclée. Le même raisonnement s'applique aux structures soutenant les modules photovoltaïques.

3

**LES LEVIERS
POUR
AMÉLIORER
LE BILAN
CARBONE
DE LA
CENTRALE
SOLAIRE**

3.1 Les macro-leviers pour améliorer le bilan carbone de la centrale solaire

Il existe 2 **macro-leviers** pour agir sur le **bilan carbone** de la centrale solaire.



Macro-levier #1 :
produire plus d'électricité,
à puissance photovoltaïque
installée constante (et donc
à émissions de GES quasi
constantes)

On agit sur le dénominateur

Macro-levier #2 :
diminuer les émissions
de GES poste par poste,
à puissance installée
constante et à énergie
produite constante

On agit sur le numérateur

Macro-levier#1 (Produire plus, à puissance installée constante), il peut se décomposer en 2 facteurs intrinsèques et 3 sous facteurs :

Le productible

- **La localisation du projet :** plus la zone géographique est ensoleillée, meilleure est la production solaire à puissance installée constante.
- **Le ratio AC/DC du projet : plus le ratio AC/DC* est élevé** (ratio de la puissance injectée sur le réseau par rapport à la puissance installée - dépend principalement des onduleurs installés et des contraintes réseau pour l'injection), meilleure est la production solaire à puissance installée constante.

La durée de vie du projet

- **Durée d'exploitation :** plus la centrale solaire est exploitée longtemps, meilleure est la production solaire à puissance installée constante.

*AC/DC Concernant courant alternatif/ courant continu

3.2 Les leviers d'amélioration, équipement par équipement

Ci-dessous sont présentés les leviers d'amélioration de l'empreinte carbone des principaux équipements.

MODULES PV

Comment réduire ce poste d'émissions ?

En choisissant des modules photovoltaïques au bilan carbone le plus faible possible grâce :

- À un processus de fabrication optimisé
- À l'utilisation de sources d'énergie bas carbone dans le processus de fabrication
- À un rendement optimum du panneau (plus de puissance pour la même quantité de matière)

Bon à savoir

La France a été le premier (et longtemps, le seul !) pays à demander aux fabricants de modules de communiquer et de certifier le bilan carbone de leurs modules (en kgCO₂/kWc), et à imposer un plafond (dans le cadre des AO CRE).

Un **meilleur rendement des panneaux** permet aussi d'améliorer le bilan carbone des structures, en **réduisant la quantité d'acier** nécessaire pour supporter les modules.

STRUCTURES

Comment réduire ce poste d'émissions ?

- Le **choix du pays de provenance** des matériaux (ex : l'acier recyclé indien est bien plus carboné que l'acier recyclé européen car l'électricité utilisée pour le produire est plus carbonée).
- L'utilisation de **matières recyclées ou « vertes »** (ex : acier vert produit avec de l'hydrogène vert ou aciérie avec captage du CO₂ dans les fumées)
- **L'éco-conception**, par exemple :
 - Les structures à faible poids, utilisant moins de matière
 - Les structures en bois (permettant également de s'affranchir des impacts environnementaux liés à l'extraction de matières premières dans les mines).

Bon à savoir

• L'empreinte carbone de **l'acier neuf** est en moyenne **7 fois plus faible** que celle de **l'aluminium neuf, mais 10 fois plus** élevée que celle du **bois** !

• **L'utilisation d'acier recyclé** à la place de l'acier neuf permet de réduire en moyenne le bilan carbone de la structure par un facteur 2,5.



FONDATIIONS

Comment réduire ce poste d'émissions ?

- Utilisation de **matériaux à bilan carbone faible**, voire nul (pieux battus, gabions) à la place du béton.
- **Minimisation du béton** utilisé lorsque ce matériau n'est pas substituable en échangeant avec le maître d'œuvre sur les leviers pour réduire la quantité de cette matière.

Bon à savoir

- La production d'une tonne de béton émet 159 kg de CO₂. Par ailleurs, les matériaux type pieux battus ont également un impact plus limité sur la biodiversité que le béton.
- Moins de béton et de métal utilisés pour les fondations et la clôture, c'est aussi moins de traitement pour ces matériaux en fin de vie.



Changeons notre vision de l'énergie

CVE est un producteur indépendant français d'énergies renouvelables. Nous développons, finançons et construisons des centrales solaires, des unités de méthanisation et des unités de production d'hydrogène vert pour les exploiter en propre dans la durée. Nous défendons un modèle d'énergies renouvelables territoriales, produites de façon décentralisée, et commercialisées en circuits courts.



Pourquoi nous choisir ?

Nos engagements

Expertise

Transparence

Proximité

Disponibilité

Excellence

CVE en quelques chiffres

500
collaborateurs

5
pays

1,2 Md
de bilan

165 000 t
CO₂eq : émissions de
GES évitées grâce à
nos installations

1 380 GWh d'énergies
renouvelables produites
(soit la consommation
de 610 000 habitants)



Changeons notre vision
de l'énergie



CONTACTEZ-NOUS !

 contact@cvegroup.com  www.cvegroup.com  CVE