

Rapport du programme de recherche n°39b

BILAN CARBONE® APPLIQUE AUX PROJETS DE PRODUCTION
D'ENERGIE RENOUVELABLE ELECTRIQUE
LES PARCS PHOTOVOLTAÏQUES

Rédaction

Kenza AMAIMIA, Laura BOUSQUET

Coordination

Valérian CANTEGRIL

Approbation :

Sylvain LE ROUX

Table des matières

Introduction	3
1 Définition de la problématique et des hypothèses.....	5
1.1 Sujet traité	6
1.2 Postulats et questions de départ à vérifier	7
2 Etat de l'art et innovation du sujet.....	8
2.1 Premier bilan de la bibliographie et de la veille technologique sur le sujet..	9
2.2 Verrous et innovation du sujet	9
3 Méthodologie	10
3.1 Méthodologie.....	11
4 Principaux résultats	12
4.1 Modules.....	13
4.2 Transformateur.....	14
4.3 Supports	15
4.4 Unité de stockage	17
4.5 Comparaison des bilans carbone réalisés	18
4.5.1 Emissions globales	18
4.5.2 Emissions par MWc	19
4.5.3 Variation des stocks de carbone	21
4.5.4 Comparaison de la méthode de bilan GES simplifiée avec les résultats des evaluations détaillées.....	21
4.6 Conclusion et améliorations futures.....	22

Introduction

ENCIS Environnement cherche sans cesse à améliorer les protocoles et dispositifs expérimentaux ainsi que les outils de modélisation afin d'identifier des pistes techniques à mettre en œuvre pour améliorer la fiabilité des résultats. Les perspectives d'amélioration sont encore nombreuses, ainsi, l'equipe d'ENCIS Environnement consacre du temps à des projets de recherche et développement propres à l'entreprise, lui permettant de faire progresser ses prestations ainsi que la connaissance scientifique, en générale.

Depuis quelques années, les activités de RetD sont de plus en plus structur es, afin de leur donner plus d'envergure. Les objectifs sont les suivants :

- développer les programmes de RetD autour des spécialités suivantes : l'ecologie (chauves-souris, oiseaux, botanique), la transition énergétique et le climat dont les énergies renouvelables (olien et photovoltaïque avant tout) l'eau, les sols et le paysage et le cadre de vie ;
- cibler les actions de RetD nécessaires et utiles à notre développement et l'amélioration de nos prestations
- intégrer ces avancées dans nos rapports et prestations existantes ;
- développer des prestations nouvelles par ces programmes RetD ;
- rédiger, le cas échéant, des articles ou rapports scientifiques ;
- diffuser nos résultats et articles dans des revues, colloques, et/ou sur notre page web dédiée à la RetD.



1 Définition de la problématique et des hypothèses

1.1 Sujet traité

L'activité humaine génère directement ou indirectement des émissions de gaz à effet de serre (GES), responsables de l'effet de serre et du dérèglement climatique. Par conséquent, toute entreprise industrielle, commerciale, administrative ou associative a une préoccupation légitime envers ses émissions dues à ses activités.

Le Bilan Carbone® représente une méthode de quantification des émissions de gaz à effet de serre pour une meilleure évaluation des émissions liées à l'activité, qu'elles soient directes ou induites. C'est à la fois un instrument et une approche. La méthodologie utilisée permet d'inclure toutes les émissions, non seulement celles produites sur site, mais également celles qui contribuent en amont et en aval à la réalisation de l'activité principale.

Dans le cadre d'un projet de production d'énergie renouvelable, l'objectif est d'évaluer l'impact global en termes d'émissions de gaz à effet de serre tout au long de ses phases d'activité : tudes préliminaires, construction, exploitation, maintenance et désinstallation. Cette analyse permet notamment de préciser les émissions de gaz à effet de serre et de les exprimer en grammes équivalent CO₂ (gCO₂eq) ainsi qu'en grammes équivalents CO₂ par kilowattheure produit (gCO₂eq/kWh) ou en grammes équivalent CO₂ par kilowatt-crête (gCO₂eq/kWc). Les chiffres commun  mement utilisés sont des moyennes proposées par l'ADEME sur la base d'ACV réalisées sur des projets aux caractéristiques très variées. En réalité, des variations très fortes peuvent être observées en fonction des caractéristiques propres à chaque projet. Il dépend en particulier de la méthodologie (scope pris en compte), emplacement et dimension du site, aménagements prévus et technologies utilisées.

Aujourd'hui les données disponibles portent principalement sur les générateurs (ex : panneaux solaires, éoliennes) mais sont peu nombreuses et présente des incertitudes très fortes sur l'ensemble des autres postes d'émission (onduleurs, transformateurs, fondations, pistes, etc.). L'objectif de ce programme est ainsi d'améliorer l'état de l'art en créant une base de données sur les postes les plus importants.

Les travaux seront, ici, axés sur le photovoltaïque, mais une partie des données collectées pourra être appliquée à d'autres technologies, voire à d'autres types de projets.

1.2 Postulats et questions de départ à vérifier

- les émissions GES des **modules PV** ne sont pas toujours communiquées par les MOA, et lorsque c'est le cas il s'agit des ECS. Les valeurs sont généralement très différentes des chiffres donnés par les quelques ACV disponibles :
 - Quels sont les différences méthodologiques engendrant ces écarts ?
 - Comment y remédier ?
 - Lorsqu'aucune information n'est communiquée par le MOA, quelle valeur est-il pertinente d'utiliser ?
- les émissions des **supports** devraient être affinées pour prendre en compte les types de technologies (supports surélevées, trackers, ombr  ries) ;
 - Comment calculer les émissions GES des différents types de supports ?
- concernant les émissions liées à la **fin de vie** les questions suivantes se posent :
 - Quel est le pourcentage de panneaux recyclés en France ?
 - Quelles sont les émissions émises pour recycler ces panneaux ?
 - Que fait SOREN des matériaux récupérés ? Sont-ils stockés ?
 - Des entreprises fabriquent-elles des panneaux entièrement à partir de matériaux issus du recyclage des panneaux ?
- Combien de quantité de CO₂eq cette commercialisation éviterait-elle ?



