

# Analyse de cycle de vie

## Centrale photovoltaïque Ahun Solaire SARL

### Ahun, France

### Enerparc Solaire SARL

Nom de la société	<b>Enerparc Solaire SARL</b> 15 rue de Bruxelles 75009 Paris, France
Projet photovoltaïque	<b>Ahun Solaire SARL</b> Ahun - 23001 <a href="#">Lien Google Maps</a>
Caractéristiques du projet	<b>Centrale sol</b> 15 753 kWc
Version du rapport	<b>Version v1.0</b> 02/12/2025
Auteur de l'étude	Antonin d'Aviau de Ternay <b>Kapstan</b> – 65 cours de la Liberté, 69003 Lyon, France <a href="mailto:contact@kapstan.fr">contact@kapstan.fr</a>

## Table des matières

I.	Glossaire .....	4
II.	Résumé des résultats.....	5
III.	Introduction.....	6
III.1	Contexte de l'étude.....	6
III.2	Présentation de la centrale photovoltaïque .....	6
III.3	Objectifs de l'étude.....	7
IV.	Périmètre et méthodologie d'étude.....	8
IV.1	Cadre méthodologique .....	8
IV.2	Unité fonctionnelle .....	8
IV.3	Périmètre de l'étude .....	8
IV.4	Hypothèses clés.....	9
IV.4.1	Général.....	9
IV.4.2	Lecture des graphiques .....	9
IV.4.3	Mix électrique de substitution .....	9
IV.4.4	Temps de retour énergétique .....	10
IV.4.5	Temps de retour carbone .....	11
IV.5	Données utilisées.....	12
IV.5.1	Données primaires.....	12
IV.5.2	Données secondaires .....	12
IV.6	Allocation et cut-off .....	12
IV.7	Limites et incertitudes .....	12
V.	Modélisation de l'installation.....	13
V.1	Synthèse des modélisations.....	13
V.2	Modélisations spécifiques .....	14
V.2.1	Module photovoltaïque.....	14
V.2.2	Onduleur .....	15
V.2.3	Structure.....	15
V.2.4	Route.....	16
V.2.5	Câble de raccordement .....	16
V.3	Productible .....	17
VI.	Changement d'usage des sols.....	18
VI.1	Principe .....	18
VI.2	Méthodologie.....	18
VI.3	Limites.....	19
VI.4	Données d'entrées.....	20
VI.5	Evolution des stocks par occupation des sols.....	21
VII.	Résultats et analyse.....	22

VII.1	Synthèse des résultats .....	22
VII.2	Inventaire et résultats détaillés .....	22
VII.3	Emissions évitées et potentiel de décarbonation .....	24
VII.4	Temps de retour carbone .....	25
VII.5	Temps de retour énergétique .....	25
VII.6	Analyse des résultats .....	26
VIII.	Mesures ERC .....	27
IX.	Analyse des résultats .....	28
Figure 1 :	Layout de la centrale .....	6
Figure 2 :	Exemple de lecture des graphiques .....	9
Figure 3 :	ECS PPE2 du module installé .....	14
Figure 4 :	Mapping de l'occupation des sols, Géoportail .....	20
Figure 5 :	Données d'entrée pour le changement d'usage des sols .....	20
Figure 6 :	Répartition des stocks par occupation des sols, scénario de référence .....	21
Figure 7 :	Répartition des stocks par occupation des sols, scénario projet .....	21
Figure 8 :	Résultats par sous-catégories .....	23
Figure 9 :	Potentiel de décarbonation, sans changement d'usage des sols .....	24
Figure 10 :	Potentiel de décarbonation, avec changement d'usage des sols .....	24
Figure 11 :	Modélisation du temps de retour carbone .....	25
Figure 12 :	Modélisation du temps de retour énergétique .....	25
Tableau 1 :	Synthèse des résultats .....	22
Tableau 2 :	Inventaire et résultats détaillés .....	22
Tableau 3 :	Résultats par sous-catégories .....	23

# I. Glossaire

<b>ADEME</b>	Agence de la transition écologique
<b>MRAe</b>	Missions régionales d'autorité environnementale
<b>AO</b>	Appel d'Offres
<b>CRE</b>	Commission de Régulation de l'Énergie in France
<b>ACV</b>	Analyse de Cycle de Vie
<b>GWP</b>	Global Warming Potential (Potentiel de réchauffement global)
<b>GES</b>	Un gaz à effet de serre est un gaz présent dans l'atmosphère qui retient une partie de la chaleur émise par la Terre, contribuant ainsi au réchauffement climatique. Les principaux GES sont le CO <sub>2</sub> , le méthane, le protoxyde d'azote et les gaz fluorés.
<b>CO<sub>2</sub>-éq</b>	L'équivalent CO <sub>2</sub> est utilisé pour comparer les émissions gaz à effet de serre sur la base de leur GWP, en convertissant leur quantité émise en la quantité équivalente de CO <sub>2</sub> ayant le même GWP.
<b>EPBT</b>	Energy payback time (Temps de retour énergétique)
<b>CPBT</b>	Carbon payback time (Temps de retour carbone)
<b>ERC</b>	« Eviter, réduire, compenser »
<b>PEF</b>	Product Environmental Footprint : méthode européenne standardisée pour mesurer et comparer l'empreinte environnementale d'un produit sur tout son cycle de vie

## II. Résumé des résultats

### ☀ Le projet en chiffres

- 15,7 MWc
- 26 ha environ de terrain
- 24 000 modules de 665 Wc
- 64 onduleurs
- 17 430 MWh/an

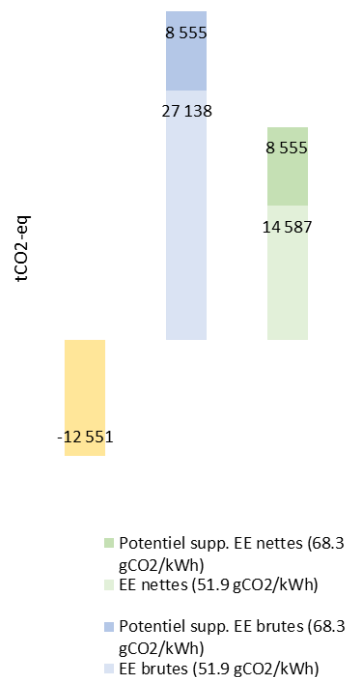
### CO<sub>2</sub> Empreinte

- 12 550 tCO<sub>2</sub> au total
- 24 gCO<sub>2</sub>/kWh

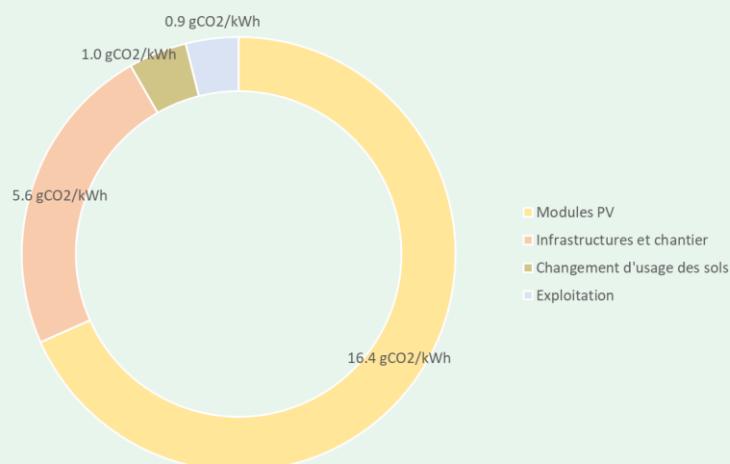
### 🕒 Temps de retour

- Carbone : entre 10 et 13 ans
- Énergétique : 11 mois

### 🌿 Potentiel de décarbonation



### ☁ Décomposition de l'impact carbone total de la centrale



# III. Introduction

## III.1 Contexte de l'étude

Cette Analyse de Cycle de Vie (ACV) a été réalisée dans le cadre du développement du projet de centrale photovoltaïque Ahun Solaire SARL, situé sur la commune de Ahun (code INSEE : 23001).

Elle vise à évaluer les impacts environnementaux associés à la production d'électricité photovoltaïque sur l'ensemble du cycle de vie de l'installation, conformément aux référentiels normatifs et aux recommandations de l'ADEME.

## III.2 Présentation de la centrale photovoltaïque

Le projet agrivoltaïque est situé dans le département de la Creuse (23) en région Nouvelle-Aquitaine, sur le territoire de la commune d'Ahun le long de la RD13 au niveau des lieux-dits « Beaugard » et « de la Côte », et est d'une puissance de 15,7 MWc. L'installation utilise des modules photovoltaïques à base de silicium cristallin, montés sur structures fixes orientées Sud. L'électricité sera injectée sur le réseau, avec une production annuelle estimée à 17 430 MWh.

