

Addendum n°1 projet EPV1

Projet de centrale photovoltaïque au sol,

Commune de Réguisheim (68)



Préparé par :
AS Conseil Environnement
2 rue du professeur Zimmermann
69007 Lyon

Date :
24 Octobre 2019

REVISIONS DE L'ADDENDUM			
Versions	Description	Date	Rédacteur/ Relecteur
V1	Finale	24/10/2019	MTR/ ASU
Projet photovoltaïque au sol, Réguisheim (68)			
Contact :	AS Conseil Environnement asuire@asconseil-env.com 2 rue du Professeur Zimmermann, 69007 Lyon www.asconseil-environnement.com		

Table des matières

1	Préambule :	4
2	Positionnement du projet par rapport aux politiques énergétiques nationales et régionales	5
2.1	Contexte énergétique national	5
2.2	Contexte énergétique régional	7
3	Analyse de la production d'énergie en région Grand-Est	9
3.1	Production énergétique régionale	9
3.2	Production énergétique de la centrale photovoltaïque	13
4	Analyse des bénéfices environnementaux du projet de la centrale photovoltaïque de Réguisheim	15
4.1	Référentiels de calcul et périmètre	15
4.2	Résultats de l'évaluation des émissions carbone du projet de centrale photovoltaïque	17
4.3	Evaluation des émissions carbone des productions d'énergie nucléaire et thermique	22
4.4	Appréciation des bénéfices en CO ₂ issus de la substitution des énergies fossiles par de l'énergie photovoltaïque	25
4.4.1	Substitution de l'énergie thermique par de l'énergie photovoltaïque	25
4.4.2	Substitution de l'énergie nucléaire par de l'énergie photovoltaïque	26
5	Comparatif des différentes solutions d'ancrage	27
5.1	Impact carbone des différentes solutions d'ancrage	28

1 Préambule :

L'étude d'impact environnemental du projet de création d'une centrale photovoltaïque au sol sur la commune de Réguisheim (68), porté par la société EPV 01, filiale de TRYBA ENERGY, a reçu un avis de la Mission Régionale d'Autorité Environnementale (MRAE) le 16 septembre 2019 (n° MRAe2019APGE81).

Cet addendum a pour but de fournir les compléments demandés par la MRAE, et sera notamment composé d'une partie décrivant plus précisément le contexte énergétique dans lequel le projet s'inscrit dans la région Grand-Est, une analyse plus poussée des principaux bénéfices environnementaux du projet attendue en élargissant l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre au cycle de vie de la centrale photovoltaïque, de la production des modules et éléments de structure à la fin de vie de la centrale photovoltaïque, et une comparaison des impacts environnementaux des différentes solutions d'ancrage au sol.

2 Positionnement du projet par rapport aux politiques énergétiques nationales et régionales

2.1 Contexte énergétique national

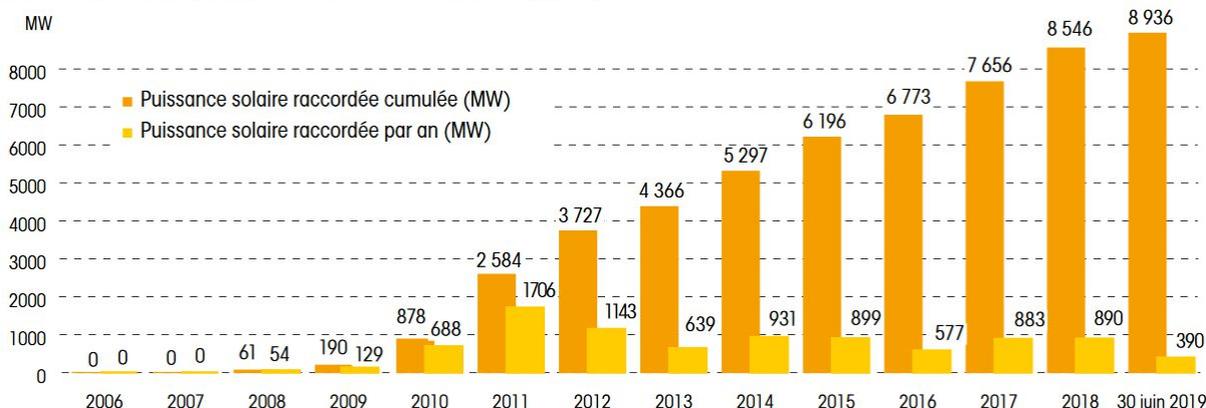
Dans la **loi sur la transition énergétique pour la croissance verte** (LTECV) n°2015-992 du 17 août 2015, la France s'est fixée pour objectif de porter la part des énergies renouvelables à **23% de la consommation finale brute d'énergie en 2020** et à 32% de la consommation finale brute d'énergie en 2030. Le **taux de couverture moyen de la consommation électrique par des énergies renouvelables** a été de **22 %** en 2018 sur le territoire national, en augmentation de 1,9 point par rapport à l'année précédente (source : RTE – Réseau de Transport d'Electricité).

D'autre part, les pays signataires de l'accord de Paris se sont engagés, conformément aux recommandations du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), à limiter l'augmentation de la température moyenne à **2°C** et si possible à **1,5°C** et donc à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. La France s'est engagée, avec la première **Stratégie Nationale Bas Carbone** (SNBC), adoptée en novembre 2015, à **réduire de 75% ses émissions de Gaz à Effet de Serre** (GES) à l'horizon 2050 par rapport à 1990. **Dans le domaine de la production d'énergie**, la SNBC vise notamment **une décarbonation quasi-complète de la production d'énergie à l'horizon 2050** grâce à l'orientation E2 : *« Décarboner et diversifier le mix énergétique notamment via le développement des énergies renouvelables (chaleur décarbonée, biomasse et électricité décarbonée) »*¹.

Au 30 juin 2019, la puissance du parc photovoltaïque sur l'ensemble du territoire français est de **8,936 GW**. D'après RTE (Réseau de Transport d'Electricité), la production photovoltaïque entre le 30 juin 2018 et le 30 juin 2019 était de 11,6 TWh représentant 2,4 % de la consommation d'électricité en France Métropolitaine. La **Programmation Pluriannuelle de l'Energie** (PPE) de novembre 2016 a publié un **objectif de 10,2 GW de solaires photovoltaïques pour 2018** et une fourchette comprise entre **18,2 et 20,2 GW pour 2023**.

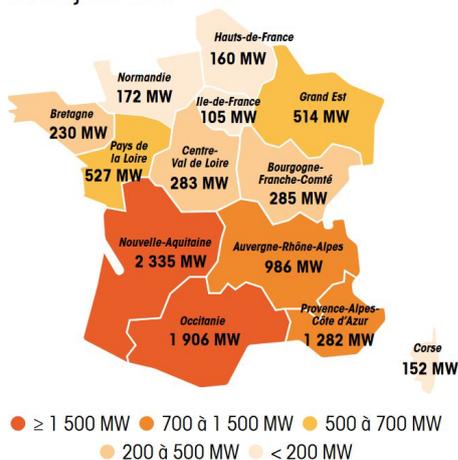
¹ Source : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

Evolution de la puissance solaire raccordée (MW)



Graphique 1 : Evolution de la puissance du parc photovoltaïque Français,
 Source : panorama de l'électricité renouvelable, juin 2019, RTE

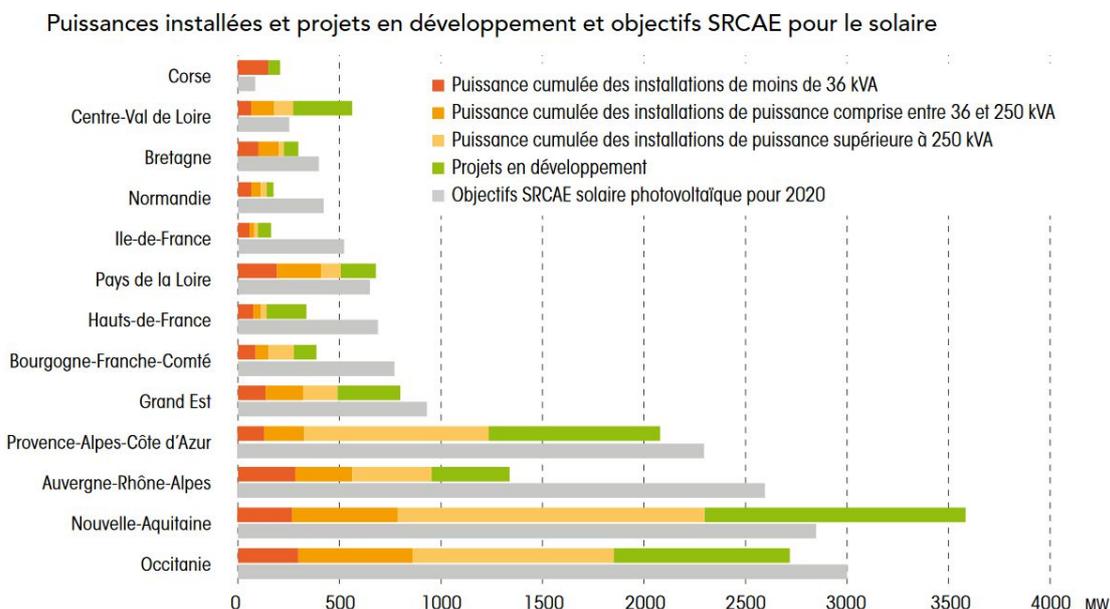
Puissance solaire raccordée par région au 30 juin 2019



Graphique 2 : Puissance solaire raccordée par région au 30 juin 2019

Source : panorama de l'électricité renouvelable juin 2019, RTE

Le Schéma Régional Climat Air Energie (SRCAE) du Grand Est a été arrêté par le Préfet de région le 29 juin 2012. Parmi les engagements régionaux, figure l'augmentation de la production d'énergies renouvelables avec un objectif de 26,5 % à l'horizon 2020 par la diversification des filières de production. L'objectif en puissance installée pour le solaire dans la région Grand-Est est de 28 Ktep (tonne équivalent pétrole) ou 4 000 000 m² de panneaux photovoltaïques d'ici 2020.