2 Etat de l'art et innovation du sujet

2.1 Premier bilan de la bibliographie et de la veille technologique sur le sujet

Un bilan réalisé en 2024 montrait dans le cadre du précédant rapport montrant que la bibliographie est peu fournie sur le sujet. Il est notable qu'elle ne décompose pas suffisamment les différents postes d'émission pour permettre l'évaluation précise des émissions GES d'un projet précis et que les constructeurs ne fournissent que trop rarement des données exploitables pour la réalisation d'un bilan carbone d'un projet d'énergie renouvelable en développement ou venant d'être construit.

Des avancées concrètes ont 茅t   faites au cours du projet de recherche mené par ENCIS, mais il reste encore des points 脿 creuser, en particulier les points suivants avaient 茅t   identifiés :

- **Supports** : analyse des calculs transmis et contact avec d'autres fournisseurs pour plus de comparaison
- **Fin de vie** : trouver plus d'études sur l'impact du recyclage, rentrer en contact avec Soren
- **Modules PV** : rester 脿 jours dans les ACV pour pouvoir proposer un chiffre de remplacement 脿 celui de l'ADEME lorsque le client ne fournit pas d'ECS, et pouvoir préciser le chiffre d'ECS lorsque communiqué

Quelques publications parues depuis, notamment « *Evaluer le bilan GES d'un projet photovoltaïque au sol* » (ADEME, 2024) rappellent la méthodologie mais n'apportent pas de précision sur les méthodes de calcul, et notamment de facteurs d'émissions spécifiques 脿 utiliser en fonction des données disponibles.

2.2 Verrous et innovation du sujet

La problématique et le sujet ont 茅t   retenus pour ce programme de RetD car ils permettent de répondre 脿 un manque d'information scientifique sur le sujet, car il existe des verrous 脿 lever ou parce que le sujet est particulièrement nouveau et nécessite de répondre 脿 plusieurs questions, quelle que soit la discipline concernée (science sociale, technologique, modélisation informatique, physique, etc.). Voici les principaux verrous et innovations relevés dans le cadre de ce programme :

- absence de données : travail de collecte important auprès de fabricants et fournisseurs, et probable nécessité de réalisation des évaluations d'émissions GES pour plusieurs sous-composants ;
- difficulté d'accès aux données : peu de bases de données gratuites, pas de communication des fabricants et fournisseurs ;
- absence de données spécifiques : peu d'analyses de cycle de vie ont 茅t   réalisées sur des produits spécifiques comme les supports, les routes ou encore les onduleurs.



3 Méthodologie

3.1 Méthodologie

Une démarche, une méthodologie, des protocoles ou des outils spécifiques sont mis en place pour répondre à la problématique. La démarche est décrite ici, en détaillant les outils et méthodes à employer :

- au regard du travail de recherche effectué en 2024, un historique des bilans GES des installations PV sera réalisé pour voir l'impact des choix de développements et des hypothèses faites lors de l'étude. Une mise à jour des études sera réalisée avec la méthode actualisée en 2024 afin de les rendre comparables.
- analyse des méthodologies des ECS et des ACV afin d'estimer les émissions GES des panneaux en présence comme en absence de données ;
- contact de fabricants et fournisseurs pour récupérer les données relatives aux sous-composants ou procédés (matériaux, dimensions, origine, etc.) en fonction des technologies ;
 - supports
 - fondations le cas échéant (ex : longrines)
 - fin de vie des éléments constitutifs de la centrale PV
- recherche des données disponibles dans la littérature existante ;
- constitution d'une base de données dédiée.

Le travail réalisé permettra de comparer les émissions d'un projet en fonction de ses caractéristiques, et d'orienter le maître d'ouvrage vers la moins impactante. Les caractéristiques pourront être :

- matériaux utilisés : bois, béton, acier, etc.
- origine des composants (France, Europe, Asie, etc.)
- type et caractéristique des fondations (massifs b  tons, pieux métalliques, gabions lestés, etc.)
- structures retenues pour le PV (tracker / fixe et hauteur, etc.)

4 Principaux résultats

4.1 Modules

En l'absence d'ECS ou d'engagement du MOA à choisir un modèle respectant le critère Carbone permettant son  l  gibilit   aux appels d'offres, d'autres valeurs doivent être utilisées.

La base INIES met à disposition les résultats issus de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) de produits de construction ou équipements permettent d'elaborer une déclaration environnementale (FDES ou PEP) dans la perspective de calculer la performance environnementale d'un bâtiment. Des ACV de panneaux de différentes marques sont présents, cette base de données sera ainsi utilisée afin de vérifier la validité des ECS, ou de présenter une valeur standard lorsque le maître d'ouvrage n'a pas d'information sur le matériel qui sera utilisé lors de la construction de la centrale.

Pour ce faire les informations concernant la puissance, la masse des panneaux, ainsi que les émissions de CO₂eq associées aux étapes de fabrication, distribution, installation et utilisation ont  t  t collectés et répertoriés. Les phases de distribution, installation et utilisation ne nous intéressent pas car génériques et moins précises que les évaluations que nous pouvons réaliser dans le cadre des études que nous réalisons.