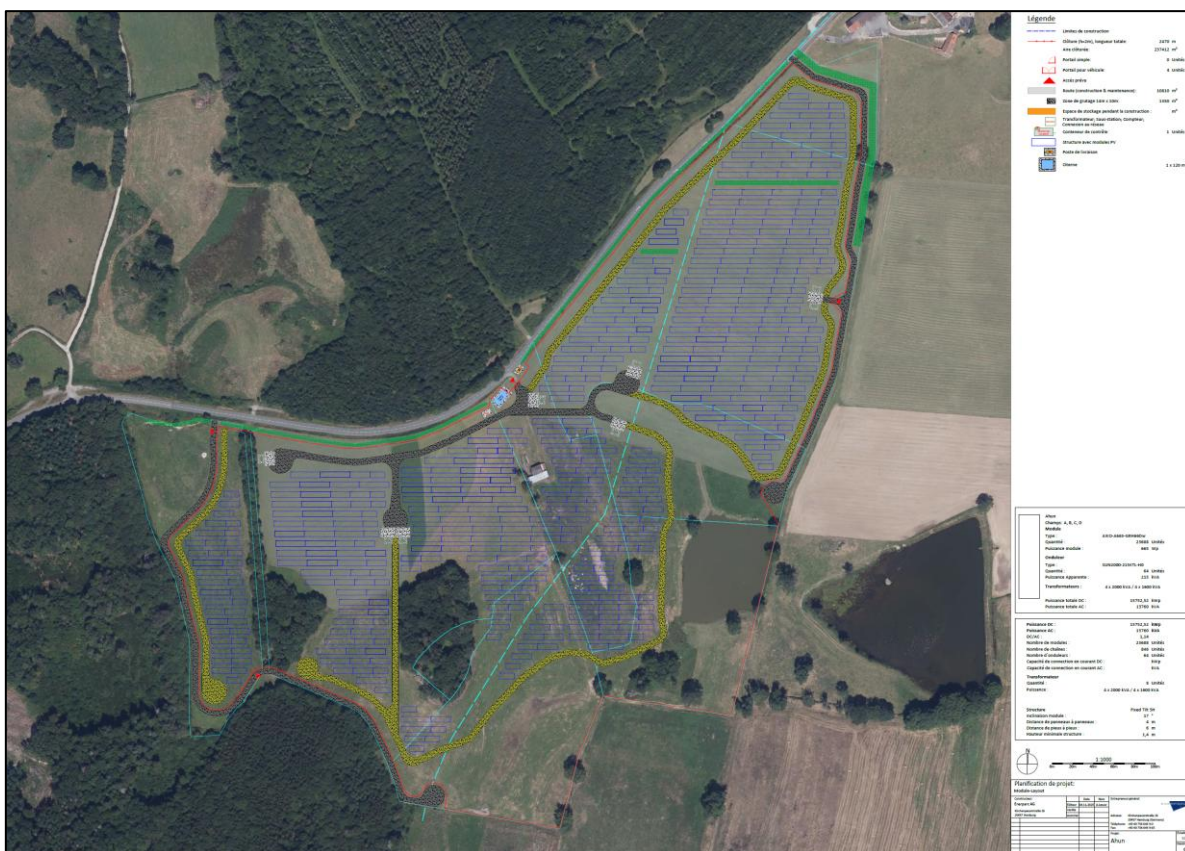


Figure 1 : Layout de la centrale

### III.3 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette ACV est de quantifier l'impact carbone associé à la centrale photovoltaïque sur l'ensemble de son cycle de vie — de la fabrication des modules à la fin de vie de l'installation — exprimé par unité fonctionnelle de 1 kWh d'électricité injecté dans le réseau.

Cette évaluation permet notamment de :

- Estimer le facteur d'émission carbone ( $\text{gCO}_2\text{éq/kWh}$ ) de l'électricité photovoltaïque produite ;
- Déterminer le temps de retour carbone et le temps de retour énergétique ;
- Identifier les leviers de réduction des impacts tout au long du cycle de vie.

Conformément au guide méthodologique de l'ADEME, l'étude intègre également les impacts liés aux changements d'usages des sols (stockage et déstockage du carbone dans les sols et la biomasse) ainsi que les mesures d'évitement, de réduction et de compensation (ERC) associées.

## IV. Périmètre et méthodologie d'étude

### IV.1 Cadre méthodologique

L'étude repose sur les principaux référentiels normatifs et sectoriels relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) des systèmes photovoltaïques :

- NF EN ISO 14040 – Management environnemental – Analyse du cycle de vie ;
- ISO 14067:2018 – Gaz à effet de serre – Empreinte carbone des produits ;
- IEA-PVPS T12-18: 2020 – Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity ;
- ILCD Handbooks – International Reference Life Cycle Data System ;
- Référentiel ADEME – Évaluer le bilan GES d'un projet photovoltaïque au sol ;
- Guide méthodologique du Ministère de la Transition Écologique – Prise en compte des émissions de gaz à effet de serre dans les études d'impact ;
- Guide méthodologique CAT-EnR – ADEME (v5.3, 2024) – pour l'intégration du changement d'usage des sols, du stockage de carbone dans les sols et la biomasse, et des mesures ERC associées.

L'étude est conduite selon une approche ACV mono-impact, centrée sur le changement climatique. Les résultats sont exprimés en kg CO<sub>2</sub> équivalent (kgCO<sub>2</sub>éq), sur la base de la méthode d'évaluation IPCC 2021 (100 ans).

### IV.2 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle retenue est 1 kWh d'électricité produite et injectée sur le réseau par la centrale photovoltaïque pendant sa durée de vie. Cette unité permet de comparer directement les impacts environnementaux de l'installation avec d'autres technologies de production d'électricité.

Les résultats sont également présentés pour la centrale complète et par kWc installé, afin de proposer d'autres options de lecture et comparaison.

### IV.3 Périmètre de l'étude

L'étude couvre le périmètre suivant :

Phase	Éléments	Inclus ou exclus du périmètre
Fabrication	Production des modules, structures, onduleurs, câbles et transformateurs, énergie et matières premières associées	Inclus
Transport et construction	Transport des équipements, installation, fondations, clôtures, postes et routes	Inclus
Exploitation et maintenance	Maintenance, nettoyage, remplacement d'équipements, production et consommation électrique	Inclus
Fin de vie	Démontage, transport, recyclage et élimination des déchets	Inclus
Changement d'usage des sols	Variation des stocks de carbone (sols, biomasse)	Inclus
Développement	Phase de conception et d'ingénierie non incluse (impact marginal)	Exclu
Toutes phases	Administration, marketing, R&D, déplacements personnels	Exclu

## IV.4 Hypothèses clés

### IV.4.1 Général

Les hypothèses principales retenues sont :

- Durée de vie de la centrale : 30 ans d'exploitation ;
- Taux de remplacement des équipements : 3 % des modules et 1 remplacement d'onduleur ;
- Indisponibilité de la centrale : 1,5%
- Coefficient de conversion en énergie primaire : 11,6 MJprim / kWh

### IV.4.2 Lecture des graphiques

Les graphiques sont faits de telle sorte que les points  $n$  en abscisses correspondent au début de l'année  $n+1$ . La zone située avant l'abscisse 0 représente l'année de chantier. La centrale commence à produire au début de l'année 0, qui correspond à sa première année de fonctionnement. A titre d'exemple :

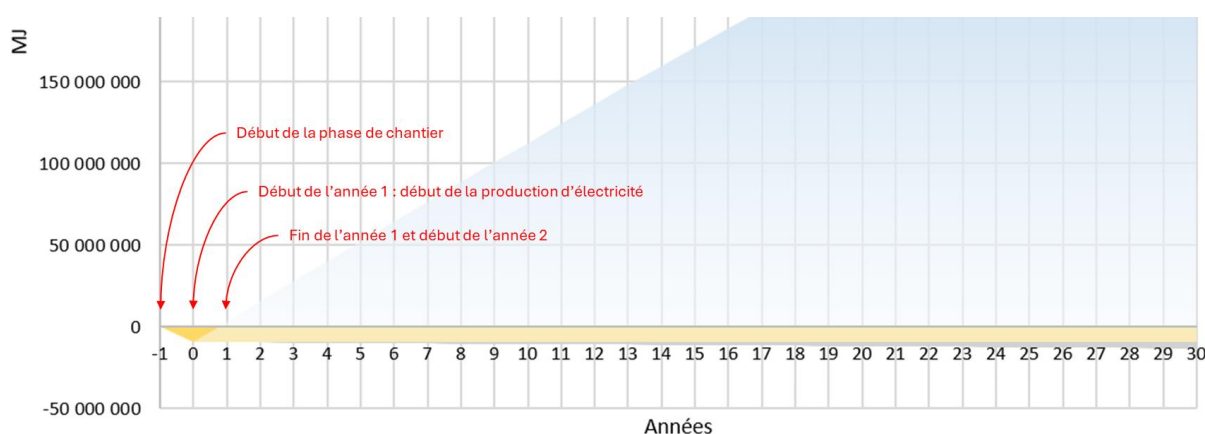


Figure 2 : Exemple de lecture des graphiques

### IV.4.3 Mix électrique de substitution

La détermination du mix électrique que l'électricité générée par le projet photovoltaïque est censée remplacer influence directement le calcul des émissions évitées, et donc sa pertinence environnementale. Le kWh photovoltaïque injecté sur le réseau peut substituer une électricité issue du mix français (fortement décarboné grâce au nucléaire) ou, dans une vision plus large, du mix européen, encore largement dépendant des énergies fossiles.

