

# ESTIMATION DE L'EMPREINTE CARBONE DU PROJET PHOTOVOLTAÏQUE SUR LE SITE DU HAUT MONTBELLEUX, SELON LA METHODE QUANTIGES – MARS 2024

## Introduction

Cette étude a été réalisée en réponse à la sollicitation de plusieurs associations (La 3M Montbelleux, la Passiflore, DesTerresMINEes 35) et du Collectif des riverains au projet de futur parc photovoltaïque sur le site du Haut Montbelleux, à Luitré-Dompierre (35) et avec l'appui du groupe local rennais de l'association Les Shifters. Elle tente d'objectiver les impacts du projet pour éclairer le débat public, et cela sans parti pris ni politique, ni sur la pertinence du projet en lui-même.

A l'aide de méthodes reconnues et en accès libre, nous avons cherché à répondre à la question suivante :

Quelle est l'empreinte carbone d'un projet photovoltaïque au sol du type Montbelleux en termes de gaz à effet de serre, en intégrant la composante carbone des milieux naturels?

Le terme **Bilan Carbone®** se réfère à la méthode développée par l'ADEME et l'Association pour la transition Bas Carbone (ABC), qui propose la définition et la mise en œuvre d'une démarche de progrès en matière de GES. Cependant, la méthodologie Bilan Carbone® ne traite pas des émissions évitées<sup>1</sup>. Or c'est bien l'intérêt d'un projet d'énergies renouvelables que de diminuer les émissions de GES liées à la production de l'électricité.

Pour évaluer l'empreinte écologique du projet, nous avons donc préféré la méthode **QuantiGES<sup>2</sup>** ou « **quantification des actions de réduction des émissions de GES** », elle aussi développée par l'ADEME. Ainsi nous pourrions mesurer et comparer les impacts du projet, tant positifs avec la plus-value écologique générée par les panneaux photovoltaïques, que négatifs liés à la transformation des milieux naturels. Nous utiliserons principalement pour cela les données publiques disponibles sur la Base empreinte® de l'ADEME.

Le calcul de l'empreinte carbone des projets photovoltaïques est une donnée assez peu répandue dans les études d'impact consultées, quoique parfois demandée en complément par la MRAE<sup>3</sup>. Dans ce bilan carbone, même lorsqu'il est produit ou estimé, la prise en compte du carbone émis par les milieux naturels est encore plus rare. A notre connaissance, seule l'étude réalisée dans le cadre du vaste projet Horizeo par l'INRAE (1700 ha dans les Landes à Saucats, planifié pour 2024) a présenté fin 2021 un bilan carbone complet avec tous les aspects. Notre étude est donc novatrice sur ce point, et s'appuie sur les dernières recherches connues.

---

<sup>1</sup> Guide méthodologique Bilan carbone V8 – 3.4

<sup>2</sup> Version 2022 - <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4827-methode-quantiges.html>

<sup>3</sup> Mission Régionale d'Autorité Environnementale. Par exemple ici, point 5 soulevé par la MRAE (on notera l'absence du carbone biogénique dans la réponse) : <https://www.lot.gouv.fr/contenu/telechargement/17309/132033/file/a3.2.M%C3%A9moire%20en%20r%C3%A9ponse%20%C3%A0%20l%27avis%20de%20la%20MRAE.pdf>

## Sommaire

Ce rapport suivra étape par étape la démarche QuantiGES de l'ADEME. Deux parties préalables ont été ajoutées afin d'éclaircir la démarche avant de rentrer dans les parties plus techniques.

En complément, trois parties ont été ajoutées sur des questions qui pourraient être sujettes à débat.