Il convient de souligner que les ACV disponibles sur le site de l'INIES intègrent le crédit recyclage, qui correspond à une compensation carbone liée à la valorisation des matériaux en fin de vie. Or, conformément à la méthodologie appliquée par ENCIS Environnement, aucune compensation n'est prise en compte. Par ailleurs, la base INIES fournit  g  alement un poste « fin de vie » estimant les émissions liées au traitement en fin de vie des panneaux. Cependant, cette valeur ne doit pas être intégrée dans le calcul final, car un mode de calcul spécifique et indépendant pour la fin de vie est prévu dans les études. Lorsque plusieurs ACV sont disponibles pour un même fournisseur, seule les plus récentes sont utilisées. Les résultats sont synthétisés dans le graphique suivant :

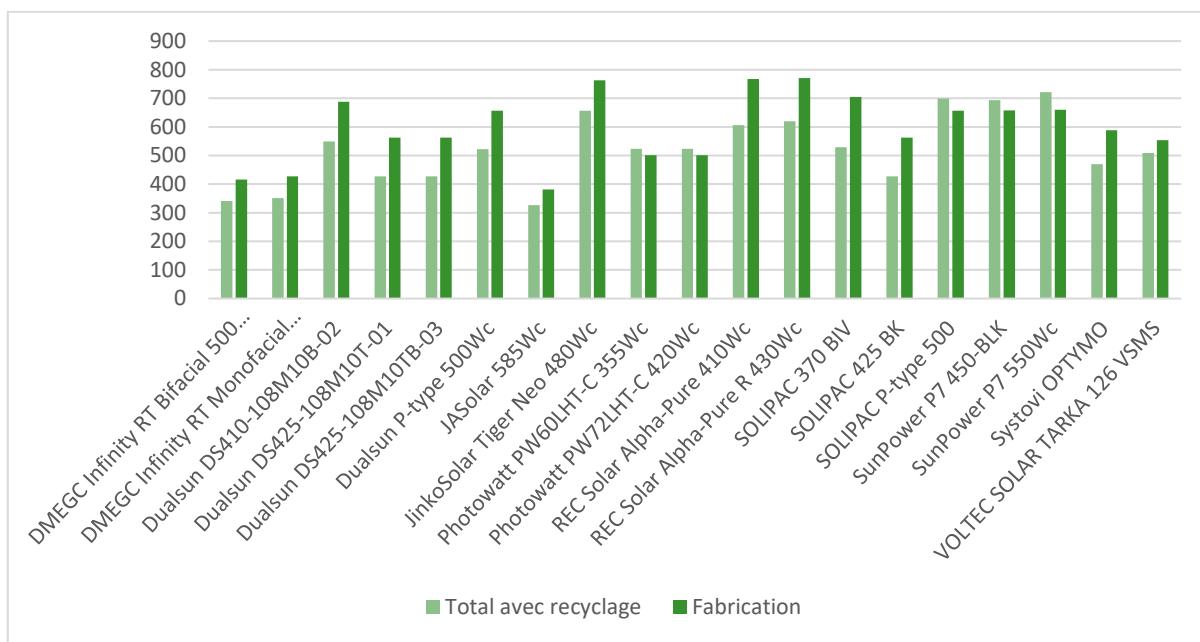


Figure 1 : Comparaison des émissions de gaz à effets de serre associées à la fabrication et à la totalité du cycle de vie des modules (kgCO₂eq/kWc)

La moyenne est de 599 kgCO₂eq/kWc sur la phase de fabrication et 522 kgCO₂eq/kWc en incluant la fin de vie. Les modules qui présentent les valeurs les plus élevées sur la phase de fabrication (REC Solar, Jinko Solar) ont des ACV plus anciennes, ou considèrent des modules de rendement plus faible que les gammes actuellement commercialisées par les mêmes fabricants.

Nous proposons de retenir une valeur standard de 700 kgCO₂eq/kWc, légèrement conservatrice au regard des observations réalisées en l'absence données communiquées par le maître d'ouvrage.

4.2 Transformateur

Les transformateurs émettent des GES du fait de la quantité de fer, cuivre et aluminium nécessaires à leur fabrication. L'ADEME propose un chiffre de 10,9 kg CO₂eq/kVA. Ce chiffre est obtenu à partir d'un transformateur de 1 MVA et ce chiffre est décrit comme non-conservateur par l'ADEME, c'est-dire qu'il est considéré que le mode de calcul n'a pas surestimé l'impact carbone du transformateur. On a d'ailleurs eu accès à d'autres études confirmant cet ordre de grandeur (Mansilha, Brondani, Farret, Rosa, & Hoffmann, 2018).