Kapstan propose plusieurs approches :

Approche	Description
Mix moyen français – Base Empreinte (ADEME, 2024) <b>52 gCO<sub>2</sub>/kWh</b>	Représente l'intensité carbone moyenne du kWh consommé en France, intégrant la production nationale et les échanges transfrontaliers. Cette approche est cohérente avec les référentiels les plus récents de l'ADEME.
Mix européen – Étude FTS (2020) <b>270 gCO<sub>2</sub>/kWh</b>	Représente le kWh européen selon le principe du merit-order, dans lequel le solaire y substitue principalement des centrales à gaz ou charbon.
Mix français recalculé – Étude FTS (2020) <b>68 gCO<sub>2</sub>/kWh</b>	Recalcule un kWh français "remplacé" à partir du mix européen de l'étude FTS, en intégrant le principe du merit-order. Cette approche, recommandée par Kapstan, est considérée réaliste et prudente pour les projets en France.
Mix spécifique	Dans le cas d'un projet où l'intensité carbone du mix remplacé est connue et argumentée.

Dans cette étude, les émissions évitées sont calculées sur la base d'un mix électrique remplacé :

- Mix moyen français (ADEME, 2024)
- Mix français recalculé (FTS, 2020)

#### IV.4.4 Temps de retour énergétique

Le temps de retour énergétique (EPTB<sup>1</sup>) correspond à la durée nécessaire pour qu'une centrale photovoltaïque produise, sous forme d'électricité, une quantité d'énergie équivalente à celle consommée pendant l'intégralité de son cycle de vie.

Le calcul du temps de retour énergétique suit la méthodologie définie dans le rapport IEA-PVPS T12-18:2020 *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity*, selon la formule suivante :

$$EPBT = \frac{E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{EOL}}{\left(\frac{E_{agen}}{\eta_G}\right) - E_{O\&M}}$$

Avec :

$E_{mat}$  : énergie primaire utilisée pour la fabrication des matériaux du système,

$E_{manuf}$  : énergie primaire pour l'assemblage et la production des composants,

$E_{trans}$  : énergie pour le transport des équipements,

$E_{inst}$  : énergie pour l'installation et la mise en service,

$E_{EOL}$  : énergie nécessaire à la gestion de fin de vie,

$E_{agen}$  : production électrique annuelle moyenne de la centrale,

$E_{O\&M}$  : énergie consommée pour l'exploitation et la maintenance,

<sup>1</sup> Energy payback time

$1/\eta_G$  : rendement moyen du réseau électrique (conversion primaire → énergie électricité), considéré égal à 11,6 MJ/kWh (3,6 MJ/kWh / 0,31<sup>2</sup>).

#### IV.4.5 Temps de retour carbone

Le temps de retour carbone (CPBT<sup>3</sup>) correspond à la durée nécessaire pour qu'une centrale photovoltaïque compense ses émissions de gaz à effet de serre générées sur l'ensemble de son cycle de vie, grâce aux émissions évitées par la production d'électricité renouvelable. Cet indicateur évalue la performance climatique nette du projet et sa contribution à la décarbonation du mix électrique.

La méthodologie appliquée est issue du rapport IEA-PVPS Task 12 – Report T12-18:2020 *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity*, section 3.5.3, qui propose un calcul analogue à celui du temps de retour énergétique (EPBT). Le CPBT compare ainsi les émissions de GES sur le cycle de vie complet du système photovoltaïque à la quantité annuelle d'émissions évitées lors de son fonctionnement :

$$CPBT = \frac{E_{total}}{(E_{mix\ remplacé} - E_{PV}) \times P_{annuelle}}$$

Avec :

$E_{total}$  : empreinte carbone total de la centrale photovoltaïque (gCO<sub>2</sub>éq), incluant fabrication, transport, installation, maintenance et fin de vie ;

$E_{PV}$  : empreinte carbone du kWh photovoltaïque (gCO<sub>2</sub>éq/kWh), incluant fabrication, transport, installation, maintenance et fin de vie ;

$E_{mix\ remplacé}$  : intensité carbone du mix électrique substitué (gCO<sub>2</sub>éq/kWh) ;

$P_{annuelle}$  : production annuelle de la centrale (kWh/an).

Le résultat, exprimé en années, indique le temps nécessaire pour que les bénéfices climatiques du projet deviennent positifs.

---

<sup>2</sup> Dans le rapport *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity* – IEA-PVPS T12-18:2015 (édition antérieure), il est indiqué en page 6 qu'un rendement de 0,31 est utilisé pour l'Europe de l'Ouest.

<sup>3</sup> Carbon payback time

## IV.5 Données utilisées

### IV.5.1 Données primaires

Les données primaires ont été collectées auprès du client par l'intermédiaire d'un fichier de collecte :

- Dimensionnement et caractéristiques des éléments (modules, onduleurs, structures, etc.) ;
- Productible ;
- Distance annuelle des agents de maintenance ;
- Scénarios de transport ;
- Surfaces et zonages liés changement d'usage des sols.

### IV.5.2 Données secondaires

Les données secondaires utilisées proviennent principalement, mais non exclusivement, des sources suivantes. Certaines d'entre elles ont pu être analysées sans être retenues dans la modélisation finale selon leur pertinence et disponibilité :

- Ecoinvent 3.11, dont certains jeux de données peuvent être modifiés par Kapstan, lesquels sont détaillés dans le rapport ;
- Base Empreinte ADEME ;
- Base ALDO qui centralise des données issues de différentes bases nationales (IGN, INRAE, etc.) ;
- Fiches environnementales comme les FDES, EPD, PEP, etc. ;
- ECS délivrée par Certisolis, relative au bilan carbone des modules photovoltaïques utilisés.

## IV.6 Allocation et cut-off

Conformément à la norme ISO 14044, l'allocation a été évitée autant que possible. Le principe du "cut-off" (contenu recyclé) est retenu par défaut : les bénéfices du recyclage futur ne sont pas comptabilisés.

## IV.7 Limites et incertitudes

L'étude présente certaines limites et incertitudes inhérentes aux ACV, et qui plus est dans le cadre de projets en développement :

- Incertitude sur les fournisseurs finaux et les origines exactes des composants ;
- Simplifications des données de transports ;
- Incertitude liée aux facteurs d'émissions ou aux données d'impact environnementale.

Cependant, Kapstan applique des hypothèses prudentes et cohérentes avec les recommandations des référentiels.

# V. Modélisation de l'installation

## V.1 Synthèse des modélisations

L'ensemble des postes inclus dans le périmètre de l'étude a été modélisé selon différentes approches. Le tableau présente les éléments du périmètre de l'étude et la méthode de modélisation retenue :

Famille	Élément	Modélisation
Infrastructure photovoltaïque	Module	IEA ou spécifique
	Onduleur	Spécifique, sur base de fiches environnementales
	Structure	Ecoinvent ou spécifique
	Raccordement au poste source	Spécifique
	Connexion électrique	Référentiel ADEME
	Transformateur	Référentiel ADEME
Infrastructure complémentaire	Route	Ecoinvent ou spécifique
	Local technique	Référentiel ADEME
	Clôture	Référentiel ADEME
Chantier	Installation	Référentiel ADEME
	Désinstallation	Référentiel ADEME
	Déboisement / débroussaillage	Spécifique
Exploitation	Nettoyage des modules	Référentiel ADEME
	Transport des agents de maintenance	Base empreinte ADEME
	Remplacement des équipements	Spécifique
	Consommation des onduleurs	Spécifique

Les modélisations spécifiques sont présentées ci-après.

# V.2 Modélisations spécifiques

## V.2.1 Module photovoltaïque

Quatre approches de modélisation peuvent être considérées :

Modélisation	Description
IEA-PVPS	Utilisation de l'inventaire IEA-PVPS sans modification. Les facteurs d'émission sont appliqués tels que définis dans la base de données d'origine. Résultat conservateur.
IEA-PVPS ajusté par Kapstan	Modèle IEA ajusté par Kapstan : actualisation des consommations énergétiques et des quantités de matériaux (verre, silicium, cadre) selon les benchmarks récents issus d'ACV menées par Kapstan dans le cadre des appels d'offres CRE.
Certificat ECS (méthodologie PPE2)	Modélisation à partir d'un certificat Certisolis. Les éléments non couverts sont ajoutés.
Fiche environnementale (FDES / EPD / PEP)	Utilisation d'une déclaration environnementale de produit. Le périmètre est adapté si nécessaire.

Dans le cadre de cette étude, la modélisation selon un ECS PPE2 a été retenue car le fabricant a ce document valide pour ce module spécifiquement.