Graphique 3 : Puissances installées des projets photovoltaïques en développement par région

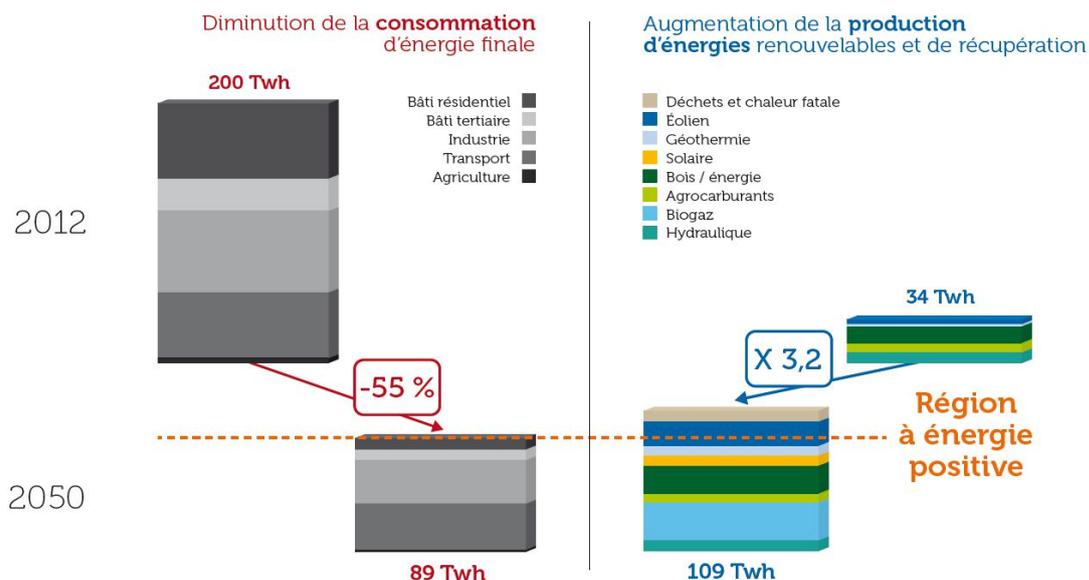
Source : panorama de l'électricité renouvelable au 30 juin 2019, RTE

La programmation pluriannuelle de l'énergie s'oriente vers une accélération du développement de la filière photovoltaïque et met l'accent sur les solutions compétitives comme les installations photovoltaïques au sol, tout en localisant les projets en priorité sur des espaces artificialisés de manière à préserver les espaces naturels et agricoles.

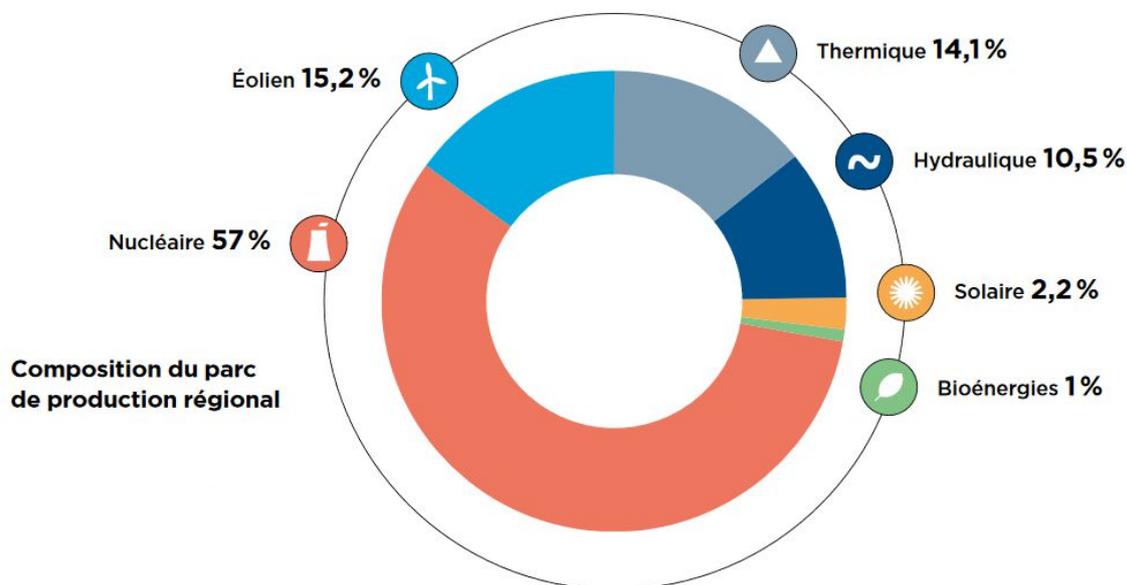
2.2 Contexte énergétique régional

La Région Grand-Est est en cours d'élaboration de son futur **Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET)** nommé SRADDET Grand Est (phase post enquête publique), élaborant une stratégie à l'horizon 2050 pour l'aménagement et le développement durable de la région. La stratégie du SRADDET vise, dans son objectif numéro 1, à « *devenir une région à énergie positive et bas carbone à l'horizon 2050* » et dans son objectif numéro 4 à « *Développer les énergies renouvelables pour diversifier le mix énergétique* ». Pour cela, la région prévoit une couverture de la consommation d'énergie renouvelable de **41%** à l'horizon 2030 et de **100%** à l'horizon 2050.

Le **taux de couverture moyen de la consommation électrique par des énergies renouvelables** était de **28,9%** en 2018 en région Grand Est (source : RTE – Réseau de Transport d'Electricité).



Graphique 4 : Scénario région Grand Est à énergie positive et bas carbone en 2050
 Source : Synthèse de la stratégie du Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires du Grand Est



Graphique 5 : Composition du parc de production régional d'énergie en Région Grand Est en 2018
 Source : L'essentiel 2018 en région Grand Est, RTE