Pour affiner ce résultat, des données d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) des transformateurs électriques ont été extraites de la Base Empreinte® de l'ADEME ainsi que sur le site du fabricant ABB. Les émissions relatives (tCO₂eq/MVA) ont été calculées à partir des données présentées (puissance du transformateur, émissions associées). Ces valeurs ont été regroupées dans un tableau pour analyser la relation entre puissance et impact carbone. En traçant la courbes des émissions relatives en fonction de la puissance, un profil exponentiellement décroissant a été observé, illustré par la courbe de tendance : $y = 3047,8 e^{-0,801x}$

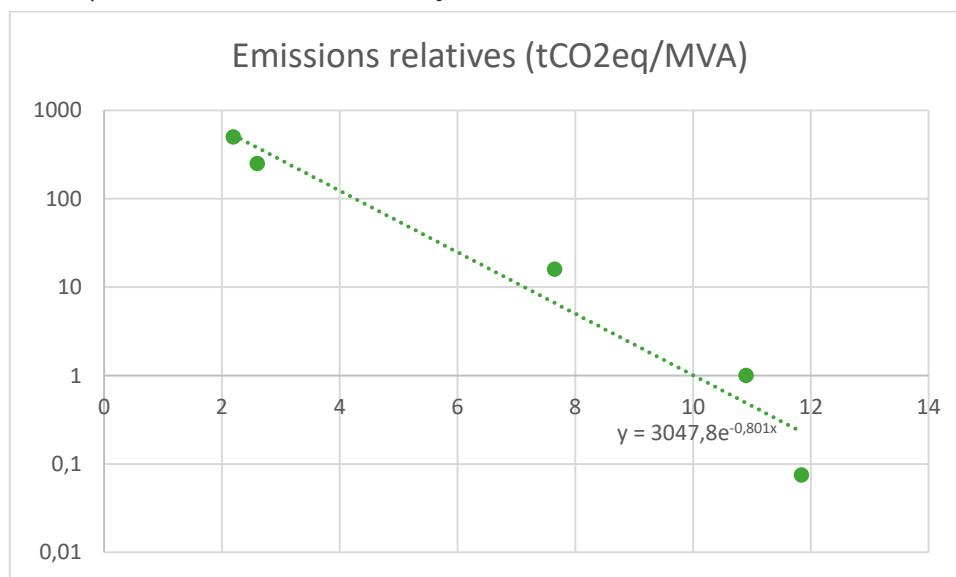


Figure 2 : Emissions relatives (tCO₂eq/MVA)

Cette relation traduit l'effet d'économie d'échelle, où les émissions par MVA diminuent lorsque la puissance du transformateur augmente, améliorant ainsi l'efficacité environnementale relative des équipements de plus grande taille et permet d'estimer l'impact carbone d'un

transformateur en fonction de sa puissance nominale, lorsqu'une donné spécifique n'est disponible.

Cette estimation, basée sur uniquement cinq ACV de transformateurs, permet d'obtenir une relation cohérente entre puissance et impact carbone. Une piste d'amélioration pourrait consister à intégrer d'autres ACV pour affiner l'équation, mais compte tenu de l'incertitude moyenne (30 %) et de la faible contribution de ce poste au bilan carbone global (moins de 1 %), ce niveau de précision est jugé suffisant à ce stade.

4.3 Supports

Les structures qui soutiennent les panneaux photovoltaïques sont généralement fabriquées à partir d'acier, voire d'aluminium, des matériaux qui eux-mêmes émettent des gaz à effet de serre lors du processus de fabrication. L'ADEME propose un chiffre de 40,2 kgCO₂eq/m² de module. Ce chiffre correspond au cas maximisant pour des supports fixes ou mobiles et est conservateur.

Le facteur d'émission proposé par l'ADEME, exprimé en fonction d'une surface, ne peut prendre en compte les nouvelles technologies visibles sur le marché, comprenant :

- des supports dans d'autres matériaux que l'acier, tel le bois,
- des supports plus hauts, pour s'adapter à la demande croissante de projets d'agrivoltaisme,
- des supports avec trackers, qui permettent aux panneaux de suivre la course du soleil.

Afin d'affiner cette estimation et de refléter la diversité des systèmes présents sur le marché, une analyse détaillée a été menée en décomposant chaque composant structurel selon le type d'installation. Les travaux se sont concentrés sur les typologies de centrales les plus souvent rencontrées, avec des structures métalliques de différentes hauteurs et différents types de fondations (pieux métalliques, puits b  ton, ou massifs béton). Cette analyse repose sur des données collectées auprès de maitres d'ouvrages, fournisseurs et sur des fiches techniques disponibles publiquement.

Les structures ont été décomposées en poteaux, portiques, pannes, bracons et fondations (pieux, puits ou massifs) comme présenté sur l'illustration ci-dessous.

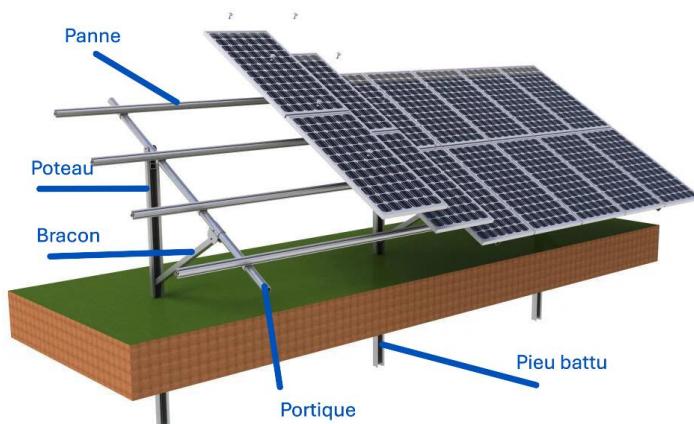


Figure 3 : l  ments composant un support photovoltaïque (source : Wanhos Solar)

Des caractéristiques types ont été retenues pour chaque configuration :

- structure fixe basse (< 1,2 m) ;
- structure fixe haute (> 1,8 m) ;
- tracker 1 axe.