Le document ci-dessous est un certificat ECS PPE2 :

**certisolis**  
TEST - CERTIFICATION PHOTOVOLTAÏQUE  
Evaluation Carbone simplifiée  
ECS PPE2 N°069-2025\_001

**Titulaire du certificat :** Zhuhai Fushan Aiko Solar Technology Co., Ltd.  
**Site(s) de production module :** Zhuhai Fushan Aiko Solar Technology Co., Ltd.  
**Site(s) de production cellules :** Zhuhai Fushan Aiko Solar Technology Co., Ltd.  
**Site(s) de production wafers :** Tianjin Huanzhi New Energy Technology Co., Ltd.

**Produits concernés (modules de la production courante) :**  
Modules Monocristallins : Aiko-Axxe-GRH60w (60W à 670W) - Bifacial (verre 112/112 cellules) (110mm x 182,2mm) ABC

**Méthodologie :**  
Calcul des charges des appels d'offres PPE2 portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire + Certisolis ou non + ECS modifié du 18/04/2023 - **à partir de la 2ème année** de l'énergie solaire + Certisolis sur bâtiments, serres, agritravel, hangars, ombrières et ombrières agrovoltaïques de puissance supérieure à 500 kWw + ECS modifié du 14/04/2023 - **valable à partir de la 2ème année**

**Informations :**  
Les calculs ont été effectués sur la base des valeurs par défaut (Tableau 3 - Valeurs des émissions de GES en CO2eq par la fabrication des composants) de la méthodologie citée ci-dessus à l'exception des valeurs des procédés de fabrication des composants suivants lesquelles sont issues d'une Analyse de cycle de vie récente.

N°ACV	Composant avec ACV récente	Site de production	GWPP issu d'ACV	Date édition attestation ADEME
GCL-S6-001_rev0	Polysilicium FBR	Xuzhou, Chine	30,401 kg CO2eq/kg	14/09/2023
T2S-SR-001_rev2	Polysilicium recyclé	Wuhou, Chine	0,267 kg CO2eq/kg	02/08/2024
T2S-SI-001_rev1	Lingot	Wuhou, Chine	14,790 kg CO2eq/kg	17/11/2023
T2S-BR-002_rev0	Brique	Yinchuan, Chine	0,596 kg CO2eq/m²	14/06/2024
T2S-PL-001_rev0	Wafers	Tianjin, Chine	3,258 kg CO2eq/m²	17/11/2023

Validité : Le Bourget du Lac, le 13 janvier 2025

Président  
Franck BARRUEL

**Produits concernés (modules de la production courante) :**  
Modules Monocristallins : Aiko-Axxe-GRH60w (60W à 670W) - Bifacial (verre 112/112 cellules) (110mm x 182,2mm) ABC

**Méthodologie :**  
Calcul des charges des appels d'offres PPE2 portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire + Certisolis ou non + ECS modifié du 18/04/2023 - **à partir de la 2ème année** de l'énergie solaire + Certisolis sur bâtiments, serres, agritravel, hangars, ombrières et ombrières agrovoltaïques de puissance supérieure à 500 kWw + ECS modifié du 14/04/2023 - **valable à partir de la 2ème année**

**Informations :**  
Les calculs ont été effectués sur la base des valeurs par défaut (Tableau 3 - Valeurs des émissions de GES en CO2eq par la fabrication des composants) de la méthodologie citée ci-dessus à l'exception des valeurs des procédés de fabrication des composants suivants lesquelles sont issues d'une Analyse de cycle de vie récente.

N°ACV	Composant avec ACV récente	Site de production	GWPP issu d'ACV	Date édition attestation ADEME
GCL-S6-001_rev0	Polysilicium FBR	Xuzhou, Chine	30,401 kg CO2eq/kg	14/09/2023
T2S-SR-001_rev2	Polysilicium recyclé	Wuhou, Chine	0,267 kg CO2eq/kg	02/08/2024
T2S-SI-001_rev1	Lingot	Wuhou, Chine	14,790 kg CO2eq/kg	17/11/2023
T2S-BR-002_rev0	Brique	Yinchuan, Chine	0,596 kg CO2eq/m²	14/06/2024
T2S-PL-001_rev0	Wafers	Tianjin, Chine	3,258 kg CO2eq/m²	17/11/2023

Validité : Le Bourget du Lac, le 13 janvier 2025

Président  
Franck BARRUEL

Figure 3 : ECS PPE2 du module installé

## V.2.2 Onduleur

L'impact environnemental des onduleurs a été modélisé à partir de fiches environnementales de type FDES, EPD ou PEP, selon la disponibilité des données pour le modèle réellement installé.

Deux approches sont possibles :

Modélisation	Description
Fiche environnementale spécifique	Utilisation directe d'une fiche environnementale correspondant exactement au modèle d'onduleur installé (marque, type, puissance).
Fiche environnementale équivalente	Utilisation d'une fiche environnementale issue d'un modèle proche lorsque la fiche du modèle exact n'est pas disponible. La sélection se base sur la technologie, la puissance nominale et le constructeur.

Dans le cadre de cette étude, la modélisation selon une fiche environnementale équivalente a été retenue car aucune fiche spécifique n'était disponible. Le document est une EPD d'un onduleur d'une puissance de 330 kVA, du même fabricant, contre 215 kVA installé dans le cadre du projet.

### Remarque – Module B6 (utilisation)

Les fiches environnementales incluent généralement le module B6, correspondant à la phase d'utilisation de l'onduleur (pertes électriques et consommation en veille). Dans cette étude :

- Les pertes électriques ont été exclues, car elles sont déjà intégrées dans le calcul du productible de la centrale ;
- Seule la consommation électrique en mode veille ("stand-by") a été conservée dans le périmètre B6.

Cette approche évite un double comptage des pertes d'énergie.

## V.2.3 Structure

Trois approches de modélisation ont été considérées pour représenter la structure porteuse de la centrale photovoltaïque :

Modélisation	Description
Données génériques Ecoinvent	Utilisation de l'inventaire Ecoinvent <i>market for photovoltaic mounting system, for 570kWp open ground module</i> par défaut, en l'absence d'informations spécifiques. Modélisation standard, représentative d'une structure moyenne en aluminium et béton.
Modélisation spécifique	Modèle construit à partir des quantités réelles de matériaux de la structure installée (acier, aluminium, fondations, etc.), selon les fiches techniques.
Fiche environnementale (FDES / EPD / PEP)	Utilisation d'une fiche environnementale disponible pour le modèle de structure concerné, ajustée si nécessaire.

Dans le cadre de cette étude, la modélisation spécifique 100% acier a été retenue car la composition était connue du développeur.

## V.2.4 Route

La modélisation des routes et pistes internes du site a été réalisée selon l'un des quatre scénarios suivants :

Modélisation	Description
Route lourde (Ecoinvent)	Modélisation basée sur le processus Ecoinvent <i>road construction</i> , représentatif d'une route bitumée à usage intensif.
Route légère	Variante de la route lourde, sans bitume, béton, acier ni gravier, représentant une piste sommaire en matériaux naturels compactés.
Route légère renforcée	Variante de la route lourde, sans bitume, béton ni l'acier, représentative d'une piste stabilisée renforcée.
Route spécifique	Modélisation fondée sur les quantités réelles de matériaux utilisées pour la construction des pistes internes, selon les données du projet.

Dans le cadre de cette étude, les hypothèses suivantes sont retenues :

- Route légère : 10 810 m<sup>2</sup>
- Route légère (pour la zone de grutage) : 590 m<sup>2</sup>

Un total de 13 740 m<sup>2</sup> pistes enherbées est réservé en cas de passage d'engins, mais n'a pas été modélisé dans l'étude étant donné que le sol ne subit aucun aménagement particulier.

## V.2.5 Câble de raccordement

Le câble de raccordement électrique entre la centrale et le réseau a été modélisé selon l'une des approches suivantes :

Modélisation	Description
Modélisation Kapstan	Modèle générique développé par Kapstan, basé sur le type de métal conducteur (cuivre ou aluminium) et le poids linéaire du câble. Adapté lorsque les données détaillées ne sont pas disponibles.
Modélisation spécifique	Construction d'un modèle à partir des quantités réelles de câbles et matériaux (longueurs, sections, types d'isolation, gaines), selon les données techniques du projet.
Fiche environnementale (FDES / EPD / PEP)	Utilisation d'une fiche environnementale correspondant à un modèle de câble ou transformateur représentatif, ajustée si nécessaire pour cohérence avec le périmètre ACV.

Dans le cadre de cette étude, la modélisation spécifique d'un câble 3G240 en aluminium a été retenue.

## V.2.6 Déboisement et débroussaillage

Le déboisement est modélisé uniquement à travers la consommation de carburant des engins utilisés, incluant la combustion directe et les émissions amont liées à la production du carburant. Deux niveaux d'intervention sont considérés :

Modélisation	Description
--------------	-------------

Débroussaillage léger	Utilisation de débroussailleuses, représentatif d'un entretien de végétation basse sans coupe ni extraction d'arbres.
Déboisement complet	Utilisation de bulldozers ou d'engins forestiers, correspondant à la coupe et au retrait complet d'une zone boisée avant aménagement.

Aucun déboisement ou débroussaillage n'est prévu.