3 Analyse de la production d'énergie en région Grand-Est

3.1 Production énergétique régionale

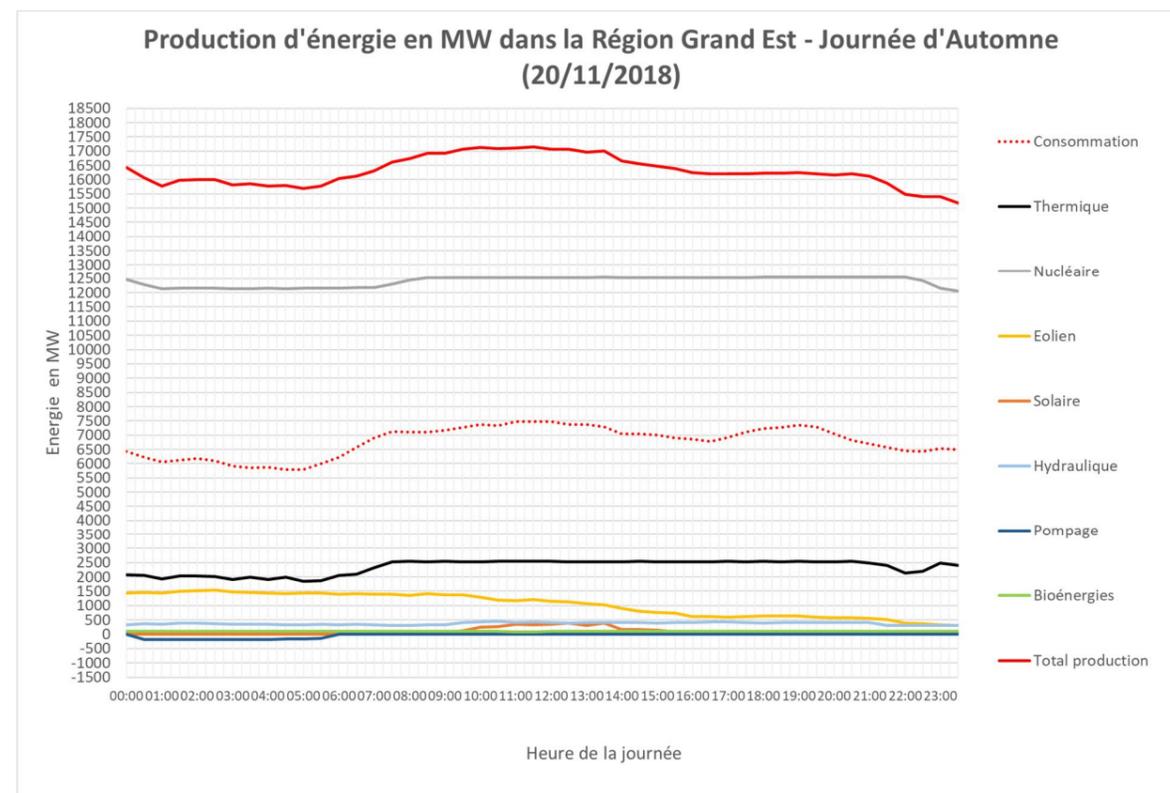
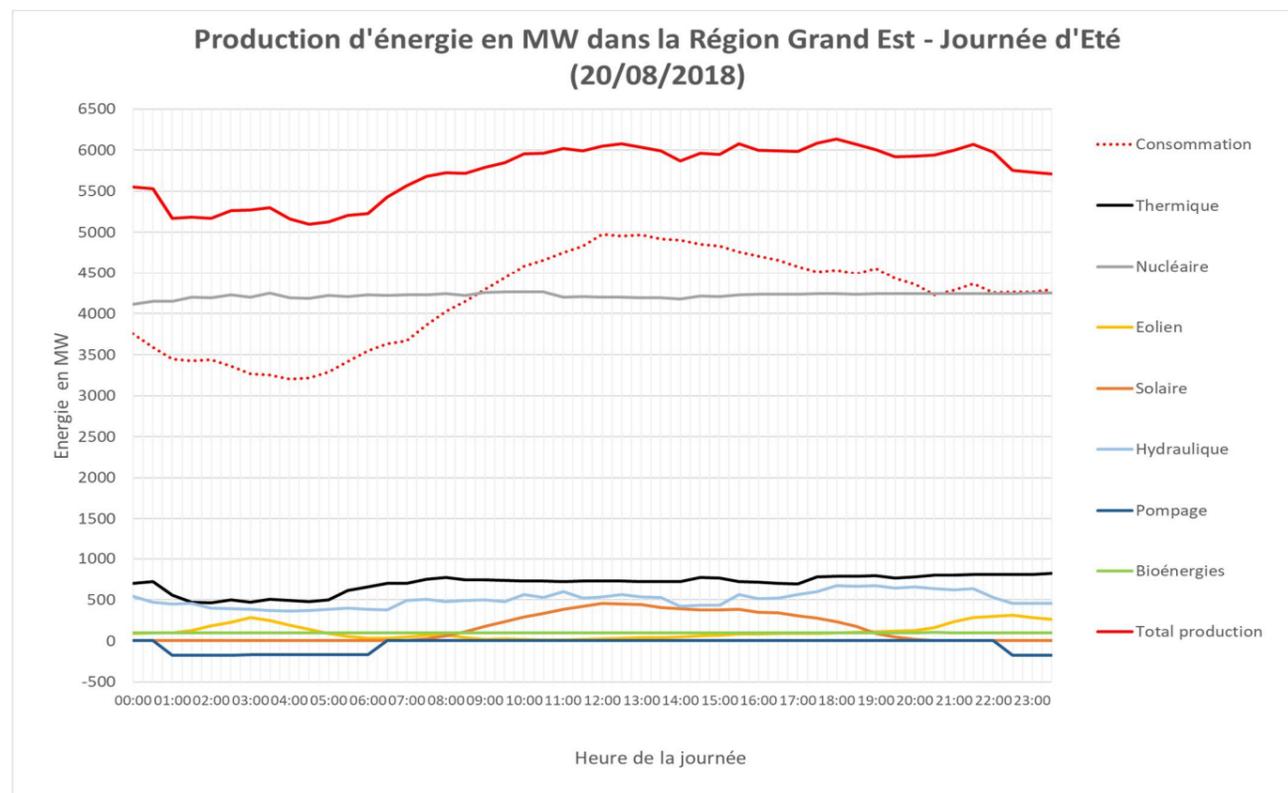
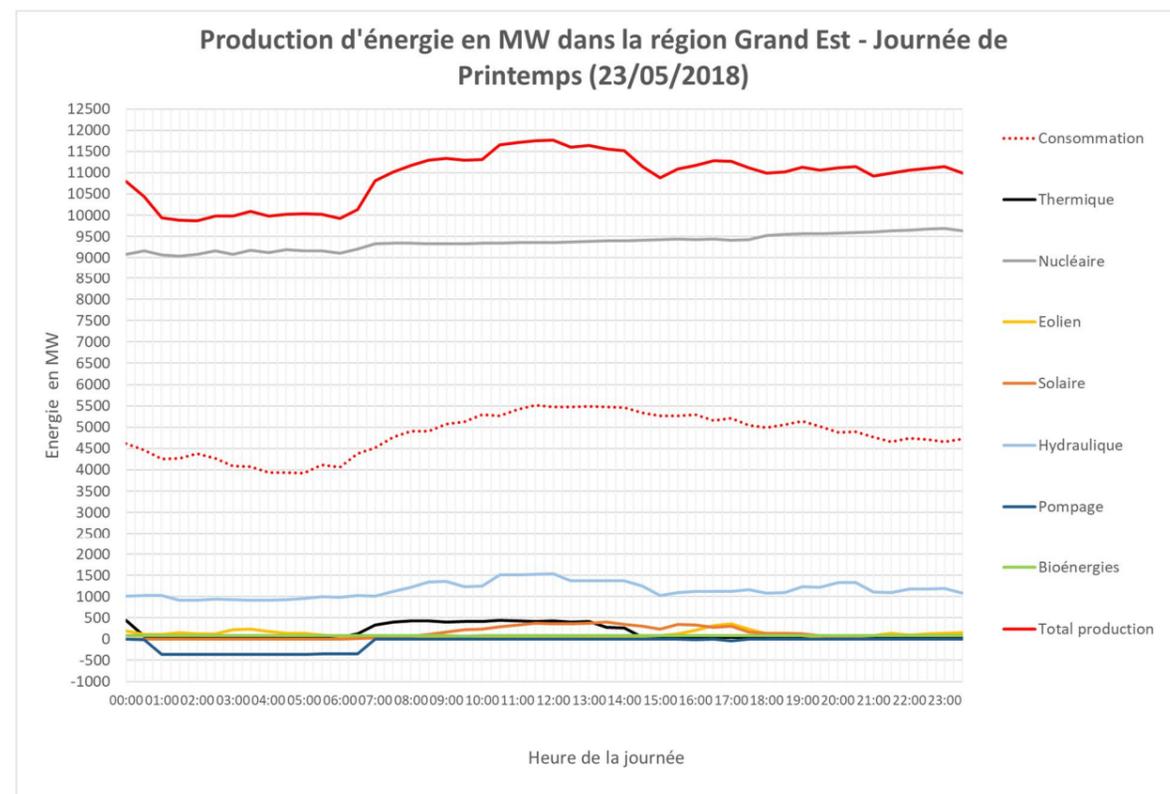
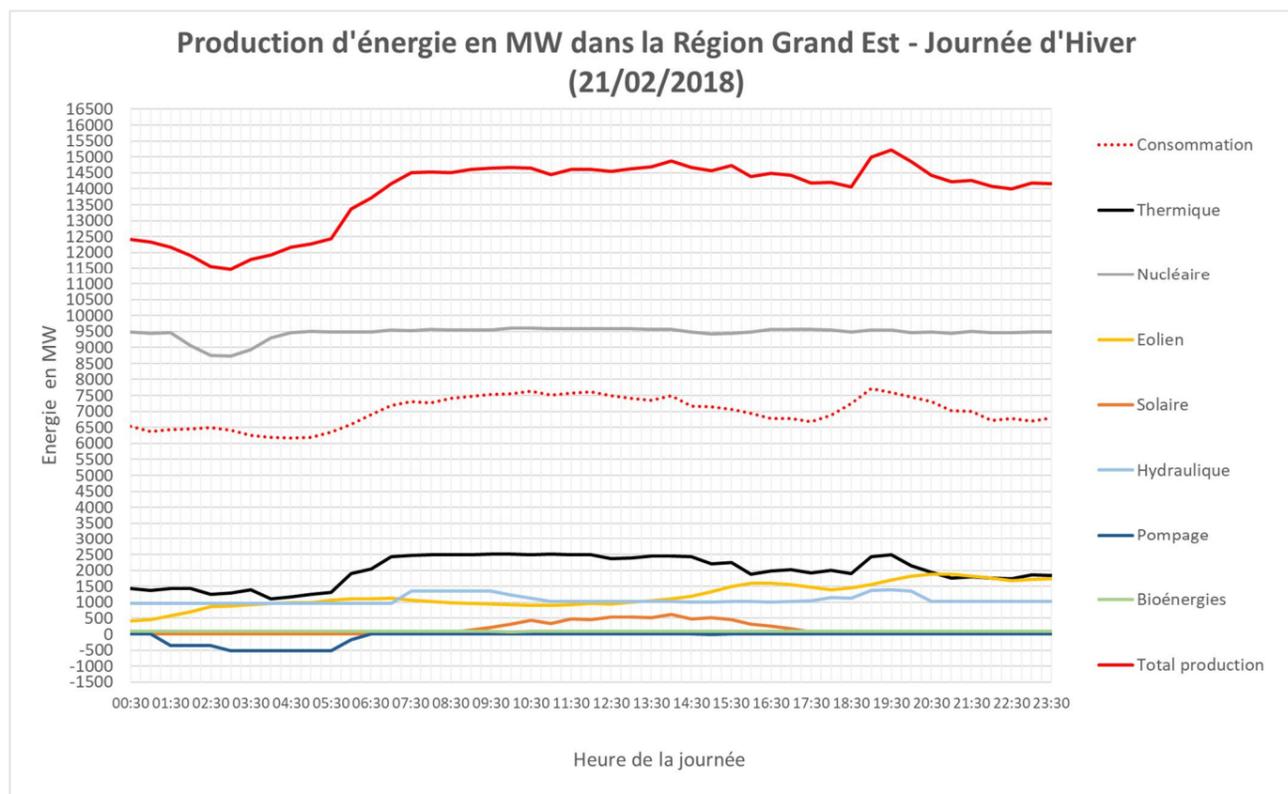
Les données du Réseau de Transport d'Electricité (RTE) fournissent des bilans annuels, mensuels et horaires de la production et de la consommation d'énergie sur le territoire français.