Les éléments ont été évalués sur la base de tables de 9*2. Les hypothèses sur les dimensions précises, les matériaux employés, les masses linéaires extraites de données techniques, et les facteurs d'émission spécifiques à chaque matériaux (issus de la Base Empreinte ® de l'ADEME). Les principales caractéristiques retenues sont présentées dans le tableau ci-dessous :

	Structure basse	Structure haute	Tracker 1 axe
Profondeur pieux	2 m	2,5 m	2,5 m
Diamètre pieux	120 mm	160 mm	180 mm
Profondeur puits	0,8 m	1 m	1 m
Diamètre puits	400 mm	500 mm	600 mm
Dimensions massif	3000*600*400 mm	3000*600*600 mm	3000*800*600 mm
Hauteur moyenne poteaux	0,95 m	1,2 m	1,2 m
Profil poteaux	IPE 140	IPE 300	IPE 300
Profil portiques	HEA 120	HEA 160	HEA 200
Profil pannes	C140 - 20	C140 - 20	C140 - 20
Profil bracons	CARF 60*40	CARF 100*60	CARF 100*60

Tableau 1 : Hypothèses utilisées pour la modélisation des supports

Sur la base de ces hypothèses, les fondations puits sont celles présentant les émissions les plus faibles. Les fondations massif béton sont au contraire celles avec les résultats les plus élevés. Les fondations de type pieux, les plus couramment utilisées présentent un résultat intermédiaire.

Chaque composant structurel a été analysé individuellement afin de calculer son empreinte carbone pour une table de 9*2 modules. L'ensemble des empreintes associées à ces éléments (poteaux, portiques, pannes, bracons, fondations) a ensuite été sommé, puis rapport   à l'unité de surface (par m²). Au terme de cette analyse, il apparaît que l'empreinte carbone obtenue pour une structure fixe basse est du même ordre de grandeur que celle proposée par l'ADEME (38 kgCO₂eq/m²). Ce résultat permet de valider la cohérence de la méthodologie utilisée et que le raisonnement peut être transposé aux autres types de structures. Pour des structures hautes, l'empreinte augmente pour atteindre 59 kgCO₂eq/m² et il atteint 70 kgCO₂eq/m² pour des trackers, qui exigent plus de ressources en raison en raison des efforts plus importants exercés sur les structures. Ces ordres de grandeur pourraient être améliorées avec la constitution d'une base de données de structures utilisées pour différentes centrales existantes.

D'autres configurations, notamment des structures en bois, pourraient être ´étudiés en vue de comparer les résultats et de proposer aux maitres d'ouvrages les solutions les moins émettrices

pour leurs projets. Cependant, ces systèmes étant peu répandues, les données étaient insuffisantes afin de réaliser cette évaluation.

L'analyse menée permet d'adapter le facteur d'émission aux différents types de structures : 38 kgCO₂e/m² pour les structures fixes basses, 59 kgCO₂e/m² pour les structures fixes hautes, 70 kgCO₂e/m² pour les structures hautes avec trackers.

 tant donné que ce poste représente entre 15 et 25 % des émissions totales d'un parc, cette approche constitue une base solide. Des pistes d'amélioration résident dans un affinement des hypothèses concernant les dimensions précises et le nombre d'éléments structurels par installation.

4.4 Unité de stockage

Plusieurs parcs photovoltaïques se tournent vers la mise en place de batteries de stockage de l'lectricité, entraînant un fort poste d'émission de GES.

Les émissions de gaz  t effet de serre liées à la fabrication des batteries de stockage varient significativement selon la technologie employée, les procédés industriels et les périmètres d'analyse du cycle de vie.

Dans l'étude de Liu *et al.* (2024), publiée dans *Frontiers in Energy Research*, le facteur d'émission pour des batteries Lithium Fer Phosphate (LFP) est estimé à 90,8 kgCO₂e/kWh. Ce chiffre, basé sur une production en Chine, comprend l'extraction des mat  res prem  res, la fabrication, l'assemblage des batteries et leur fin de vie. Il ne prend pas en compte le transport vers le site.

Une méta-analyse plus large, publiée par Peiseler *et al.* dans *Nature Communications* (2024), propose une fourchette d'émissions pour les batteries LFP comprise entre 54 et 69 kgCO₂eq/kWh, avec une valeur médiane à 62 kgCO₂eq/kWh, pour un périmètre identique, mais représentatif de plusieurs régions du monde et de procédés de fabrication plus récents et diversifiés. Afin d'adopter une marge et d'avoir un chiffre plut   conservateur en l'absence de données précises, le facteur d'émission retenu sera de 91 kgCO₂eq/kWh.

De manière générale, les batteries de stockage ont une durée de vie de 10 à 20 ans, et un nombre de cycle estimé entre 5 000 et 8 000. Il faut donc considérer que les batteries de stockage devront probablement être renouvelées pendant la durée de vie du parc photovoltaïque.

Les valeurs d'émissions de GES liées à la fabrication des batteries de stockage restent très variables et dépendent fortement de la technologie considérée, des procédés de fabrication et du périmètre retenu dans les analyses de cycle de vie. La recherche a été menée sur les batteries Lithium Fer Phosphate (LFP, étant un type de batterie lithium-ion), car elles représentent aujourd'hui la technologie la plus déployée dans les projets photovoltaïques.

Le facteur d'émission retenu est de 91 kgCO₂eq/kWh, ce qui correspond à la valeur la plus élevée identifiée afin d'adopter une approche conservatrice, mais cela reste à affiner. Des

approfondissements pourraient porter sur la recherche d'analyses de cycle de vie supplémentaires, la collecte de données auprès des constructeurs, ainsi qu'une recherche élargie à d'autres technologies de batteries susceptibles d'être intégrées dans des projets photovoltaïques à l'avenir.