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction.....                                                   | 1  |
| Principe général de l'analyse.....                                  | 3  |
| Définition des acteurs .....                                        | 4  |
| Etape 1. Définir l'action à quantifier .....                        | 5  |
| Etape 2. Définir l'objectif de la quantification .....              | 6  |
| Etape 3. Choisir le scénario de référence.....                      | 7  |
| Etape 4. Construire l'arbre des conséquences de l'action .....      | 9  |
| Etape 5. Définir le périmètre de la quantification.....             | 9  |
| Etape 6. Rassembler les données disponibles.....                    | 11 |
| Etape 7. Quantifier l'impact GES de l'action .....                  | 17 |
| Etape 8. Analyser le résultat de la quantification .....            | 21 |
| Réflexion sur l'échelle spatiale de l'analyse .....                 | 24 |
| Biais et zones d'ombre de l'étude .....                             | 26 |
| Eventualité d'un « reboisement compensateur pour le carbone » ..... | 28 |
| Annexes .....                                                       | 32 |

Abréviations utilisées dans ce rapport :

- EnR : énergies renouvelables
- FE : facteur d'émission.
- GES : gaz à effet de serre ;
- PV : photovoltaïque.

Unités utilisées :

- $t_{eq}CO_2$  ou « tonnes de  $CO_2$ -équivalent » : unité de mesure des GES, qui ramène l'ensemble des émissions au pouvoir réchauffant du dioxyde de carbone ;
- tC ou « tonnes de carbone » : unité utilisée pour parler du stock de carbone dans les milieux naturels.
- kWh et MWh : unités de puissance de production d'électricité par les panneaux solaires.

## Principe général de l'analyse

Un projet photovoltaïque a pour objectif de produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire, en émettant peu de gaz à effet de serre. C'est ce qui le classe parmi les « énergies renouvelables ».

La figure 1 rappelle cependant que même un projet d'énergie renouvelable rejette des gaz à effet de serre (GES) : lors de la fabrication de ses composants, de son transport, des travaux d'installation et du retraitement des composants. C'est ce que l'on appelle l'**énergie grise**.

La filière PV au sol génère aussi des gaz à effet de serre par son emprise au sol importante (contrairement à l'éolien par exemple, qui a une emprise faible), dans le cas où elle s'installe sur sols non-artificialisés. C'est ce que comprend la **dette verte** : le carbone du sol et de la biomasse libérés par perturbation du milieu au moment de l'implantation, mais aussi au fil des années suivantes (effet évolutif non représenté sur la Figure 1, voir graphique en arrière-plan à l'annexe 1). On parlera ensuite dans le rapport de « carbone biogénique » ou des « émissions biogéniques ».

Ce n'est qu'après plusieurs années de fonctionnement (temps d'amortissement) que le projet redevient équilibré en carbone grâce au bénéfice de l'électricité moins carbonée qu'il a produite. A la différence de la « neutralité carbone pour 2050 » visée par les gouvernements lors des COP et par la France depuis 2017, l'**équilibre** dont on parle ici n'est pas inerte en GES dans l'absolu. A partir du point d'équilibre carbone, le projet devient simplement moins polluant que le scénario sans projet (appelé « scénario de référence » par la suite). Un projet PV qui atteindrait seulement l'équilibre serait non dommageable mais inutile du point de vue du climat.

Puis, si ce « **gain carbone** » est assez durable, le bilan GES devient négatif, c'est-à-dire que le projet atteint son objectif d'économiser des GES. De telles conditions favorables à la réussite d'un projet PV sont plus faciles à atteindre dans les régions à fort ensoleillement que dans le Nord de la France. Dans les pays du sud de l'Europe, ce temps d'amortissement en GES était évalué entre 1 et 2,5 ans en 2014 (AIE), efficacité aujourd'hui affichée pour la France en général (entre 1 et 1,5 ans, EDF<sup>4</sup>).