Les données horaires, pour la région Grand-Est pour l'année 2018, ont été analysées de la manière suivante :

- ✓ L'analyse de la production et de la consommation d'énergie en région, a été effectuée à partir des données de l'année 2018, sur quatre journées (sur 24h), une pour chacune des quatre saisons (le 21/02, le 23/05, le 20/08 et le 20/11) , en semaine, hors week-end et jours fériés ;
- ✓ Analyse a également été réalisée par source d'énergie (nucléaire, thermique, éolien, etc.) et suivant la consommation globale d'énergie, selon les heures de la journée.

Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous.

Graphique 6 : Comparaison selon la saison de la production et consommation d'énergie en région Grand Est, année 2018, Source : RTE



Analyse des résultats

Une première analyse de ces graphiques est présentée ci-dessous :

En région Grand Est, la production d'énergie solaire est répartie comme suit suivant les saisons :

- ✓ En hiver, l'énergie solaire commence à être produite à partir de 8 h du matin pour atteindre son maximum de production de **11h30 à 15h30** (environ 500 MW). La production d'énergie baisse ensuite pour être nulle vers 18h ;
- ✓ Au printemps, l'énergie solaire commence à être produite à partir de 6h30 du matin pour atteindre son maximum de production de **11h à 17h** (environ 300 MW). La production d'énergie baisse ensuite pour être nulle vers 20h30 ;
- ✓ En été, l'énergie solaire commence à être produite à partir de 7h30 du matin pour atteindre son maximum de production de **12h à 15h30** (environ 400 MW). La production d'énergie baisse ensuite pour être nulle vers 20h30 ;
- ✓ En automne, l'énergie solaire commence à être produite à partir de 8h30 du matin pour atteindre son maximum de production de **11h à 13h30** (environ 350 MW). La production d'énergie baisse ensuite pour être nulle vers 16h30.

La production d'énergie solaire (2,2% du mix énergétique en région) se répartie ainsi en moyenne sur l'année, entre 8 h du matin et 19h le soir avec des pics de production sur la plage horaire comprise entre 11h et 17h, et avec des maximums de production compris entre 300 et 500 MWh.

La production d'énergie pour les autres sources d'énergie en région Grand-Est se répartit de la manière suivante :

- ✓ La production d'énergie d'origine nucléaire (57% du mix énergétique en région), est la source de production prédominante avec une production stable sur la journée et un niveau de production variant sur les journées analysées de 4 200 MW en été à 12 500MW en automne ;
- ✓ La production d'énergie thermique (14,1% du mix énergétique en région, gaz et fioul) avec un niveau de production sur les journées analysées de moins de 500 MW au printemps et allant jusqu'à 2 500 MW en automne et en hiver. La production d'énergie thermique semble suivre en hiver la courbe de consommation et semble plus constante en été et en automne ;
- ✓ La production d'énergie hydraulique (10,5% du mix énergétique en région), avec un niveau de production sur les journées analysées de 500 MW en été et en automne et atteignant 1 500 MW en hiver et au printemps. La production d'énergie hydraulique semble relativement stable suivant les heures de la journée ;
- ✓ La production d'énergie éolienne (15,2% du mix énergétique en région), avec un niveau de production sur les journées analysées allant jusqu'à 1 000 MW en hiver et 1 500 MW en automne. La production d'énergie éolienne semble varier fortement d'une journée à l'autre suivant les conditions météorologiques ;

- ✓ La production de bioénergies (1% du mix énergétique en région), est très faible sur les journées analysées, mais le niveau de production semble stable suivant les heures de la journée.

Sur les quatre journées analysées de l'année 2018, correspondant aux quatre saisons, le niveau de consommation énergétique global est bien en deçà du niveau de production énergétique au niveau de la région Grand-Est :

- ✓ En hiver, la demande énergétique est plus importante entre 6h30 et 15h, puis vers 19h le soir. Sur la journée d'hiver analysée, la demande énergétique est au maximum de 7 500 MW contre une production totale maximale d'énergie de 15 000 MW ;
- ✓ Au printemps, la demande énergétique est plus importante entre 6h30 et 21h. Sur la journée de printemps analysée, la demande énergétique est au maximum de 5 500 MW contre une production totale maximale d'énergie de 11 500 MW ;
- ✓ En été, la demande énergétique est plus importante en journée probablement dû à la demande liée à la climatisation. Sur la journée d'été analysée, la demande énergétique est au maximum de 5 000 MW contre une production totale maximale d'énergie de 6 100 MW ;
- ✓ En automne, le profil de la demande énergétique semble proche d'une journée d'hiver. Sur la journée d'automne analysée, la demande énergétique est au maximum de 7 500 MW contre une production totale maximale d'énergie de 17 000 MW.

Le projet de centrale photovoltaïque de Réguisheim répond à l'appel d'offre CRE (Commission de régulation de l'Energie) d'Installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire « transition énergétique du territoire de Fessenheim » du 24 janvier 2019, dans l'optique de préparer la fermeture de la centrale de Fessenheim en 2020. Aussi, pour la suite de l'analyse, **il est considéré que la production d'énergie solaire se substituera à priori en priorité aux sources d'énergie fossile d'origines nucléaire et thermique de la région Grand-Est.**

3.2 Production énergétique de la centrale photovoltaïque

La production estimée du projet de centrale photovoltaïque de Réguisheim est de 21 788 MWh/an. La production mensuelle estimée est la suivante :

Centrale			
	Tranche 1	Tranche 2	Total
Mois	Puissance estimée (MWh)	Puissance estimée (MWh)	Puissance estimée totale (MWh)
Janvier	606	97	703
Février	1 172	188	1 359
Mars	1 834	293	2 128
Avril	1 915	307	2 223
Mai	2 125	341	2 466
Juin	2 311	371	2 682
Juillet	2 400	384	2 784
Aout	2 158	345	2 503
Septembre	1 778	285	2 063
Octobre	1 350	216	1 565
Novembre	703	112	815
Décembre	428	69	497
Année	18 780	3 008	21 788

La production d'énergie solaire mensuelle du Grand-Est en 2018 est la suivante :

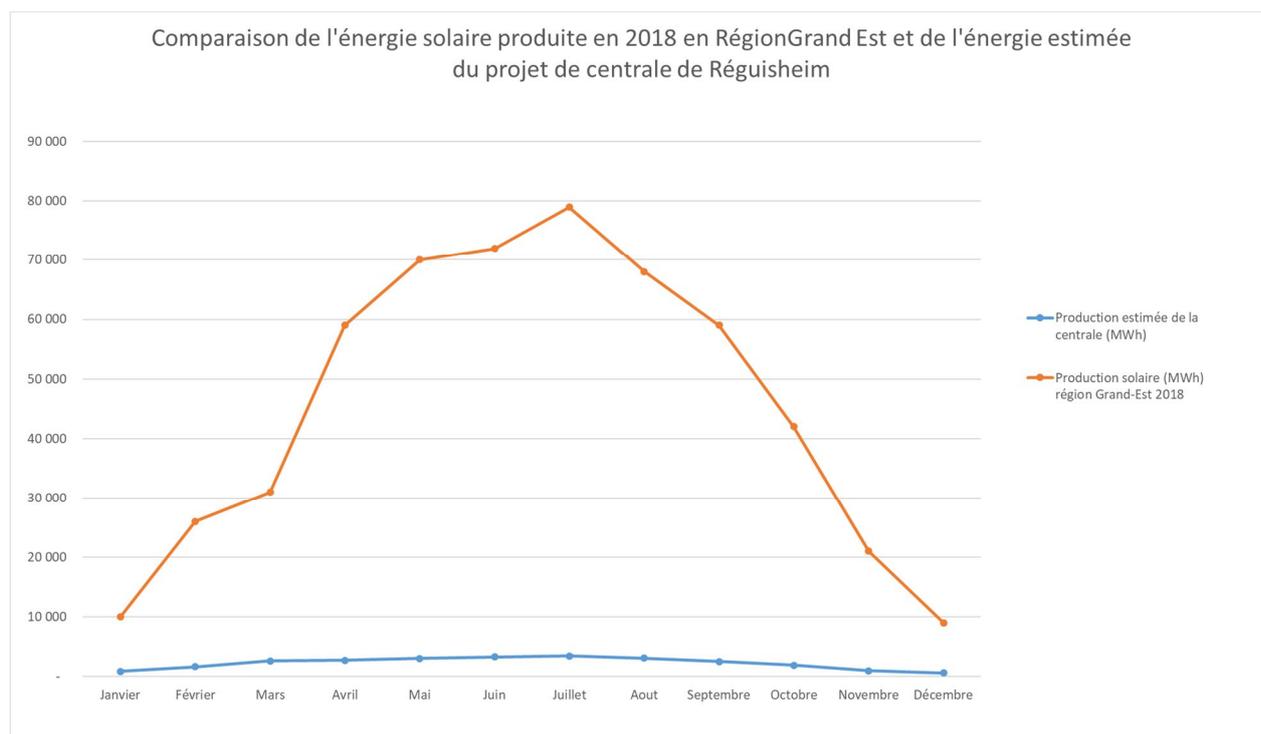
	Production solaire région Grand-Est (GWh, 2018)
Janvier	10,0
Février	26,0
Mars	31,0
Avril	59,0
Mai	70,0
Juin	72,0
Juillet	79,0

