

Bilan Carbone de la centrale photovoltaïque flottante de Bischoffheim

L'énergie photovoltaïque est qualifiée d'énergie renouvelable car elle utilise l'énergie inépuisable fournie par le soleil. Une centrale photovoltaïque n'émet ni gaz à effet de serre ni particules en phase exploitation. Ainsi, le photovoltaïque contribue grandement à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

L'étude d'impact environnemental du projet estime le gain en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) à **204 tonnes de CO₂ équivalent par an**. Le temps de retour du projet en termes de gaz à effet de serre est évalué à partir du bilan carbone du projet et des émissions de gaz à effet de serre évitées grâce au projet.

Cette analyse est présentée ci-dessous.

I. Gain final obtenu en matière d'émission de gaz à effets de serre

I.1. Quantification des émissions de gaz à effet de serre émises par le projet

La méthodologie développée ci-dessous est celle de l'**Analyse de cycle de vie** (ACV).

Méthodologie retenue

Comme recommandé dans le guide méthodologique sur la prise en compte des émissions de gaz à effet de serre dans les études d'impact, publié par le Ministère de la Transition écologique (février 2022), les gaz à effet de serre pris en compte dans le recensement des émissions sont ceux identifiés dans le cadre des accords internationaux sur le climat, retenus dans l'accord de Paris, à savoir :

- Le dioxyde de carbone (CO₂)
- Le méthane (CH₄)
- Le protoxyde d'azote (N₂O)
- Les hydrofluorocarbures (HFC)
- Les perfluorocarbures (PFC)
- L'exafluorure de soufre (SF₆)
- Le trifluorure d'azote (NF₃)

Dans le cadre de l'analyse qui suit, les émissions de chaque gaz à effet de serre sont converties en une unité commune, à savoir la tonne équivalent CO₂ (tCO₂eq) ou ses multiples (kgCO₂eq, gCO₂eq, etc.). Cette conversion, réalisée grâce aux pouvoirs de réchauffement global (PRG) de chaque gaz, permet d'ajouter la contribution à l'augmentation de l'effet de serre de chaque gaz et ainsi de mesurer leur impact global.

Les impacts unitaires de chaque composant et phase recensé lors du bilan carbone qui suit s'appuient sur le retour d'expérience de Générale du Solaire et de la filière photovoltaïque, ainsi que les données du référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'Analyse Cycle de Vie développée par l'ADEME (2013).

La durée d'exploitation de la centrale photovoltaïque retenue dans les calculs qui suivent est **de 30 ans**.

Tableau 1 – Éléments du projet émetteur de gaz à effet de serre

Modules photovoltaïques	Fabrication des modules
	Transport des modules
	Nettoyage des panneaux
Autres composants de la centrale	Transformateurs
	Flotteurs et câbles d'amarrages
	Connexion électrique
	Voiries
	Clôture
Autres consommations énergétiques liées au projet	Phase de développement
	Phase de construction
	Phase d'exploitation
	Phase de démantèlement

Les modules photovoltaïques

Comme précisé dans l'étude d'impact environnemental, le choix final du type de modules photovoltaïques ne pourra être réalisé qu'avant le début du chantier, en raison des possibles évolutions technologiques et économiques de la filière photovoltaïque d'ici à l'obtention des autorisations administratives du projet. La réalisation du bilan carbone implique ainsi d'émettre des hypothèses basées sur les informations disponibles aujourd'hui.

Bien qu'un module photovoltaïque n'émette pas de gaz à effet de serre lorsqu'il produit de l'électricité, il en émet lors de sa fabrication, de son transport et de sa maintenance.

- **Fabrication des modules**

L'étape de fabrication est la plus émettrice. Afin de recenser les émissions liées à cette étape, Générale du Solaire s'appuie sur la méthodologie de l'évaluation carbone simplifiée précisée dans le cahier des charges des appels d'offres de la Commission de Régulation de l'Energie (CRE). Cette méthodologie inclut les éléments suivants :

- La fabrication du silicium
- La fabrication du lingot
- La fabrication de la plaquette (wafer)
- La fabrication du module
- La fabrication du verre et du verre trempé
- La fabrication de l'EVA, du PET et du PVF

Ainsi, les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication des modules, calculée sur la base de la « méthode CRE », sont de **319 kgeqCO₂/panneau**.

A ce chiffre doivent également être ajoutées les émissions de gaz à effet de serre liées à l'acheminement des modules jusqu'au site et au nettoyage des panneaux en phase d'opération.

- **Transport des modules**

La provenance exacte des panneaux photovoltaïques ne peut être précisée à ce stade. Dans une optique conservatrice, il a été choisi de prendre la solution la plus impactante, à savoir des panneaux en provenance de Chine. A noter toutefois que le maître d'ouvrage étudiera attentivement les options européennes et françaises lors du choix final des modules.