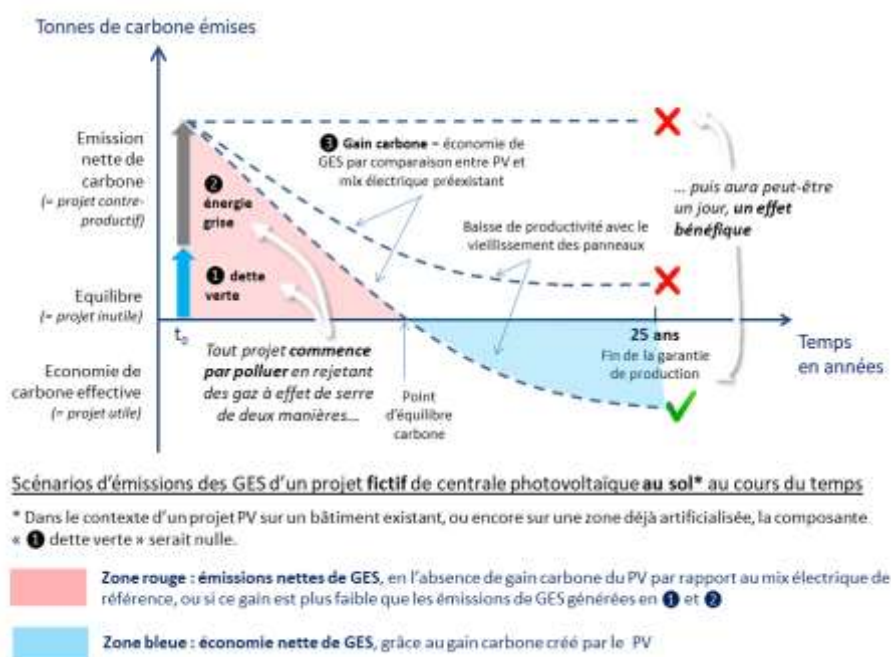


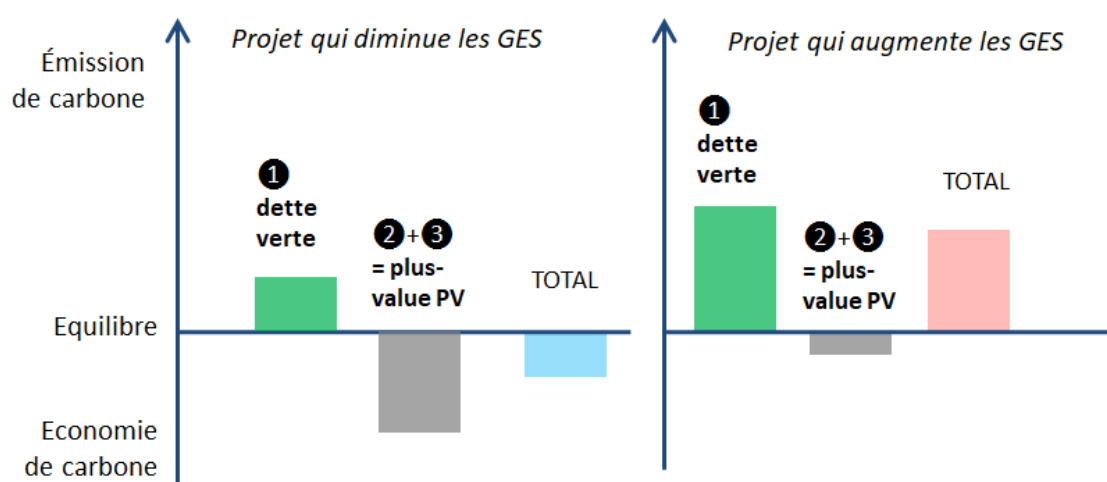
Figure 1. Schéma général des émissions de GES générées par un parc photovoltaïque au sol, au cours du temps

<sup>4</sup> <https://www.edfenr.com/guide-solaire/bilan-carbone-panneau-photovoltaïque/>