Aout	68,0
Septembre	59,0
Octobre	42,0
Novembre	21,0
Décembre	9,0
Total	546,0

Tableau 1 : Production mensuelle d'énergie solaire du Grand-Est en 2018, source RTE

La production annuelle en énergie solaire de la région Grand-Est en 2018, était ainsi de 546 000 MWh/ an. Avec une production annuelle estimée à 21 788 MWh/ an, **la centrale photovoltaïque au sol de Réguisheim représentera donc 3,99 % de la production totale d'énergie solaire dans la région Grand-Est.**

La comparaison mensuelle de la production d'énergie solaire de la région Grand-Est en 2018 avec la production estimée du projet de centrale photovoltaïque au sol de Réguisheim est présentée dans le graphique suivant :



Graphique 7 : Comparaison de l'énergie solaire produite en région Grand-est en 2018 avec l'énergie estimée du projet de centrale photovoltaïque de Réguisheim

4 Analyse des bénéfices environnementaux du projet de la centrale photovoltaïque de Réguisheim

Afin d'approfondir la quantification des impacts positifs du projet de centrale photovoltaïque sur l'environnement, une Analyse environnementale du Cycle de Vie (ACV) simplifiée du projet avait été envisagée.

Un référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie a été édité par l'ADEME. Un logiciel d'analyse de cycle de vie simplifié avait été élaboré par l'ADEME et Cycléco sur la base de ce référentiel dans le but de fournir un outil aux porteurs de projet dans le cadre des AO CRE PV pour un système de projet photovoltaïque complet. Néanmoins cet outil n'a pas été actualisé depuis 2015 et n'est plus disponible pour utilisation. Aussi afin de réaliser une ACV environnementale du projet de centrale photovoltaïque, une analyse à partir des bases de données et logiciel de calcul spécifique à l'ACV est nécessaire (ex : Simapro, Ecoinvent).

Etant donné les contraintes de temps, budgétaire, et le manque de données consolidées dans les bases de données existantes pour réaliser une analyse de cycle de vie comparative avec d'autres modes de production d'énergie, une telle analyse n'a pu être conduite.

Néanmoins, l'analyse des bénéfices environnementaux du projet, s'est focalisée sur l'un des principaux indicateurs environnementaux à considérer, soit les émissions de CO₂ sur le cycle de vie du projet de centrale photovoltaïque comparée aux énergies fossiles d'origines nucléaire et thermique. **Cette analyse permet de quantifier de manière plus précise les incidences et bénéfices du projet sur l'enjeu du changement climatique.**

4.1 Référentiels de calcul et périmètre

Le calcul du bilan carbone de la centrale a été réalisé à partir des données fournies par le maître d'ouvrage, des facteurs d'émissions disponibles dans le « *Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie* »², de l'outil d'évaluation Carbone® de l'Association Bilan Carbone et de la Base Carbone de l'ADEME.

Le bilan carbone des modules, a été réalisé sur la base de la méthodologie de l'évaluation carbone simplifiée décrite dans l'annexe 2 de l'appel d'offre CRE (Commission de Régulation de l'Energie).

Le périmètre de l'évaluation des émissions carbone du projet de centrale photovoltaïque au sol de Réguisheim comprend :

- ✓ L'infrastructure photovoltaïque avec les émissions carbone liées aux modules photovoltaïques, aux onduleurs, aux supports des modules, à la connexion électrique et aux transformateurs ;

² Référentiel réalisé pour l'ADEME, http://www.ekoconception.eu/fichiers_communs/Ref-Methodologique-PV-FR.pdf

- ✓ L'infrastructure complémentaire (ou périphérique) de la centrale composée de la route d'accès au site (déjà présente dans notre cas donc exclue du périmètre d'étude), du local technique et de la clôture ;
- ✓ Le chantier : émissions lors des phases d'installation et de désinstallation de la centrale et incidence sur la transformation et l'occupation du sol ;
- ✓ L'entretien : émissions lors du nettoyage des modules et du transport des agents de maintenance.

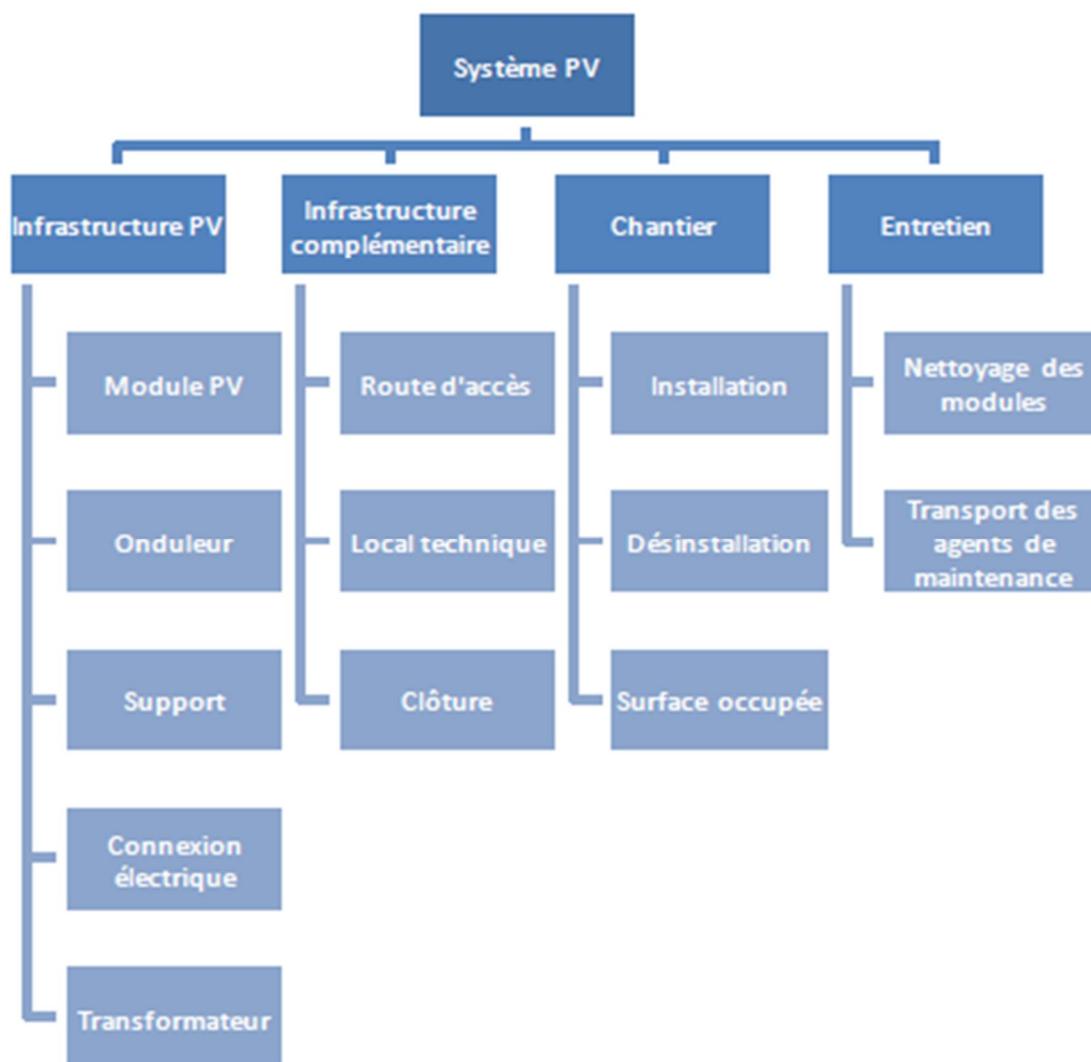


Illustration 1 : Périmètre du bilan carbone de la centrale de Réguisheim. Source : Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie

4.2 Résultats de l'évaluation des émissions carbone du projet de centrale photovoltaïque

Les résultats de l'évaluation des émissions de la centrale photovoltaïque de Réguisheim sur son cycle de vie sont présentés dans le tableau suivant.