## V.3 Productible

Le productible correspond à la quantité d'électricité produite annuellement par la centrale rapportée à la puissance installée, exprimée en kWh/kWc/an. Il est calculé et fourni par le client.

Le tableau ci-dessous présente la méthode, les hypothèses et les résultats du calcul de productible :

Hypothèses de dégradation	Dégradation LID	Non incluse dans le productible, 1% sur la base de la garantie fabricant
	Dégradation annuelle	Sur la base de la garantie fabricant si disponible
Production d'électricité	Productible sur l'année 1	1 209 kWh/kWc/an (hors LID)
	Production sur 30 ans d'exploitation	522 888 MWh

Le productible intègre déjà l'ensemble des pertes électriques du système (câbles, onduleurs, transformateurs, etc.). Ces pertes ont donc été exclues des consommations électriques des équipements dans les modélisations spécifiques, afin d'éviter tout double comptage.

A titre d'exemple, les pertes des onduleurs ou celles liées au transport de l'électricité dans les câbles ne sont pas reprises comme consommations supplémentaires. Ces consommations sont ainsi considérées nulles dans les modèles, ce qui garantit la cohérence du calcul du temps de retour énergétique de la centrale.

# VI. Changement d'usage des sols

## VI.1 Principe

Le changement d'usage des sols correspond à la transformation d'un type d'occupation (forêt, prairie, culture, friche, zone humide...) vers un autre dans le cadre du projet photovoltaïque. Cette transformation modifie les stocks de carbone présents dans les sols et la biomasse (végétation, racines, matières organiques), générant ainsi des flux de carbone vers ou depuis l'atmosphère.

Deux grands réservoirs sont concernés :

- **La biomasse vivante et morte** (végétation aérienne, racines, litière) qui capte ou relâche du carbone via la photosynthèse, la respiration et la décomposition des matières organiques ;
- **Le sol**, qui constitue un stock majeur de carbone sous forme de matière organique. Ce carbone peut être libéré sous forme de CO<sub>2</sub> par un processus appelé **respiration microbienne**. En effet, les micro-organismes du sol (bactéries, champignons) décomposent la matière organique et libèrent, entre autres, du CO<sub>2</sub>.

Ainsi, tout changement d'usage – même partiel – modifie l'équilibre entre stockage et émission de carbone.

Les zones humides représentent des réservoirs de carbone particulièrement importants : la saturation en eau limite la décomposition de la matière organique, permettant une accumulation progressive du carbone dans les couches profondes. Leur perturbation (drainage, assèchement, compactage) peut entraîner des émissions significatives et rapides de CO<sub>2</sub>.

## VI.2 Méthodologie

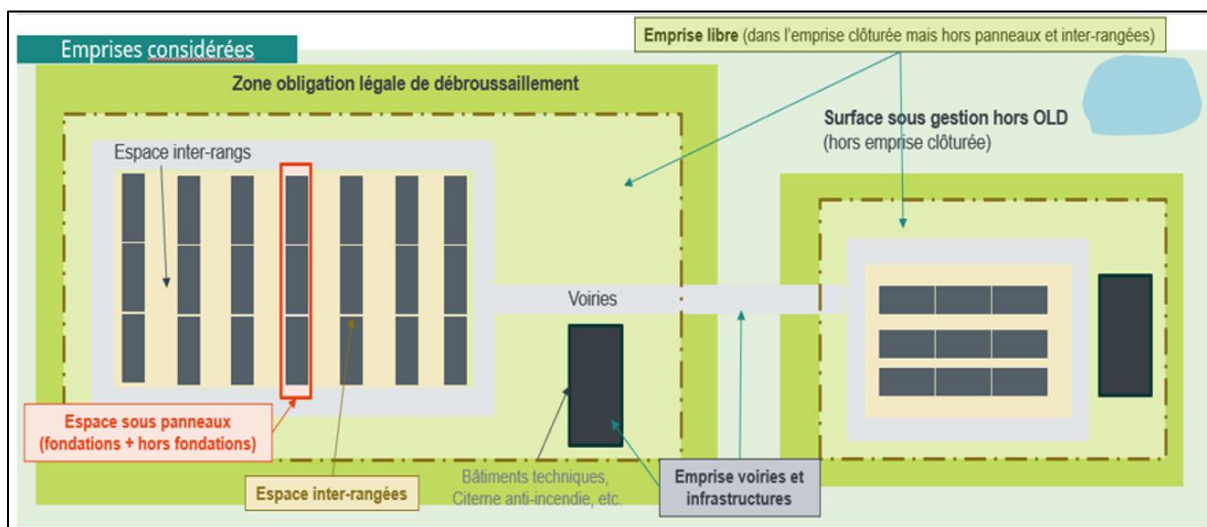
La méthodologie appliquée pour évaluer les flux de carbone liés aux changements d'usages des sols s'appuie sur :

- le guide pratique CAT'ENR – ADEME, qui définit les principes d'évaluation des impacts carbone des projets photovoltaïques au sol ;
- la base de données ALDO, qui fournit les valeurs moyennes de stocks de carbone par type d'occupation du sol et leur évolution temporelle.

L'évaluation repose sur la comparaison de deux scénarios pour chaque zone du projet :

Scénario	Description
Scénario de référence, en l'absence de projet	Représente l'évolution naturelle des milieux en l'absence de projet. Il correspond à la continuité de l'usage initial et à sa dynamique naturelle ou gérée sur la durée d'exploitation du projet.
Scénario projet	Représente la situation avec implantation de la centrale photovoltaïque, intégrant les travaux d'aménagement et la gestion prévue du site pendant l'exploitation.

Chaque zone de la centrale est identifiée et associée à un type d'usage du sol :



Le résultat global du changement d'usage des sols correspond à la somme des variations de stock de carbone pour l'ensemble des zones considérées, sur le temps de durée de vie du projet.

## VI.3 Limites

L'évaluation de l'impact du changement d'usage des sols reste soumise à plusieurs limites et incertitudes :

Source d'incertitude	Description
Échelle et nature des données	Les stocks initiaux de carbone sont estimés à partir de moyennes régionales ou nationales de la base ALDO. Ces valeurs peuvent différer des conditions locales réelles (type de sol, profondeur, humidité, pratiques passées).
Résolution spatiale	Les données d'occupation du sol proviennent de bases cartographiques nationales (ex. Corine Land Cover, 25 ha). Leur résolution et fréquence de mise à jour peuvent ne pas refléter les changements récents (artificialisation, incendies, reboisements).
Représentativité locale	Les résultats à l'échelle d'un projet doivent être considérés comme des ordres de grandeur et non comme des valeurs exactes. Ils peuvent être affinés par des données locales (inventaires forestiers, analyses pédologiques, études de terrain).
Dynamiques temporelles	Les cinétiques d'évolution des stocks (déstockage ou reconstitution) sont simplifiées et supposées linéaires sur la durée d'exploitation de la centrale (20 à 50 ans).
Effets indirects non pris en compte	Les phénomènes tels que la reforestation compensatoire, la recolonisation végétale ou l'évolution naturelle des milieux pendant l'exploitation ne sont pas inclus dans le calcul principal.
Changement climatique et gestion	Le modèle ne prend pas en compte les effets futurs du changement climatique ni les modifications de pratiques agricoles ou forestières.
Gaz autres que le CO <sub>2</sub>	L'évaluation porte uniquement sur le carbone organique. Les émissions de CH <sub>4</sub> et N <sub>2</sub> O sont intégrées uniquement pour les zones humides, leur occurrence étant marginale ailleurs.

## VI.4 Données d'entrées

L'évaluation du changement d'usage des sols repose sur la connaissance de l'état initial du site et de la répartition des différentes zones de la centrale photovoltaïque. Chaque zone du projet a été associée à un type d'usage du sol initial afin de déterminer les stocks de carbone correspondants à partir de la base ALDO.



Figure 4 : Mapping de l'occupation des sols, Géoportail

Les surfaces par type d'usage du sol sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Zones - Voir schéma ↑ <small>L'ajout de lignes est possible par <a href="#">insertion</a></small>	Superficie (Ha)	Etat initial		Scénario de référence	Scénario projet
		Occupation des sols	% surface en zone humide (Zh)	En l'absence du projet	Le plus représentatif du projet
Espace libre, herbe hors zone humide	5.40 ha	prairies zones herbacées	10%	prairies zones herbacées	prairies zones herbacées
Espace modules et inter-rang	11.11 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	prairies zones herbacées
Espace libre, bosquets	1.35 ha	forêt feuillu	30%	forêt feuillu	forêt feuillu
Emprise piste légères externes	0.63 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	sols artificiels imperméabilisés
Emprise piste légères internes	0.46 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	sols artificiels imperméabilisés
Emprise piste enherbée interne	1.37 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	sols artificiels enherbés
Emprise des citernes	0.01 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	sols artificiels imperméabilisés
Emprise transformateurs	0.01 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	sols artificiels imperméabilisés
Emprise poste de livraison	0.00 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	sols artificiels imperméabilisés
Emprise poste de contrôle	0.00 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	sols artificiels imperméabilisés
Emprise gravier	0.06 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	sols artificiels enherbés
Emprise zone humide interne	3.16 ha	zones humides		zones humides	zones humides
Emprise lac	0.77 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	prairies zones herbacées
Zones OLD	0.00 ha	prairies zones herbacées		prairies zones herbacées	prairies zones herbacées

Figure 5 : Données d'entrée pour le changement d'usage des sols

Ces données constituent les entrées principales du modèle d'évaluation et garantissent la traçabilité entre la cartographie du site et les résultats environnementaux du changement d'usage des sols.