La méthode Quanti GES à suivre présentera les résultats un peu différemment. En effet, la littérature disponible ne nous donne pas accès directement à l'énergie grise en quantité de CO<sub>2</sub> brute (gCO<sub>2</sub>eq) pour une surface de panneaux installée, mais sous forme de facteurs d'émissions en quantité de CO<sub>2</sub> par énergie produite (geqCO<sub>2</sub>/kWh produit). Ainsi, les composantes ❷ (énergie grise) et ❸ (gain carbone du PV) de la figure précédente seront fusionnées en une seule grandeur que nous appellerons la « **plus-value carbone** » du parc PV sur toute sa durée de production, obtenue par comparaison au mix électrique préexistant. La dette verte (❶) est en revanche toujours comptée séparément.

La somme de ces deux chiffres donne l'impact total du projet en termes de GES. Si le total est négatif, le projet aura globalement économisé des GES. S'il est positif, le projet aura globalement émis des GES. Pour notre cas du projet du Haut Montbelleux, ces résultats seront donnés à l'étape 8.

Tonnes de carbone émises



Bilan de deux projets photovoltaïques fictifs présentés selon la méthode QuantiGES

Figure 2. Schéma général des GES d'une centrale PV au sol, présentés à la manière de la méthode QuantiGES (étape 7)

## Définition des acteurs

Ce que dit la méthode **QuantiGES**

« L'exercice de quantification met nécessairement en scène deux acteurs principaux, qui peuvent dans certains cas être une seule et même personne :

- le porteur de l'action : c'est la personne responsable et décisionnaire pour la mise en œuvre de l'action ;
- le pilote du projet de quantification : c'est l'utilisateur de la méthode, sa mission est de quantifier l'impact GES de l'action.»

Le **porteur de l'action** dans le cas présent est multiple, puisqu'il s'agit bien sûr du porteur de projet lui-même, à savoir le propriétaire du terrain M. Paris et sa société « Lutèce énergie », mais également de tous les acteurs publics apportant leur soutien au projet, notamment dans le cadre du PCAET de Fougères agglomération. Enfin, l'Etat lui-même en la personne du préfet portera la décision d'autorisation du projet au nom de l'intérêt public.

Le **pilote de la quantification** est l'équipe de rédaction de cette étude, composée de citoyens impliqués à titre bénévole en partie membres de l'association Les Shifters (groupe local rennais), œuvrant pour la réduction des gaz à effet de serre sur nos territoires par leur expertise auprès des décideurs privés et publics. Les rédacteurs de cette étude QuantiGES veulent s'assurer que l'empreinte carbone ait été prise en compte (sous tous ses aspects, y compris les milieux naturels) dans l'étude d'impact à venir, sur des bases scientifiques et selon les standards en vigueur.

Cette étude, qui le plus souvent est à l'initiative du porteur de l'action, est ici effectuée de façon indépendante au vu des circonstances. Elle gagnerait sûrement à être réalisée conjointement avec le porteur du projet. En effet, avoir accès aux données précises du projet ne pourrait qu'améliorer la présente étude. Dans cet état d'esprit, nous avons collecté les informations techniques annoncées par le porteur de projet notamment dans la presse, lorsque la source nous semblait fiable.

## Etape 1. Définir l'action à quantifier

| # | Sous-étape                     | Mise en application                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Intitulé de l'action           | Projet de parc photovoltaïque sur le site du Haut Montbelleux                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 2 | Porteur de l'action            | Peut être considéré ici comme un couple public/privé :<br>- Porteur privé : le propriétaire M. Paris et son entreprise « Lutèce énergie »<br>- Implication nécessaire des acteurs publics, rendant ce projet possible par redéfinition du PLU (commune de Luitré-Dompierre), par examen du dossier (DDT 35), par autorisation (préfecture), et soutien au projet dans le cadre d'une politique de réduction des GES (Fougères agglomération)                                                                                                        |
| 3 | Statut de l'action             | En cours d'étude par les services de l'Etat.<br>En cours de réflexion concernant le changement de PLU au niveau communal.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 4 | Objectif principal de l'action | Il diffère selon l'acteur considéré. L'aspect financier est décisif pour le porteur privé, mais cet aspect ne sera pas traité ici. Seul l'argument de <b>l'intérêt collectif</b> , porté par les acteurs publics mais également revendiqué par le porteur privé, sera envisagé. Dans cet intérêt collectif, l'avantage principal d'un projet d'énergie renouvelables sur le territoire est <b>sa capacité à réduire les émissions de GES</b> afin de lutter contre le changement climatique, et ce conformément au PCAET de Fougères agglomération. |