4.5 Comparaison des bilans carbone réalisés

Un travail d'analyse comparative sur les bilans carbone réalisés pour les projets photovoltaïques a été mené.    ce jour, 24 bilans carbone ont été intégrés dans notre base de données. Afin de dégager une vision d'ensemble cohérente et de faciliter la comparaison entre les projets, tous les bilans ont été repris et traités selon une méthodologie homogène. Pour cela, le tableur de calcul simplifié des bilans carbone a été utilisé, et la durée de vie des installations a été fixée à 30 ans, afin d'obtenir des résultats comparables. Plusieurs paramètres sont alors comparés : les émissions par MWc, les émissions par GWh, et les variations des stocks de carbone.

4.5.1 Emissions globales

Les émissions totales associées aux projets étudiés se situent entre 2 500 t CO₂eq pour les petites centrales et 71 000 t CO₂eq pour les grandes installations. Ces valeurs donnent une idée de l'échelle des impacts, qui augmente logiquement avec la taille et la puissance des projets.

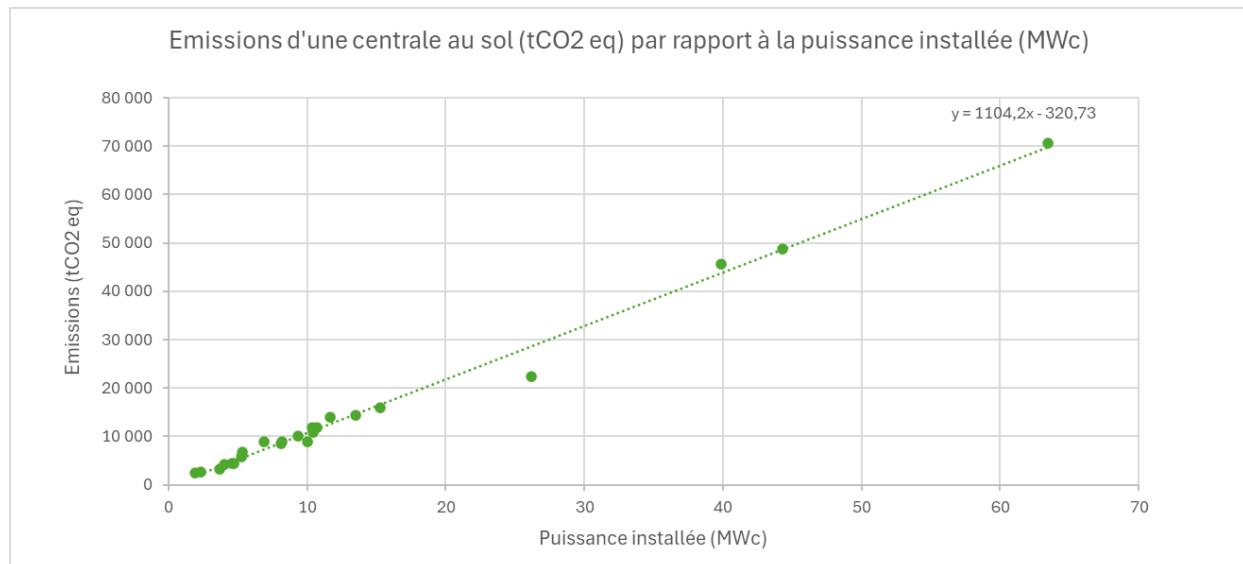


Figure 4 : Emissions d'une centrale au sol par rapport à la puissance installée

Numéro du projet	Puissance (MWc)	Production sur 30 ans (GWh)	Emissions (tCO2 eq)	Emissions (tCO2/MWc)	Emissions 30 ans (tCO2/GWh)
1	3,70	133,00	3 239	875,41	24,35
2	4,69	181,00	4 453	949,47	24,60
3	5,28	<i>Donnée indisponible</i>	5 739	1 086,93	-
4	2,30	90,00	2 609	1 134,35	28,99
5	26,19	1 107,00	22 416	855,90	20,25
6	1,89	67,60	2 539	1 343,39	37,56
8	39,90	1 675,26	45 646	1 144,01	27,25
9	11,63	569,00	14 079	1 210,78	24,74
10	63,43	2 578,38	70 689	1 114,41	27,42
11	10,00	383,40	8 933	893,66	23,30
12	10,44	382,04	10 955	1 049,73	28,68
13	10,36	393,06	11 874	1 146,47	30,21
14	5,30	220,98	6 778	1 278,87	30,67
15	4,58	165,39	4 363	952,62	26,38
16	13,49	440,00	14 373	1 065,85	32,67
17	4,03	170,70	4 274	1 061,86	25,04
18	44,30	1 430,00	48 782	1 101,07	34,11
19	6,89	237,72	8 892	1 290,00	37,41
20	15,29	561,27	16 039	1 048,85	28,58
21	10,67	497,25	11 859	1 111,02	23,85
22	8,18	322,03	8 854	1 082,66	27,49
23	8,12	345,24	8 465	1 042,74	24,52
24	9,33	340,02	10 086	1 081,14	29,66

Tableau 2 : Synthèse des différents bilans carbone réalisés par ENCIS

4.5.2 Emissions par MWc

Les émissions rapportées à la puissance installée varient entre 800 et 1 400 tCO₂eq/MWc. De manière générale, plus la puissance installée est importante, plus les émissions par MWc sont faibles. Par exemple, les projets n  o5 et n  o10, présentant une puissance de 26 MWc et 10 MWc, révèlent des émissions de 855 et 893 tCO₂eq/MWc. Au contraire, le projet n  o6, d'une puissance de 1,89 MWc montre des émissions de 1 343 tCO₂eq/MWc. Ces observations suggèrent qu'il pourrait exister un effet d'échelle : les projets de plus grande taille diluent davantage certains postes fixes (raccordement, infrastructures, études), ce qui abaisse les émissions par MWc.