## VI.5 Evolution des stocks par occupation des sols

Les résultats présentent la répartition des stocks de carbone par occupation finale des sols :

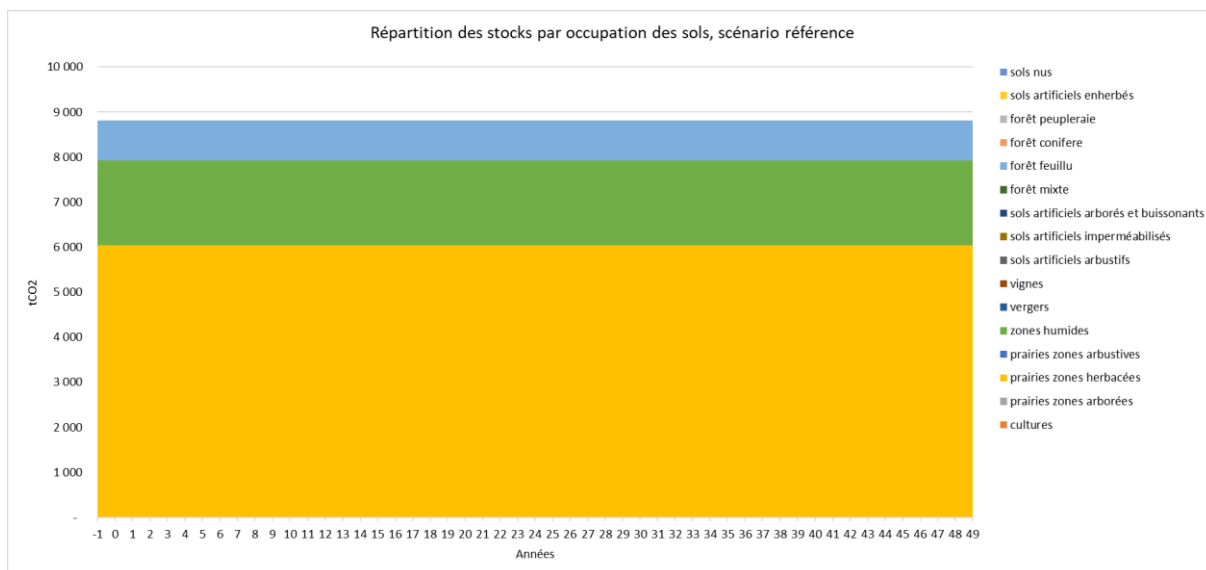


Figure 6 : Répartition des stocks par occupation des sols, scénario de référence

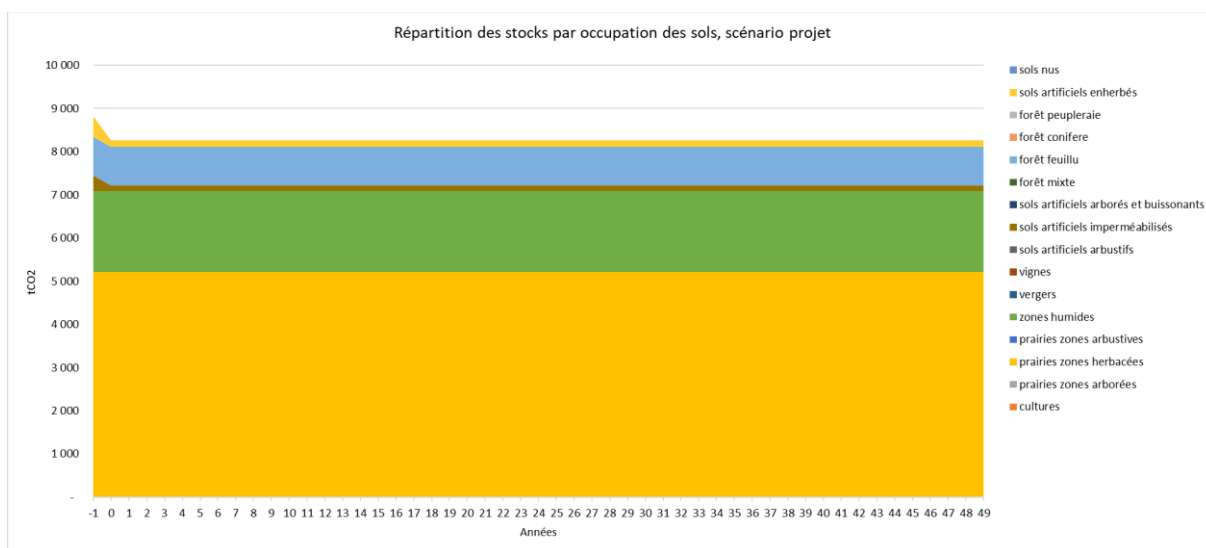


Figure 7 : Répartition des stocks par occupation des sols, scénario projet

# VII. Résultats et analyse

## VII.1 Synthèse des résultats

Les résultats de l'étude sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Indicateurs	Unités	Résultats	
		Sans changement d'usage des sols	Avec changement d'usage des sols
<b>Résultats de l'étude</b>			
Empreinte carbone de la centrale PV	kgCO <sub>2</sub> -eq total	12 003 035	12 550 586
	kgCO <sub>2</sub> -eq/kWc	762	797
	gCO <sub>2</sub> -eq/kWh	23	24
Empreinte carbone du module PV	kgCO <sub>2</sub> -eq/kWc		544
Nombre de modules PV	modules		23 688
Puissance installée	kWc		15 753
Durée de vie considérées	ans		30
Production totale sur 30 ans	MWh		522 888
Production annuelle sur 30 ans	MWh/an		17 430
Temps de retour énergétique	mois	11	11
<b>Emissions évitées, hypothèse de mix : 51.9 gCO<sub>2</sub>/kWh</b>			
Emissions évitées brutes	kgCO <sub>2</sub> -eq total		27 137 902
	kgCO <sub>2</sub> -eq/an		904 597
Emissions évitées nettes	kgCO <sub>2</sub> -eq total	15 134 867	14 587 316
	kgCO <sub>2</sub> -eq/an	504 496	486 244
Temps de retour carbone	ans	12.7	13.3
<b>Emissions évitées, hypothèse de mix : 68.3 gCO<sub>2</sub>/kWh</b>			
Emissions évitées brutes	kgCO <sub>2</sub> -eq total		35 693 159
	kgCO <sub>2</sub> -eq/an		1 189 772
Emissions évitées nettes	kgCO <sub>2</sub> -eq total	23 690 124	23 142 573
	kgCO <sub>2</sub> -eq/an	789 671	771 419
Temps de retour carbone	ans	9.6	10.0

Tableau 1 : Synthèse des résultats

## VII.2 Inventaire et résultats détaillés

Les données primaires et résultats de l'étude sont présentés ci-dessous pour chaque poste :