Selon cette hypothèse, les panneaux seront acheminés par fret maritime entre la Chine et le port de Fos-sur-Mer, puis par fret routier entre le port de Fos-sur-Mer et le site du projet.

Tableau 2 – Impact carbone du transport des modules photovoltaïques

Transport	Distance parcourue (km)	Poids (t)	Facteur d'émission (kgCO ₂ eq/tonne.km)	Impact (tCO ₂ eq)
Fret maritime	16 000	2 000	0,003*	96
Fret routier	800	2 000	0,1*	160

Total	256
--------------	------------

* données du Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, disponibles en ligne : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/thema_essentiel_22_les_couts_environnementaux_du_transport_maritime_domestique_de_marchandises_octobre_2022.pdf

- **Nettoyage des panneaux**

Lors de la phase d'exploitation, les modules photovoltaïques sont nettoyés à l'eau, les technologies actuelles utilisant entre 0,25 litre et 0,6 litre par m² de panneaux. En estimant une opération de nettoyage par an, le facteur d'émission de la réalisation de cette opération est de 0,06 kgCO₂eq/m². Les émissions de gaz à effet de serre liées à ce poste seront donc d'environ **7,38 tCO₂eq**.

Tableau 3 – Impact carbone des modules photovoltaïques

Eléments	Impact unitaire (kg CO ₂ eq/panneaux)	Nombre	Impact (tCO ₂ eq)
Fabrication des modules photovoltaïques	319	38 100	12 153,9
Transport des modules photovoltaïques			256
Nettoyage des panneaux	0,06 kgCO ₂ eq/m ²	123 000	7,38
Total pour les modules photovoltaïques			12 417,28

Autres composants de la centrale

Les émissions de gaz à effet de serre des autres composants du projet ont également été calculées en prenant en compte leur cycle de vie (extraction des matières premières, fabrication, transport, opération et fin de vie).

Tableau 3 – Impact carbone des différents composants du projet (hors modules photovoltaïques)

Composants	Impact unitaire (kg CO ₂ eq)	Nombre*	Impact (tCO ₂ eq)
Onduleurs	226 800	5	1 134
Transformateurs	450 780	6	2 704,68
Flotteurs et câbles d'amarrages	43,2 par m ² de panneaux	123 000	5 313,6
Connexion électrique	70,1 par kWc	22 000	1 542,2
Voiries	35,8 par km	0 km (réutilisation de la voirie existante)	0
Clôture	41,8 par ml	0 km (clôture déjà existante)	0
Total pour les composants hors modules photovoltaïques			10 694,48

*Les nombres exacts seront déterminés ultérieurement, en phase pré-construction. Le chiffre indiqué est donc une estimation qui n'engage pas le maître d'ouvrage dans le dimensionnement de la centrale.

Autres consommations énergétiques liées au projet

Afin de réaliser l'ACV du projet, les consommations énergétiques des différentes phases du projet doivent être ajoutées aux émissions des composants précédemment calculées.

- **Phase de développement :**

Le principal poste d'émission de gaz à effet de serre lié à la phase de développement correspond aux déplacements des développeurs et des équipes de bureaux d'études sur le site. Compte tenu du faible facteur d'émission de ces déplacements et de leur nombre relativement peu élevé, la phase de développement n'engendrera pas d'émissions significatives pour le bilan carbone total de la centrale.

- **Phase de construction**

Les émissions de gaz à effet de serre liées à la construction du projet sont principalement attribuables à l'utilisation des véhicules nécessaires au chantier. Le référentiel de l'ADEME (2013) propose un facteur d'émission de 4,71 kgCO₂eq/kWc. Ainsi, l'impact total de ce poste sera d'environ **103,62 tCO₂eq**.

- **Phase d'exploitation :**

La production d'électricité à partir des panneaux photovoltaïques n'émettant pas de gaz à effet de serre, la phase d'exploitation est très peu émettrice. Les seules émissions sont liées aux déplacements réalisés pour la maintenance de la centrale.

L'impact unitaire d'un déplacement est d'environ 0,25 kgCO₂/km. En estimant 2 déplacements annuels de 50 km en moyenne pendant les 30 ans d'exploitation de la centrale, la maintenance engendrera environ **0,75 tCO₂eq**.

- **Phase de démantèlement :**

La phase de démantèlement de la centrale photovoltaïque aura un bilan carbone similaire à la phase de construction, le premier poste d'émission étant également l'utilisation de véhicules de chantier. Ainsi, l'impact total de la phase de démantèlement est estimé à **103,62 tCO₂eq**.