Toutefois, au vu du nombre limité de projets étudiés, il est difficile de dégager une tendance réellement claire. Par exemple, certains gros projets comme le n  9 montrent une puissance installée élevée (63 MWc) mais g  alement des émissions par MWc importantes (1 114 tCO₂eq/MWc). A l'inverse, le projet n  1 qui a une petite puissance installée (3,7 MWc) présente tout de mêmes des émissions assez faibles (875 tCO₂/MWc). La différence entre ces deux projets s'explique par les émissions considérées pour les modules photovoltaïques, les premières étant maximisantes et les deuxièmes étant des modules bas carbones.

Cela révèle que la corrélation entre la puissance et les émissions par MWc ne peut pas être toujours généralisée à l'ensemble des projets.

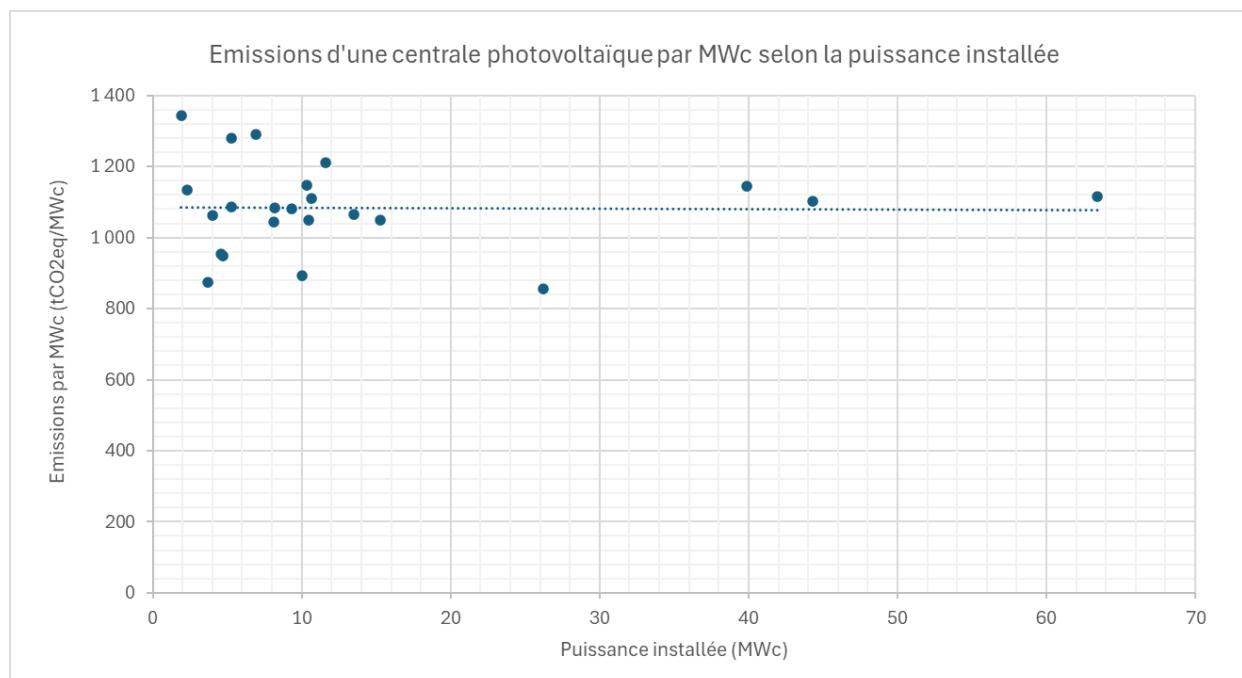


Figure 5 : Emissions d'une centrale photovoltaïque par MWc selon la puissance installée