Ce tableau se lit comme suit :

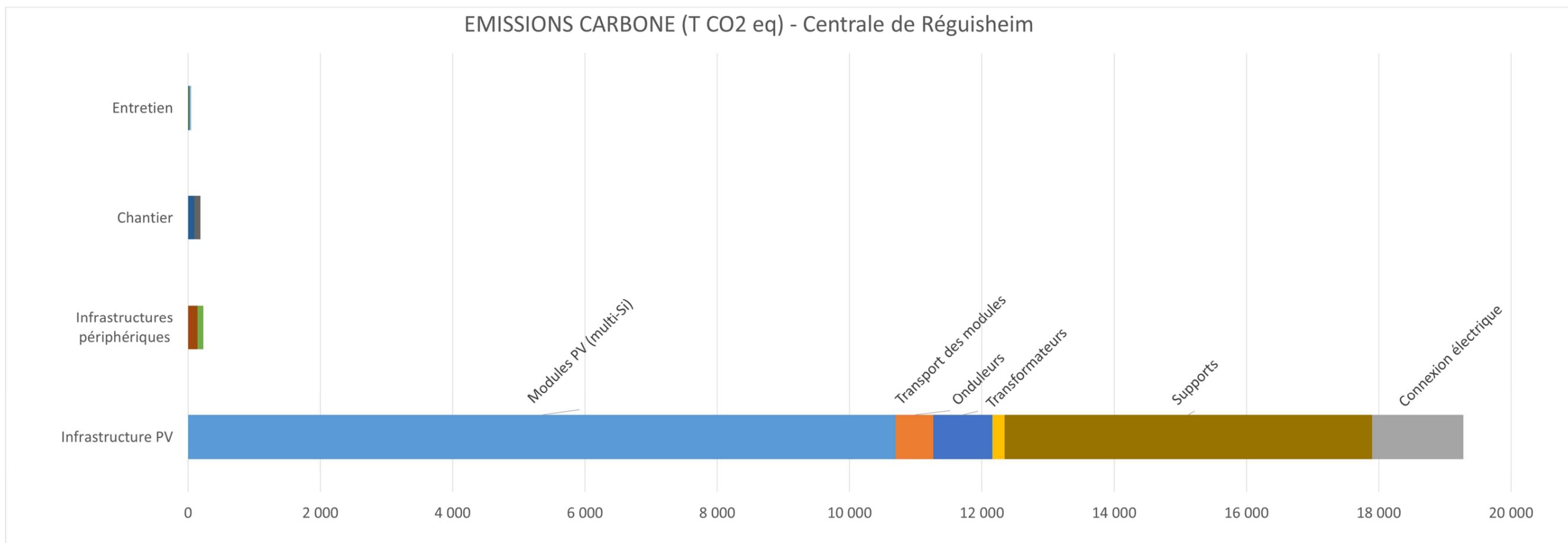
- ✓ La colonne « Processus » correspond aux différents éléments du périmètre d'étude (modules, onduleurs, etc.) ;
- ✓ La colonne « Unité » représente l'unité pour laquelle le facteur d'émission a été calculé (kWc, kVA, etc.) ;
- ✓ La colonne « Facteur d'émission » correspond aux facteurs d'émissions calculés par le « référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie » en kg CO₂ équivalent (ou kg CO₂ eq) ;
- ✓ La colonne « Données projet » reprend les données techniques du projet de centrale photovoltaïque de Réguisheim ;
- ✓ La colonne « Emissions totales » correspond aux émissions carbone de la centrale de Réguisheim, par poste, en kg CO₂ équivalent (ou kg CO₂ eq) ;
- ✓ La colonne « Part du bilan carbone » correspond à la part de chacun des postes par rapport aux émissions totales de la centrale (en %) ;
- ✓ La colonne « Périmètre » détaille le périmètre de calcul ;
- ✓ La colonne « Hypothèses retenues » détaille les hypothèses de calcul.

Tableau 2 : Evaluation des émissions carbone du projet de centrale photovoltaïque de Réguisheim

Processus	Unité	Facteur d'émission (kg CO ₂ eq/unité)	Données projet	Emissions totales (T CO ₂ eq)	Part du bilan carbone	Périmètre	Hypothèses retenues	Sources
Infrastructures PV	-	-	-	19 279	97,7%	Ce processus correspond à la fabrication, au remplacement et au traitement en fin de vie de tous les composants d'un système PV (modules PV, onduleurs, transformateurs, supports et connexions électrique).	Cf. ci-dessous	Cahier des charges de l'appel d'offres CRE, Méthode bilan carbone©, Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Infrastructures périphériques	-	-	-	231	1,2%	Ce processus correspond à la fabrication, au remplacement et au traitement en fin de vie des infrastructures périphériques d'une centrale au sol (route d'accès, local technique, clôture).	Cf. ci-dessous	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Chantier	-	-	-	186	0,9%	Ce processus correspond à l'installation et à la désinstallation du système PV.	Cf. ci-dessous	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Entretien	-	-	-	45	0,2%	Ce processus correspond à la consommation d'eau pour l'entretien des modules et au transport des agents de maintenance.	Cf. ci-dessous	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Total				19 741				
Infrastructures PV								
Modules PV (multi-si)	1 kWc	526,61	19722 kWc	10 698	54,2%	Ce processus correspond à la fabrication des modules de technologie en silicium polycristallin. Seule l'étape de fabrication des modules est considérée. Les réparations de modules sont également considérées. Le facteur d'émission est donné pour 1 kWc de module PV.	Le calcul prend en compte la quantité des différents composants nécessaire à la fabrication des modules (polysilicium, lingots de silicium, wafers, verre, EVA, PET, PVF). Les sites et pays de fabrication des composants sont pris en compte dans le calcul. 2% des modules sont réparés au cours de la durée de vie de l'installation et 1% sont non-conformes.	Cahier des charges de l'appel d'offres CRE
Transport des modules	-	-	-	567	2,9%	Ce processus correspond au transport des modules de leur lieu de fabrication à la centrale.	Transport Shanghai Rotterdam (20 459 km) en porte container. 81 containers sont nécessaires au transport des 660 modules de la centrale. Porte container a une capacité de 9 500 containers. Transport Rotterdam > Réguisheim (636 km) en poids-lourds. 81 poids lourds de 3,5 T sont nécessaires au transport des 660 modules de la centrale.	Méthode bilan carbone©

Processus	Unité	Facteur d'émission (kg CO ₂ eq/unité)	Données projet	Emissions totales (T CO ₂ eq)	Part du bilan carbone	Périmètre	Hypothèses retenues	Sources
Onduleurs	1kVA	54 et 141	16 590 kVA	896	4,5%	Ce processus correspond à la fabrication, à un remplacement au cours de la durée de vie et au traitement en fin de vie des onduleurs. La durée de vie des onduleurs est considérée égale à 15 ans ; le remplacement des onduleurs est intégré dans les facteurs d'impact. Les facteurs d'impact sont donnés pour 1 kVA d'onduleur installé sur le système PV.	Les facteurs d'impact sont calculés d'après les inventaires de production des onduleurs disponibles auprès d'Ecoinvent (onduleur 500 W, 2,5 kW et 500 kW), d'un remplacement sur la durée de vie du système PV et d'un modèle de recyclage en fin de vie. Une régression linéaire est effectuée pour exprimer les facteurs d'impact par kVA d'onduleur installé sur le système PV. Les facteurs d'impact sont ensuite majorés de 20%.	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Transformateur	1 kVA	10,9	16 900 kVA	184	0,9%	Ce processus correspond à la fabrication et au traitement en fin de vie des transformateurs. Les facteurs d'impact sont donnés pour 1 kVA de transformateur installé sur le système PV	Les facteurs d'impact sont calculés à partir de l'extrapolation des facteurs d'impact d'un transformateur de 1 000 kVA. La durée de vie considérée est 30 ans.	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Support	1 m ² de module	53,466	103 850 m ²	5 552	28,1%	Ce processus correspond à la fabrication des supports des modules (structure support, fixation) pour les supports fixes ou mobiles (tracker 1 axe ou tracker 2 axes). Les facteurs d'impact sont donnés pour 1 m ² de module.	Les facteurs d'impact sont calculés d'après un cas extrême à partir des inventaires de production des supports de modules. Les facteurs d'impact sont valables quelle que soit la technologie. La centrale de Réguisheim étant environ 2 fois plus haute qu'une centrale classique, et estimant que les modes d'ancrages représentent 50% des supports, le facteur d'émission a été ainsi multiplié par 1,33.	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Connexion électrique	1 kWc	70,1	19 722 kWc	1 383	7,0%	Ce processus correspond à la fabrication et au traitement en fin de vie des connexions électriques (câblage, boîte de fusible) du système PV. Les facteurs d'impact sont donnés pour 1 kWc.	Les facteurs d'impact des connexions électriques correspondent au "cas extrême" (par kWc) des 9 inventaires de connexion électrique Ecoinvent (3kWc, 93 kWc, 155 kWc, 280 kWc, 324 kWc, 450 kWc, 560 kWc, 570 kWc, 1300 kWc). La fin de vie prend en compte l'acier, l'aluminium, le PVC et le cuivre contenu dans les connexions électriques, en utilisant le processus de fin de vie.	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Infrastructures périphériques								
Local technique	1 kWc	7,28	19722,24 kWc	144	0,7%	Ce processus correspond à la construction des locaux techniques de la centrale au sol. Les facteurs d'impacts sont donnés pour 1 kWc.	On considère que les locaux techniques sont en béton armé. Les facteurs d'impact sont calculés pour être extrapolés pour 1 kWc.	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie

Processus	Unité	Facteur d'émission (kg CO ₂ eq/unité)	Données projet	Emissions totales (T CO ₂ eq)	Part du bilan carbone	Périmètre	Hypothèses retenues	Sources
Clôture	1 m de clôture	41,8	2 088 m	87	0,4%	Ce processus correspond à la fabrication et à l'installation de clôtures autour de la centrale au sol. Les facteurs d'impact sont donnés pour 1 m de clôture.	La clôture en treillis soudé rigide est constituée par de l'acier galvanisé avec des fondations en béton armé : 14 kg d'acier galvanisé et 125,2 kg de béton armé par mètre linéaire de clôture.	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Chantier								
Installation	1 kWc	4,71	19722 kWc	93	0,5%	Ce processus correspond à l'énergie consommée pour l'installation du système PV au sol. Les facteurs d'impact sont donnés pour 1 kWc.	Un cas extrême est défini correspondant au maximum des facteurs d'impact des différents inventaires d'installation de centrale au sol. Aucune distinction de technologie ou de système de montage est considérée dans ces facteurs d'impact.	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Désinstallation	1 kWc	4,71	19722 kWc	93	0,5%	Ce processus correspond à l'énergie consommée pour la désinstallation du système PV au sol. Les facteurs d'impact sont donnés pour 1 kWc.	On fait l'hypothèse que les facteurs impacts de la désinstallation sont égaux aux facteurs d'impact de l'installation. Aucune distinction de technologie ou de système de montage est considérée dans ces facteurs d'impact.	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Surface occupée	1 m ² de surface au sol occupée par la centrale	0	230 000 m ²	-	0,0%	Ce processus correspond à la transformation et à l'occupation des sols de la centrale au sol. Les facteurs d'impact sont donnés pour 1 m ² de surface au sol occupée par la centrale. La surface au sol initiale et l'occupation sont indéfinies. Ce processus doit être systématiquement utilisé sauf si la centrale PV est construite sur un ancien site industriel ou un ancien site pollué.	On fait l'hypothèse que la centrale est occupée sur 30 ans sur toute la surface au sol de la centrale. Les facteurs d'impact sont non conservateurs. Ces facteurs d'impact doivent être considérés si la centrale au sol est installée sur une aire ne répondant pas aux critères du processus "Centrale PV installé sur un ancien site industriel ou un ancien site pollué"	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Entretien								
Nettoyage des modules	1 m ² de module	0,19	103 849 m ²	20	0,1%	Ce processus correspond à la consommation d'eau pour l'entretien des modules sur le cycle de vie. Les facteurs d'impact sont donnés pour 1 m ² de module PV.	20 L d'eau par an sont utilisés pour nettoyer 1 m ² de module PV.	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie
Transport des agents de maintenance	1 km	0,283	90 000 km	25	0,1%	Ce processus correspond à la consommation de carburant liée au transport des agents de maintenance sur le cycle de vie. Les facteurs d'impacts sont donnés pour 1 km parcourus.	Ce processus exclu l'amortissement des routes et du véhicule durant l'utilisation. Les agents de maintenance sont transportés en fourgonnette < 3,5 T. 30 allers-retours par an sur 30 ans estimés à 50 km chacun soit 30*2*30*50 = 90 000 km	Référentiel d'évaluation des impacts environnementaux des systèmes photovoltaïques par la méthode d'analyse du cycle de vie



Graphique 8 : Bilan carbone de la centrale photovoltaïque de Réguisheim

Analyse des résultats :

D'après cette évaluation des émissions carbone, les émissions de CO₂ estimées de la centrale photovoltaïque sont de 19 741 T CO₂ eq sur la durée de vie de la centrale, de la phase de production des éléments de la centrale à la fin de vie. La production d'énergie solaire estimée de la centrale étant de 21 787 MWh/ an, et la durée de vie de la centrale étant estimée à 30 ans. D'après le référentiel ADEME, une dégradation linéaire de la productivité de la centrale photovoltaïque de 0,7% par an est à prendre en compte, soit une dégradation de la productivité de la centrale de 20% au bout des 30 ans d'exploitation. Ainsi la production d'énergie solaire estimée sur 30 ans, en tenant compte de la dégradation de la productivité, est de **591 GWh**. Cela revient à un facteur d'émission CO₂ de la centrale de **33,38 gCO₂eq/ kWh**.

Il est à noter que la majorité des impacts CO₂ de la centrale provienne de l'infrastructure photovoltaïque. En premier lieu, la fabrication des modules photovoltaïques (54% des émissions de CO₂) puis par la fabrication des supports (28% des émissions de CO₂).

D'après l'étude « Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics » de la NREL (National Renewable Energy Laboratory) réalisée en 2013, la quantité d'émissions de GES cumulées pour une fabrication de modules en silicium monocristallin, puis leur transport, installation, exploitation, maintenance et fin de vie, est de 40 g équivalent CO₂/ kWh pour un ensoleillement de 1 700 kWh/m²/an et un rendement de 14%.

D'autre part, les résultats des ACV menées par l'ADEME sur les différentes technologies de mises en œuvre des systèmes photovoltaïques varient entre 35 et 85 g équivalent CO₂ par kWh du sud au nord et selon les technologies. La valeur retenue par l'ADEME est arrondie à 55 g CO₂eq/ kWh avec une incertitude de 30%.

Ainsi, la valeur de 33,38 g CO₂ eq /kWh pour la centrale de Réguisheim est cohérente avec les facteurs d'émissions généralement calculés pour des projets de centrales photovoltaïques au sol sur le cycle de vie. Il est à noter que seule la fin de vie des modules n'a pas été intégrée dans l'évaluation des émissions de CO₂, les données correspondantes n'ayant pas pu être récupérées au moment de l'étude auprès de l'éco-organisme en charge de cette filière. Aussi, le facteur d'émission carbone du projet est probablement légèrement sous-estimé.

4.3 Evaluation des émissions carbone des productions d'énergie nucléaire et thermique

D'après la base de données ADEME sur les Bilans de Gaz à effet de serre, et la base de données ELCD, les facteurs d'émissions des énergies fossiles sont les suivants :

	Centrale nucléaire	Centrale à gaz	Centrale à Charbon	Centrale fioul-vapeur
gCO ₂ eq/kWh	6	418	1058	730

Tableau 3 : facteurs d'émission CO₂ des énergies nucléaire et thermique

Le périmètre exact de ces facteurs d'émissions n'est cependant pas précisé dans la base carbone ADEME.

La base de données ADEME cite également un papier publié dans Energy Policy en 2008 (*Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. B K Sovacool*) qui dresse un bilan des études d'analyse de cycle de vie existantes sur la filière nucléaire dans le monde et reprend les résultats d'autres études sur les autres filières de production d'électricité. Les résultats sont proches de ceux proposés auparavant, excepté pour le nucléaire avec un facteur d'émission CO₂ donnée à 66 g CO₂ eq/ kWh contre 6 g CO₂ eq/ kWh d'après la base carbone ADEME :

Lifecycle estimates for electricity generators*

Technology	Capacity/configuration/fuel	Estimate (gCO ₂ e/kWh)
Wind	2.5 MW, offshore	9
Hydroelectric	3.1 MW, reservoir	10
Wind	1.5 MW, onshore	10
Biogas	Anaerobic digestion	11
Hydroelectric	300 kW, run-of-river	13
Solar thermal	80MW, parabolic trough	13
Biomass	Forest wood Co-combustion with hard coal	14
Biomass	forest wood steam turbine	22
Biomass	Short rotation forestry Co-combustion with hard coal	23
Biomass	FOREST WOOD reciprocating engine	27
Biomass	Waste wood steam turbine	31
Solar PV	Polycrystalline silicone	32
Biomass	Short rotation forestry steam turbine	35
Geothermal	80MW, hot dry rock	38
Biomass	Short rotation forestry reciprocating engine	41
Nuclear	Various reactor types	66
Natural gas	Various combined cycle turbines	443
Fuel cell	Hydrogen from gaz reforming	664
Diesel	Various generator and turbine types	778
Heavy oil	Various generator and turbine types	778
Coal	Various generator types with scrubbing	960
Coal	Various generator types without scrubbing	1050

*Wind, hydroelectric, biogas, solar thermal, biomass, and geothermal, estimates taken from Pehnt (2006). Diesel, heavy oil, coal with scrubbing, coal without scrubbing, natural gaz, and fuel cell estimates taken and Gangon et al. (2002). Solar PV estimates taken from Ftehenakis et al. (2008). Nuclear is taken from this study. Estimates have been rounded to the nearest whole number.

Tableau 4 : Tableau comparatif des émissions CO₂ selon les filières de production d'énergie électrique issues d'analyses de cycle de vie

Pour réaliser l'analyse comparative des émissions CO₂, il a été choisi de conserver les valeurs des facteurs d'émissions issues d'analyse de cycle de vie pour les énergies thermiques et nucléaires, soit les résultats de l'étude de *Energy Policy* datant de 2008. Les facteurs d'émissions associés aux différents moyens de production d'énergies sont donc les suivants :

	Energie nucléaire	Energie thermique		
		Charbon	Fioul	Gaz
Facteurs d'émissions (gCO₂ eq /kWh)	66	1 058	778	443

Tableau 5 : Facteurs d'émission retenus pour l'analyse comparative

4.4 Appréciation des bénéfices en CO₂ issus de la substitution des énergies fossiles par de l'énergie photovoltaïque

Le choix de la substitution de tel ou tel type de source d'énergie fossile par de l'énergie d'origine solaire, dépend essentiellement des politiques nationales et régionales en œuvre et à venir, et notamment les Programmations Pluriannuelles de l'Energie (PPE). Pour réaliser l'analyse comparative des émissions de CO₂ suivant les sources d'énergie, il a été étudié les deux cas suivants :

- ✓ La substitution de l'énergie thermique par de l'énergie solaire ;
- ✓ La substitution de l'énergie nucléaire par de l'énergie solaire.

4.4.1 Substitution de l'énergie thermique par de l'énergie photovoltaïque

En 2017, en région Grand-Est, la production d'énergie thermique était répartie comme suit :

Energie produite (GWh) – Grand-Est – 2017		
Energie Thermique	12 228	
<i>charbon</i>	2 343	19,16 % de l'énergie thermique totale
<i>fioul</i>	103	0,84 % de l'énergie thermique totale
<i>gaz</i>	9 783	80,00 % de l'énergie thermique totale

Ainsi, en se basant sur les facteurs d'émissions retenus au paragraphe 4.3, le facteur d'émission CO₂ moyen associé à la production d'énergie thermique dans la région Grand-Est, peut être estimée ainsi : $19,16\% \times 1\,058 + 0,84\% \times 778 + 80\% \times 443 = 563,7 \text{ g CO}_2\text{eq/kWh}$.