[Bilan carbone du projet](#)

Tableau 4 – Impact carbone total du projet

Phase	Impact (tCO ₂ eq)	Part relative
Fabrication des modules photovoltaïques	12 417,28	53,2%
Fabrication des autres composants	10 694,48	45,9%
Phase développement	Non significatif	<0,001%
Phase construction	103,62	0,44 %
Phase exploitation	0,75	<0,01 %

Phase démantèlement	103,62	0,44 %
Bilan carbone du projet	23 319,75	100 %

Ainsi les émissions de gaz à effet de serre liées à l'ensemble de la durée de vie du projet sont évaluées à 23 319,75 tCO₂eq.

De plus, la production annuelle de la centrale attendue est d'environ **23,8 GWh/an**, soit une production d'environ **714 GWh** sur sa durée de vie minimum (30 ans). Le taux d'émissions de l'électricité produite par le parc photovoltaïque de Bischoffsheim est donc estimé à **32,7 gCO₂/kWh**.

I.2. Emissions de gaz à effet de serre évitées grâce au projet

Afin de mettre en lumière l'impact carbone net du parc photovoltaïque de Bischoffsheim, il est utile de comparer les émissions émises par le projet aux émissions du mix électrique dans lequel la nouvelle centrale s'intègre. Le mix électrique correspond à la répartition des différentes sources d'énergies utiles à la production de l'électricité dans une zone géographique donnée (nucléaire, charbon, gaz, renouvelables...). Il est donc intéressant de comparer les émissions du projet de Bischoffsheim à celles du mix électrique français et à celles du mix électrique européen.

Néanmoins, cette comparaison présente certaines limites. En effet, la comparaison avec le facteur d'émission du mix électrique français ne permet pas de prendre en compte les échanges d'électricités entre la France et ses pays voisins. La comparaison avec le facteur d'émission du mix électrique européen est donc davantage pertinente, en raison de l'interconnexion du réseau électrique européen.

Par ailleurs, la production électrique d'une centrale photovoltaïque ne se substitue pas à la moyenne des autres moyens de production français ou européen, mais elle permet de réduire la production électrique de centrales dont les coûts marginaux sont plus élevés (à savoir les centrales thermiques, beaucoup plus émettrices en gaz à effet de serre). Ainsi, comme souligné par RTE¹, l'augmentation de la production solaire en France entraîne la réduction de l'utilisation des moyens de productions thermiques (centrales à gaz, à charbon et au fioul) en France mais surtout en Europe, le réseau d'électricité étant interconnecté. Ce constat est corroboré par l'étude du think tank France Territoire Solaire², qui démontre que l'énergie solaire est en majorité sollicitée pour éviter l'utilisation de ressources fossiles. Il est donc

¹ RTE. Note : Précisions sur les Bilans CO₂ établis dans le bilan prévisionnel et études associées. Disponible sur : <https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/note%20bilans%20co2.pdf>

² France Territoire Solaire (2020, 24 mars). Analyse de l'impact climat des capacités additionnelles solaires photovoltaïques en France à horizon 2030. Disponible sur : <https://franceterritoiresolaire.fr/analyse-de-limpact-climat-de-capacites-additionnelles-solaires-photovoltaïques-en-france-a-horizon-2030-communique-de-presse/>

pertinent de regarder les émissions de gaz à effet de serre évitées par rapport aux autres moyens de production dans le tableau 5.

Tableau 5 – Emissions de gaz à effet de serre évitées

Source de production	Facteur d'émission (en gCO ₂ eq/kWh)	Emissions de GES évitées/an (en tCO ₂ eq)	Emissions de GES évitées sur les 30 ans de la durée de vie du parc (en tCO ₂ eq)
Détail du calcul		= 714*(facteur d'émission-32,7)	=(Emissions de GES évitées/an)*30
Mix électrique européen	79,5 ³	33 415,2	1 002 456
Mix électrique français	55 ⁴	15 922,2	477 666
Centrale à gaz	328,7 ⁵	211 344	6 340 320
Centrale à charbon	776,3 ⁶	530 930,4	15 927 912

Ainsi, la centrale photovoltaïque de Bischoffsheim permettra d'éviter chaque année entre **15 922,2 et 33 415,2 tCO₂eq** en comparaison aux mix électriques français et européens. Le projet est donc encore plus vertueux que ce qu'anticipé dans l'étude d'impact.