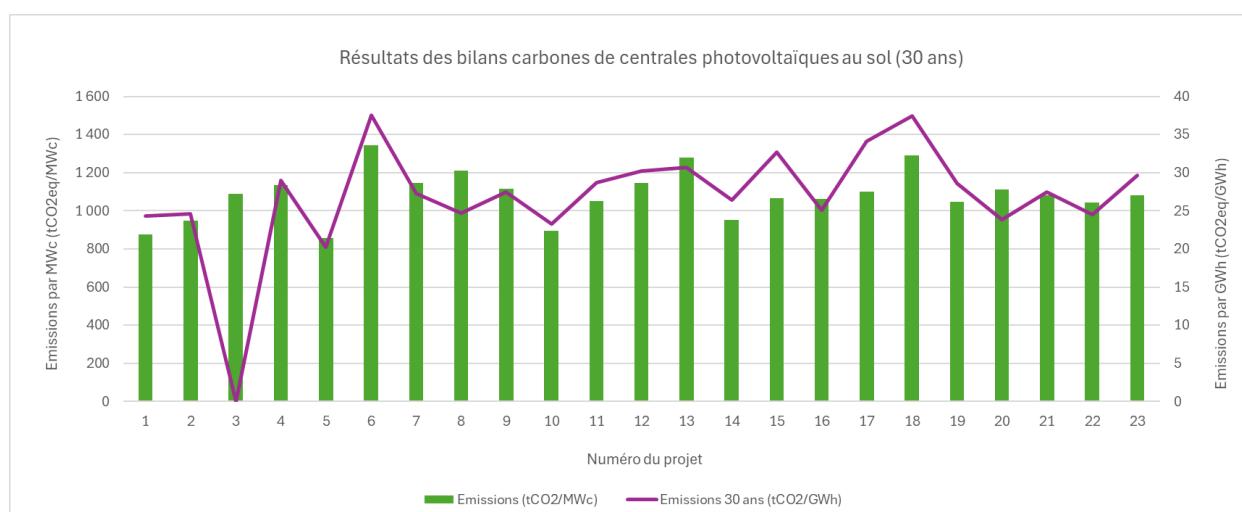


Figure 6 : Emissions des différents projets par MWc et GWh

4.5.3 Variation des stocks de carbone

En ce qui concerne l'occupation des sols et les stocks de carbone associés, les impacts varient   norm  m  t selon les projets. Certains entraînent des pertes massives de stock carbone, par exemple le projet n  7, qui enregistre une variation négative de plus de 22 000 tCO₂eq en raison d'un défrichement conséquent. A l'opposé, d'autres projets permettent de renforcer les puits de carbone, comme le projet n  9, qui combine plantations de haies et passage de cultures en prairie, aboutissant à un gain de près de 8 000 tCO₂eq.

Ces exemples illustrent que l'occupation initiale des sols et les pratiques agricoles associées au projet constituent des leviers déterminants. Les défrichements massifs ou conversions de prairies permanentes sont particulièrement pénalisants, tandis que des actions de renaturation ou de diversification écologique peuvent contribuer positivement au bilan.

4.5.4 Comparaison de la méthode de bilan GES simplifiée avec les résultats des évaluations détaillées

Une comparaison a été effectuée entre les résultats du bilan carbone complet et ceux de la méthode simplifiée utilisée dans le cadre de cette étude.

Certains résultats diff  rent beaucoup, avec des écarts de - 30 à +60 %, mais peut s'expliquer par plusieurs raisons. Tout d'abord, les bilans carbones les plus anciens n'ont pas la même méthodologie qu'actuellement, et ne prennent pas en compte les mêmes choses : absence de prise en compte des supports, absence de prise en compte des distances de raccordement, facteurs d'émissions maximisant plus élevés pour les modules photovoltaïques. De plus, la durée de vie considérée n'est pas toujours la même entre les deux méthodes (harmonisation à 30 ans pour cette étude). Ainsi les écarts peuvent parfois être significatifs.

Néanmoins, sur les bilans carbones les plus récents, on note que les résultats sont beaucoup plus proches et peuvent présenter des écarts de seulement 0 à 4%, ce qui montre que la méthode simplifiée permet d'avoir un bon aperçu des émissions de GES de manière fiable.

Numéro du projet	Date de réalisation du BC	Durée de vie du projet	Emissions totales du bilan GES simplifiée (tCO ₂ eq)	Emissions totales du BC complet (tCO ₂ eq)	Différence
1	02/04/2024	30 ans	3 239	2 781	16,47 %
2	08/04/2024	30 ans	4 453	3 206	38,90 %
3	22/03/2024	40 ans	5 739	4 592	24,98 %
4	22/04/2024	30 ans	2 609	1 621	60,95 %
5	28/06/2024	30 ans	22 416	20 044	11,83 %
6	27/06/2024	30 ans	2 539	2 202	15,30 %
7	19/11/2024	40 ans	45 646	46 822	- 2,51 %
8	11/10/2024	30 ans	14 079	15 169	- 7,19 %

Numéro du projet	Date de réalisation du BC	Durée de vie du projet	Emissions totales du bilan GES simplifié (tCO ₂ eq)	Emissions totales du BC complet (tCO ₂ eq)	Différence
9	26/11/2024	40 ans	70 689	72 152	- 2,03 %
10	10/03/2023	40 ans	8 933	8 783	1,71 %
11	11/02/2025	30 ans	10 955	9 736	12,52 %
12	09/01/2025	30 ans	11 874	11 979	- 0,88 %
13	19/11/2024	40 ans	6 778	6 865	- 1,27 %
14	04/04/2025	30 ans	4 363	4 085	6,81 %
15	14/04/2025	30 ans	14 373	13 838	3,87 %
16	18/03/2025	30 ans	4 274	4 233	0,97 %
17	07/08/2025	30 ans	48 782	47 691	2,29 %
18	13/08/2025	40 ans	8 892	9 139	- 2,70 %
19	28/05/2025	30 ans	16 039	14 817	8,25 %
20	28/05/2025	30 ans	11 859	12 652	- 6,27 %
21	08/07/2025	30 ans	8 854	8 655	2,30 %
22	20/08/2025	35 ans	8 465	12 045	- 29,7 2%
23	14/08/2025	35 ans	10 086	9 930	1,57 %

Tableau 3 : Comparaison entre la méthode de bilan GES simplifié et les résultats du bilan carbone complet

4.6 Conclusion et améliorations futures

Des avancées concrètes ont été faites au cours de ce projet de recherche, qui a permis d'affiner les postes les plus importants. Certains points pourraient encore être approfondis, biens qu'ils n'auraient à priori qu'une incidence mineure sur les résultats finaux des études :

- **Supports** : collecte de données d'autres fournisseurs pour davantage de comparaison et évaluation d'une structure bois
- **Batteries de stockage** : intégrer à la base davantage d'ACV afin d'affiner le chiffre proposé
- **Modules PV** : maintenir à jour les données sur les ACV pour pouvoir proposer un chiffre de remplacement à celui de l'ADEME lorsque le client ne fournit pas d'ECS, et pouvoir préciser le chiffre d'ECS lorsque communiqué
- **Fin de vie** : compléter la bibliographie des études sur l'impact du recyclage, partager les REX avec Soren