Impacts	Facteur d'impact		Quantités	Impact carbone				Énergie		Incertitude
	Dataset	unité		kgCO <sub>2</sub> total	kgCO <sub>2</sub> /kWc	gCO <sub>2</sub> /kWh	%	MJ total	%	
<b>Infrastructure photovoltaïque</b>				10 789 615	685	21	86%	170 023 981	91%	
Module	Modules, ECS PPE2	kWc	15 753	8 576 010	544	16.40	68%	139 540 014	74%	11%
Onduleur	Huawei - SUN2000-330KTL-H1, SUN2000-330KTL-H2 - hors utilisation	kVA	13 760	170 235	11	0.33	1%	2 301 722	1%	5%
Structure	Structure, modélisation spécifique	m <sup>2</sup>	63 986	1 028 013	65	1.97	8%	12 352 474	7%	32%
Raccordement au poste source	Raccordement, modélisation Kapstan	kg	77 683	602 306	38	1.15	5%	8 578 182	5%	12%
Connexion électrique	Photovoltaics, electric installation for 570kWp module, open ground	kWc	15 753	263 067	17	0.50	2%	4 524 358	2%	30%
Transformateur	Transformateur - ADEME	kVA	13 760	149 984	10	0.29	1%	2 727 232	1%	30%
<b>Infrastructure complémentaire</b>				572 088	36	1	5%	9 259 759	5%	
Route lourde	Route lourde	m <sup>2</sup> .a	-	-	-	0%	0%	-	0%	6%
Route légère	Route légère	m <sup>2</sup> .a	342 000	354 164	22	0.68	3%	7 073 658	4%	7%
Route légère renforcée	Route légère renforcée	m <sup>2</sup> .a	-	-	-	0%	0%	-	0%	7%
Route spécifique	Route spécifique	m <sup>2</sup> .a	-	-	-	0%	0%	-	0%	5%
Local technique	Local technique - ADEME	kWc	15 753	114 678	7	0.22	1%	882 929	0%	30%
Clôture	Clôture - ADEME	m	2 470	103 246	7	0.20	1%	1 303 172	1%	30%
<b>Chantier</b>				148 389	9	0	1%	145 364	0%	
Installation	Installation - ADEME	kWc	15 753	74 194	5	0.14	1%	72 682	0%	30%
Désinstallation	Désinstallation - ADEME	kWc	15 753	74 194	5	0.14	1%	72 682	0%	30%
Déboisement, carburant	Déboisement complet (bulldozer)	ha	-	-	-	0%	0%	-	0%	32%
Débroussaillage, carburant	Débroussaillage léger (débroussailluse)	ha	-	-	-	0%	0%	-	0%	32%
<b>Changement d'usage des sols</b>				547 550	35	1	4%	-	0%	
Flux de carbone, biomasse	Flux de carbone lié au changement d'usage des sols à 30 ans, biomasse	ha	24	-	-	0%	0%	-	0%	30%
Flux de carbone, sol et lièbre	Flux de carbone lié au changement d'usage des sols à 30 ans, hors biomasse	ha	24	547 550	35	1.05	4%	-	0%	30%
<b>Exploitation</b>				492 944	31	1	4%	8 185 803	4%	
Nettoyage des modules	Nettoyage - ADEME	m <sup>2</sup>	63 986	12 157	1	0.02	0%	236 939	0%	30%
Transport des agents de maintenance	Voiture - motorisation moyenne - 2018, France continentale, Base Carbone	km	225 000	49 050	3	0.09	0%	517 500	0%	30%
Remplacement des modules	Modules, ECS PPE2	kWc	473	257 280	16	0.49	2%	4 186 200	2%	11%
Remplacement des onduleurs	Huawei - SUN2000-330KTL-H1, SUN2000-330KTL-H2 - hors utilisation	kVA	13 760	170 235	11	0.33	1%	2 301 722	1%	5%
Consommation "standby" des onduleurs	Huawei - SUN2000-330KTL-H1, SUN2000-330KTL-H2 - utilisation standby	an.pcs	1 920	4 221	0	0.01	0%	943 442	1%	5%

Tableau 2 : Inventaire et résultats détaillés

Les résultats de l'étude sont présentés ci-dessous pour chaque sous-catégorie :

Catégories et sous-catégories	Impact carbone				Energie	
	kgCO2 total	kgCO2/kWc	gCO2/kWh	%	MJ total	%
<b>Construction et fin de vie</b>						
Module	8 576 010	544	16.4	68%	139 540 014	74%
Onduleur	170 235	11	0.3	1%	2 301 722	1%
Structure	1 028 013	65	2.0	8%	12 352 474	7%
Connexion électrique	1 015 357	64	1.9	8%	15 829 772	8%
Routes	354 164	22	0.7	3%	7 073 658	4%
Autres	217 924	14	0.4	2%	2 186 101	1%
Installation/désinstallation	148 389	9	0.3	1%	145 364	0%
Défrichage	-	-	-	0%	-	0%
<b>Exploitation</b>						
Maintenance	61 207	4	0.1	0%	754 439	0%
Remplacement	427 515	27	0.8	3%	6 487 922	3%
Consommation onduleurs	4 221	0	0.0	0%	943 442	1%
<b>Usage des sols</b>						
Flux de carbone, biomasse	-	-	-	0%	-	0%
Flux de carbone, sol et litière	547 550	35	1.0	4%	-	0%

Tableau 3 : Résultats par sous-catégories

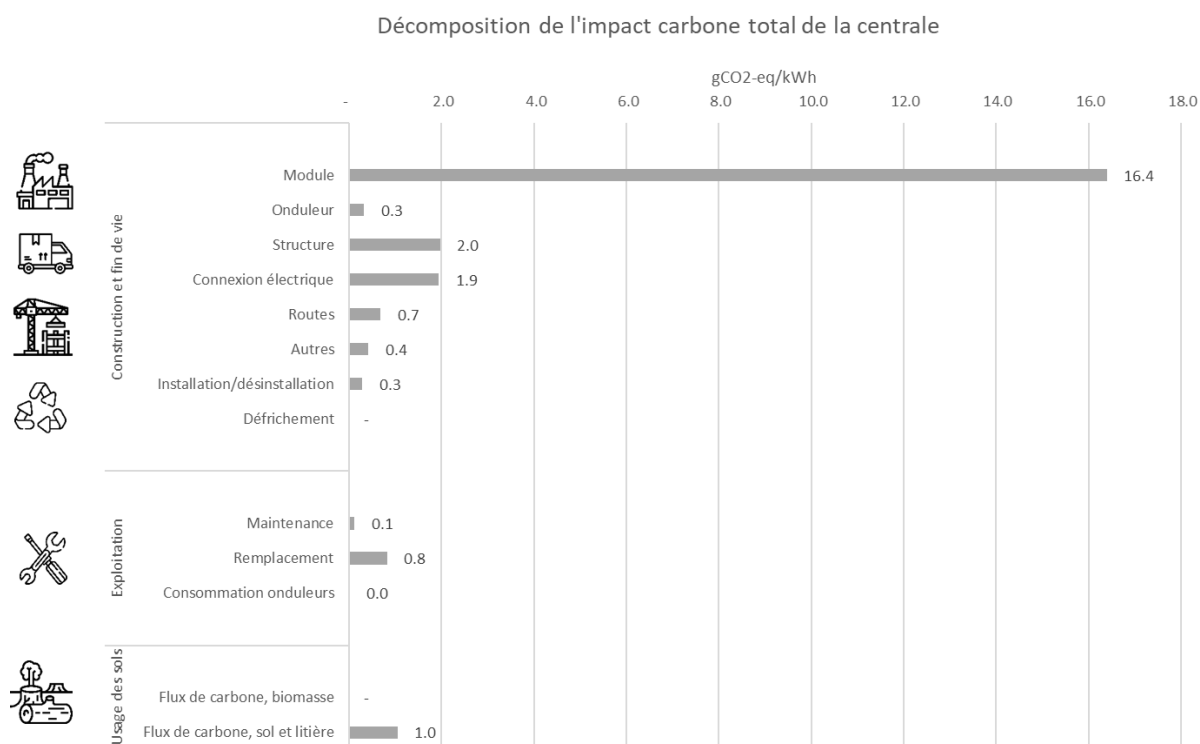


Figure 8 : Résultats par sous-catégories

## VII.3 Emissions évitées et potentiel de décarbonation

Les graphiques ci-dessous présentent le potentiel de décarbonation du projet, directement illustré par les émissions évitées nettes, avec ou sans prise en compte du changement d'usage des sols :