I.3. Temps de retour relatif aux émissions de GES

Le bilan carbone total du projet (**23 319,75 tCO₂eq**) et les émissions de GES évitées (**33 415,2 tCO₂eq/an**) permettent de calculer le temps de retour relatif aux émissions de gaz à effet de serre. Ce dernier se définit comme la durée nécessaire pour que les émissions de la centrale

³ Données de 2022 : l'UE a produit 2 641 TWh d'électricité (selon le Conseil de l'UE) produisant 210 MtCO₂eq (selon le bilan électrique 2022 de RTE)

⁴ RTE (2023). Bilan électrique 2022

⁵ Donnée du Commissariat général au développement durable. Disponible sur : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/chiffrescle_d_clima2013-pratique.pdf

⁶ Donnée du Commissariat général au développement durable. Disponible sur : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/chiffrescle_d_clima2013-pratique.pdf

photovoltaïque cumulées sur l'ensemble de son cycle de vie soient inférieures aux émissions évitées, selon la formule suivante :

$$\text{Temps de retour GES} = \frac{\text{bilan carbone du projet}}{\text{émissions de GES évitées}}$$

Les émissions de GES évitées annuellement étant largement supérieures au bilan carbone total de la centrale photovoltaïque de Bischoffsheim, le temps de retour en émissions de gaz à effet de serre du projet sera inférieur à un an.

II. Temps de retour énergétique du projet

Le temps de retour énergétique se définit comme le ratio entre l'énergie primaire investie pour le projet au cours de l'ensemble de son cycle de vie et l'énergie produite annuellement par le projet (en équivalence énergie primaire). Le temps de retour s'appuie donc sur le ratio entre énergies primaires consommée et produite par la centrale photovoltaïque.

II.1. Energie primaire produite par la centrale

L'énergie primaire correspond à une énergie disponible dans la nature avant toute conversion en énergie finale utilisable par notre système énergétique. La conversion de l'énergie primaire en énergie finale entraînant une perte d'énergie, 1 kWh d'énergie finale correspond à environ 2,3 kWh d'énergie primaire⁷.

Pour rappel, la production de la centrale photovoltaïque est estimée à environ **23,8 GWh/an**. Cette quantité d'énergie finale correspond à une énergie primaire 2,3 fois plus élevée, soit **54,74 GWhep** ou **197 064 000 MJep**.

II.2. Energie primaire investie dans la centrale

Afin d'établir le ratio du temps de retour énergétique du projet, il est nécessaire d'évaluer l'énergie primaire consommée pour la fabrication, le transport, la construction, l'opération, la maintenance et la fin de vie des différents composants de la centrale photovoltaïque.

Energie primaire investie dans les modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques représentent la grande majorité de l'énergie primaire investie dans la centrale. Bien que le choix définitif des modules ne puisse être encore fixé, les fiches PEP (Profil Environnemental Produit) mises à disposition par l'association EcoPassport⁸ permettent de déterminer l'ordre de grandeur de l'énergie primaire investie dans les modules

⁷ Coefficient utilisé depuis l'entrée en vigueur de la réglementation RE2020 au 1^{er} janvier 2022

⁸ Ressource disponible sur : <https://register.pep-ecopassport.org/pep/consult>

photovoltaïques, qui est de **11 000 MJep/kWc**. Une énergie primaire de 6 380 MJep serait alors investie par module photovoltaïque, soit **243 078 000 MJep** pour l'ensemble des panneaux photovoltaïques de la centrale de Bischoffsheim.

[Energie primaire investie dans les autres composants](#)

L'analyse de l'énergie primaire investie dans les autres composants de la centrale s'appuie sur le référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'Analyse Cycle de Vie développée par l'ADEME. Ce document datant de 2013, les valeurs ci-dessous sont donc conservatrices car les procédés ont gagné depuis en efficacité.

Tableau 6 – Energie primaire investie dans les différents composants de la centrale

Composants	Energie primaire investie par unité (MJep)	Nombre*	Impact énergétique (MJep)
Panneaux photovoltaïques	5 940	38 100	226 314 000
Onduleurs	4 195 800	5	20 979 000
Transformateur	832 440	6	4 994 640
Flotteurs	1 713 (par module)	38 100	65 265 300
Connexion électrique	578 (par module)	38 100	220 218 000
Conteneur de maintenance	756 600 (par local)	1	756 600
Installation et désinstallation	77 (par module)	38 100	2 933 700
Maintenance	4 (par km)	300	1 200
Total pour la centrale			315 148 440

* Les nombres exacts seront déterminés ultérieurement, en phase pré-construction. Le chiffre indiqué est donc une estimation qui n'engage pas le maître d'ouvrage dans le dimensionnement de la centrale.

II.3. Calcul du temps de retour énergétique

Le temps de retour énergétique peut être calculé selon la formule :

$$\text{Temps de retour énergétique} = \frac{\text{Energie primaire consommée}}{\text{Energie primaire produite annuellement}}$$

$$\text{Temps de retour énergétique} = \frac{315\,148\,440}{197\,064\,000}$$

$$\text{Temps de retour énergétique} = 1,6$$

Le temps de retour énergétique du projet de Bischoffsheim sera donc d'environ un an et demi. Etant prévu que la centrale sera exploitée durant au moins 30 ans, le projet produira donc près de 19 fois plus d'énergie primaire que d'énergie primaire investie pour sa réalisation.