Pour rappel, le facteur d'émission estimé pour la centrale photovoltaïque de Réguisheim sur son cycle de vie est de **33,38 g CO₂ eq/kWh**.

Ainsi, si l'énergie produite par la centrale de Réguisheim venait à remplacer de l'énergie d'origine thermique, chaque kWh produit par la centrale photovoltaïque permettrait d'économiser 533 g CO₂ eq /kWh.

Dans le cas d'une substitution de l'énergie thermique par l'énergie solaire produite par la centrale, le bénéfice lié à la réduction des émissions CO₂ est estimé à 313 634 tonnes équivalents CO₂ sur la durée d'exploitation de la centrale (30 ans) pour une production totale d'énergie solaire estimée à 591 GWh.

4.4.2 Substitution de l'énergie nucléaire par de l'énergie photovoltaïque

Sur la base des facteurs d'émissions retenus au paragraphe 4.3, le facteur d'émissions CO₂ de la production d'énergie nucléaire est de **66 g CO₂ eq/kWh**.

Pour rappel, le facteur d'émission estimé pour la centrale photovoltaïque de Réguisheim sur son cycle de vie est de **33,38 g CO₂ eq/kWh**.

Ainsi, si l'énergie produite par la centrale de Réguisheim venait à remplacer de l'énergie nucléaire, chaque kWh produit par la centrale photovoltaïque permettrait d'économiser 36 g CO₂ eq/kWh.

Dans le cas d'une substitution de l'énergie nucléaire par l'énergie solaire produite par la centrale, le bénéfice lié à la réduction des émissions CO₂ est estimé à 19 291,6 tonnes équivalents CO₂ sur la durée d'exploitation de la centrale (30 ans) pour une production totale d'énergie solaire estimée à 591 GWh.

5 Comparatif des différentes solutions d'ancrage

Pour le projet de centrale photovoltaïque au sol de Réguisheim, il était initialement prévu des ancrages par pieux battus. Néanmoins, cette solution pourra être adaptée suivant les résultats des études géotechniques qui seront menées préalablement à l'installation de la centrale.

Trois solutions d'ancrages sont notamment envisagées pour ce projet :

- ✓ Ancrage des structures photovoltaïques par des pieux battus : les structures des panneaux photovoltaïques sont maintenues par des pieux, enfoncés dans le sol à une profondeur d'environ 4 m ;
- ✓ Ancrage des structures photovoltaïques par des plots bétonnés : les structures des panneaux photovoltaïques sont maintenues par des poteaux déposés sur le sol et maintenus par des plots bétonnés ;
- ✓ Ancrage des structures photovoltaïques par une solution hybride pieux battus et plots bétons. Cette méthode est une méthode hybride entre les deux précédentes. Les pieux des structures sont enfoncés dans le sol sur une longueur d'environ 30 centimètres, puis des plots bétonnés sont coulés autour des pieux.

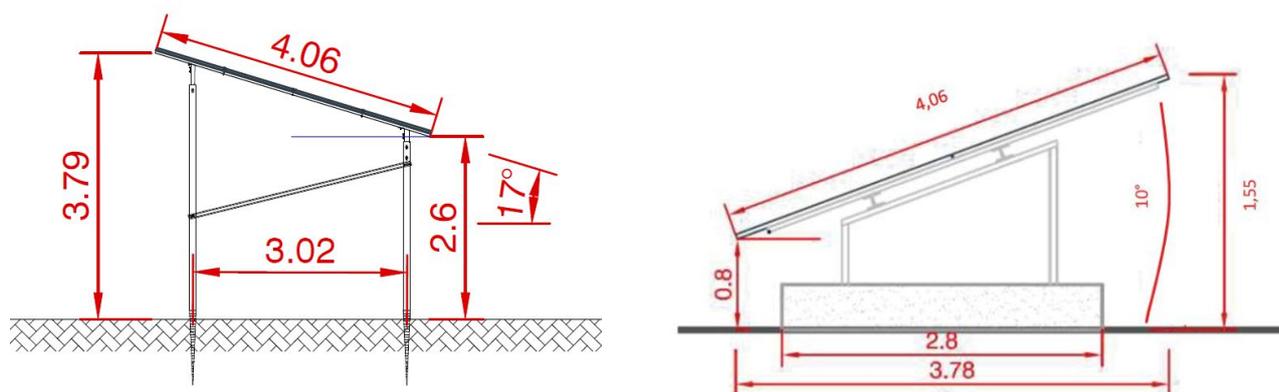


Illustration 2 : Exemple d'un système d'ancrage par pieux battus (à gauche) et par plots bétonnés (à droite)

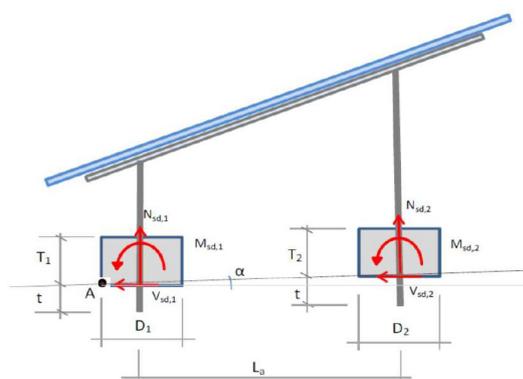


Illustration 3 : Exemple d'un mode d'ancrage hybride pieux et plots bétons

5.1 Impact carbone des différentes solutions d'ancrage

Cette partie vise à calculer les incidences CO₂ des différents modes d'ancrage envisagés. Les hypothèses de calcul suivantes ont été retenues :

- ✓ Nombre de pieux et de plots bétonnés :
 - Pour le cas des pieux d'ancrages : 10 pieux par structures soit 8 340 pieux ;
 - Pour le cas des plots bétonnés : 5 plots par structures, soit 4 170 plots bétonnés ;
 - Pour le cas hybride : 8 340 pieux et 8 340 plots bétonnés.
- ✓ Matériaux :
 - Les pieux d'ancrage sont en acier ;
 - Les plots sont en béton C25/30, fibré.
- ✓ Volumétrie et poids des modes d'ancrages :
 - Pour le cas des pieux, les pieux mesurent 0,08 m de diamètre et 7,8 m de long, et sont creux (épaisseur de paroi de 0,006 m). Ils ont donc un volume total de 41 m³ et un poids total de 329 T (masse volumique de l'acier de 8 000 kg/m³) ;
 - Pour le cas des plots bétonnés, chaque plot mesure 2,8 m de long, 0,4 m de large et 0,4 m de haut, soit un volume total de 1 868,16 m³ de béton ;
 - Pour le cas du mode d'ancrage hybride, les poteaux mesurent 0,08 m de diamètre, et sont creux (épaisseur de paroi de 0,006 m). Ils mesurent 4,1 m de long soit 198 T d'acier total. Chaque plot béton a un diamètre de 1 m et une hauteur de 0,25 m, soit un volume de 1 636 m³ total de béton pour les 8 340 plots.

Ces hypothèses et résultats des calculs sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous.

Données des systèmes d'ancrage au sol			
Système d'ancrage	PIEUX	PLOTS	Mode hybride
Nombre de tables	810	810	810
Nombre de pieux/plots par table	10	5	10
Nombres de demi-tables	40	40	40
Nbre pieux/plots par demi-tables	6	3	6
Nombres de pieux/plots	8 340	4 170	8 340
Tranche d'un pieux (m ²)	0,000725		0,000725
Hauteur du pieux (m)	6,80		4,10
Volume d'un pieu m ³	0,004932		0,00297
Volume des pieux m ³	41,14		24,80
Poids des pieux kg (Masse Volumique acier = 8000 kg/m ³)	329 083,86		198 418,21
Nombre de plots		4 170	8 340
Volume d'un plot (m3)		0,45	0,20
Volume des plots (m3)		1 868,16	1 636,73

	FDES béton (kgCO ₂ eq)	Unité	Source	FDES acier (kgCO ₂ eq)	Unité	Source	Emissions CO ₂ calculées		
							Béton (m ³)	Acier (kg)	TOTAL T CO ₂ eq
Méthode 1 : Pieux d'ancrage	113	Pour 1 m ² de dalle de 30 cm d'épaisseur soit 0,3 m³ DVR 100 ans	Base de données INIES	5,3	Pour 1 kg d'acier DVR 100 ans	Base de données INIES	-	329 083,86	1 744,14
Méthode 2 : Plots béton							1 868,16		703,67
Méthode 3: Pieux + plots béton							1 636,73	198 418,21	1 668,12

Tableau 6 : Analyse des émissions CO₂ des différents modes d'ancrage au sol

Analyse des résultats :

Les résultats des émissions CO₂ des modes d'ancrage au sol montrent que les méthodes des pieux d'ancrage et hybride (pieux d'ancrage et plots bétonnés) sont plus émettrices en CO₂ avec respectivement 1 744,14 T CO₂ eq et 1 668,12 T CO₂ eq.

La méthode d'ancrage par plots bétonnés apparaît comme étant moins émettrice en CO₂ avec 703,67 kgCO₂ eq.