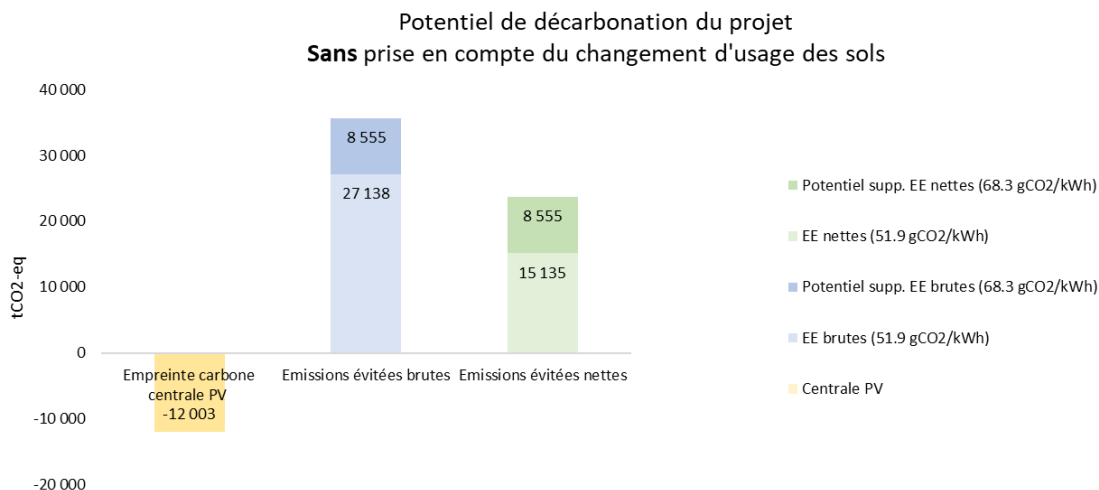


Figure 9 : Potentiel de décarbonation, sans changement d'usage des sols

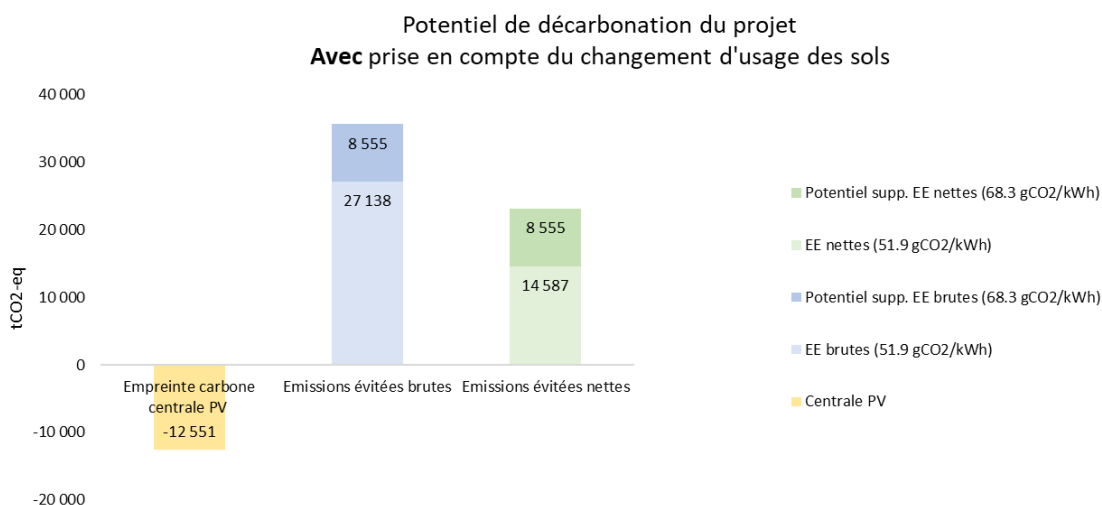


Figure 10 : Potentiel de décarbonation, avec changement d'usage des sols

## VII.4 Temps de retour carbone

Le temps de retour carbone du projet est de 10 ou 13 ans selon le mix électrique de comparaison, et est illustré par le graphique ci-dessous :

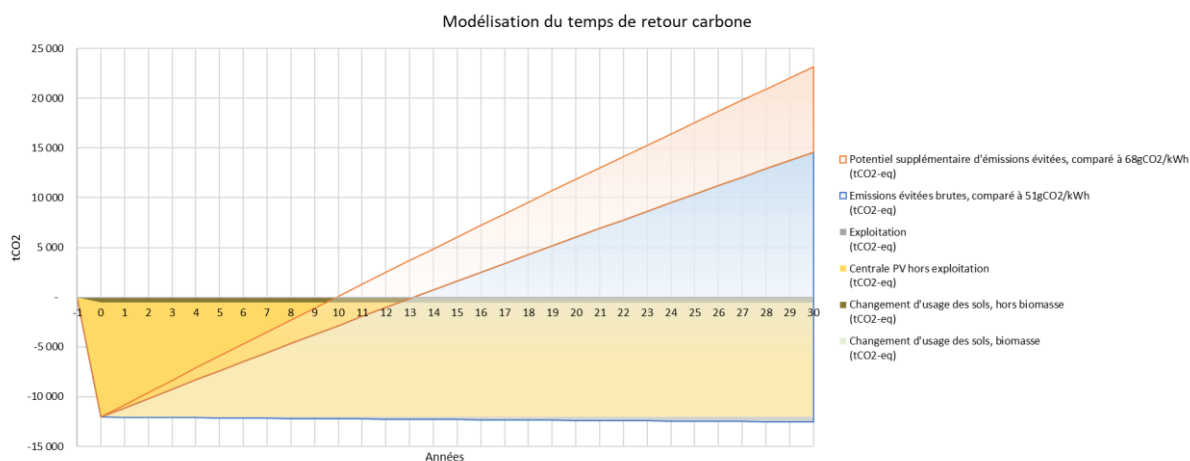


Figure 11 : Modélisation du temps de retour carbone

## VII.5 Temps de retour énergétique

Le temps de retour énergétique du projet est de 11 mois, et est illustré par le graphique ci-dessous :

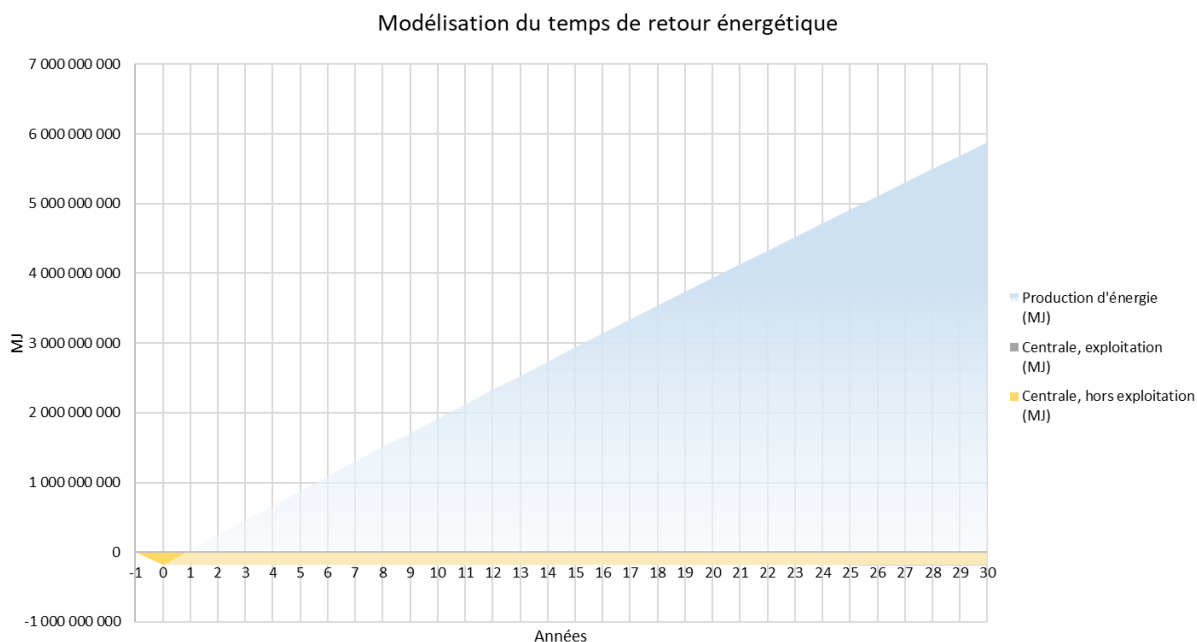


Figure 12 : Modélisation du temps de retour énergétique

## VII.6 Analyse des résultats

Les résultats sont cohérents avec :

- L'ACV réalisée par FTS pour une centrale PV en France en 2020 : 32 gCO<sub>2</sub>eq/kWh
- La valeur moyenne de la Base Empreinte de l'ADEME : 44 gCO<sub>2</sub>eq/kWh

Les différences entre ces études et l'étude actuelle proviennent principalement du fait que la modélisation du module photovoltaïque est basée sur des données provenant de fiches environnementales spécifiques aux modules installés – certificat ECS – contrairement aux 2 études mentionnées ci-dessus.

## VIII. Mesures ERC

Afin de limiter l'impact du projet sur le changement climatique, les actions suivantes ont été mises en place :

- Choix d'un module photovoltaïque ayant une empreinte carbone compétitive
- Réflexion en cours pour choisir une autre technologie de modules plus puissante permettant de réduire le bilan carbone par kWh produit
- Aucun déboisement ou débroussaillage
- Conservation des bosquets et haies existants sur le site
- Aucun déboisement ou débroussaillage
- Préservation de toutes les zones humides
- Préservation de l'étang au sein du site pour abreuver les bêtes
- Création de plusieurs haies aux abords et au sein du site
- Projet ne nécessitant pas de construction de route lourde bitumée

## IX. Analyse des résultats

### **Pertinence**

Kapstan a réalisé de nombreuses études ACVs multicritères dans le domaine photovoltaïque. La catégorie d'impacts « changement climatique » est l'indicateur qui ressort en premier lors d'une normalisation des indicateurs selon la méthodologie PEF.

La deuxième catégorie est celle de « l'épuisement des ressources naturelles » liée à la consommation d'énergie fossile et de métaux (cuivre, argent, aluminium) pour la fabrication des composants de la centrale. Cette catégorie est un enjeu au niveau de la filière dans son ensemble et sur lequel un développeur de projets a peu de visibilité ou de pouvoir de décision.

Il est donc pertinent d'analyser la pertinence environnementale d'un projet photovoltaïque selon la catégorie d'impacts « changement climatique ».

### **Complétude**

L'étude intègre toutes les émissions de GES pertinentes.

### **Cohérence**

Les résultats de l'étude sont cohérents avec d'autres études récentes menées par Kapstan dans le domaine du photovoltaïque. Toute donnée importante ou critique est vérifiée.

### **Exactitude**

Le niveau d'incertitude des données primaires (dimensionnement de la centrale et productible) est faible car le développement du projet est suffisamment avancé. Le niveau d'incertitude des données primaires (ACV, référentiel méthodologique sectorielle ou base de données Ecoinvent) est faible.

### **Transparence**

Les méthodes de calculs, hypothèses, sources de données utilisées et incertitudes associées au calcul des émissions et aux différents scénarios utilisés sont inclus dans ce rapport afin d'assurer un niveau suffisant de transparence.