|   |                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 | Période de mise en œuvre de l'action               | <p>La construction du parc photovoltaïque est pour l'instant à l'étude. Elle pourrait être effective dès 2024.</p> <p>S'il était réalisé, le projet aurait une durée de vie liée au vieillissement des panneaux solaires. La période de production de référence dans cette étude est celle de la « garantie puissance » souvent proposée par les constructeurs, à savoir <b>25 ans</b><sup>5</sup>. C'est également la durée de vie retenue dans la Base Empreinte® (25,2 ans), dont nous utilisons les données de taux d'émissions.</p> <p>Au-delà de cette période, une production est toujours possible mais sort du cadre de la présente étude. Par exemple, le remplacement des panneaux générerait de nouvelles émissions de GES.</p> |
| 6 | Type d'action                                      | Action physique par modification des équipements ou systèmes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 7 | Principal secteur d'activité concerné par l'action | <p>Secteur de la production électrique.</p> <p>Egalement secteurs sylvicole et agricole, dont la production disparaîtrait au profit de la production électrique.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

## Etape 2. Définir l'objectif de la quantification

| # | Sous-étape                    | Mise en application                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Moment de la quantification   | <b>Phase « Ex ante »</b> selon la chronologie QuantiGES, c'est-à-dire en amont du projet                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 2 | Objectif de la quantification | <p>Eclairer les parties prenantes sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>l'efficacité du projet</b> au regard de l'objectif défini ci-dessus, c'est-à-dire sa capacité à réduire les émissions de GES, et donc sa contribution à l'atteinte des objectifs de réduction GES globaux et locaux (PCAET) ;</li> <li>- les répercussions de la <b>localisation</b> du projet sur des milieux naturels, sur cette efficacité.</li> </ul> |
| 3 | Indice de confiance visé      | L'indice de confiance visé est d'un niveau « Correct » au vu des enjeux. Il n'a pas besoin d'être « Optimal », c'est-à-dire donner les quantités précises de GES émises dans chaque scénario, mais il doit discriminer de manière fiable les conséquences des différents scénarios d'implantation envisageables.                                                                                                                                  |
| 4 | Public visé                   | Tous les acteurs impliqués dans le projet (cités plus haut), le porteur privé ainsi que les acteurs publics, garants de l'utilité publique du projet.                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

<sup>5</sup> <https://www.edfenr.com/guide-solaire/duree-de-vie-panneaux-solaires/>

### Etape 3. Choisir le scénario de référence

C'est le scénario en l'absence de mise en œuvre de l'action « construction d'un parc photovoltaïque ».

| # | Sous-étape                                              | Mise en application                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Décrire le ou les scénario(s) de référence potentiel(s) | <p><u>Pour la production électrique</u></p> <p>Le scénario de référence retenu pour les GES émis par la production électrique est la moyenne actuelle. Le parc PV du Haut Montbelleux n'ayant pas vocation à se substituer à une autre source d'électricité en particulier, c'est le « mix français consommé » qui a été pris comme référence. Géographiquement, l'échelle nationale est bien celle de la gestion des flux électriques par RTE. Politiquement, c'est la principale échelle de décision quant aux choix énergétiques. A ce mix électrique est associé un facteur d'émission de GES, c'est-à-dire la quantité moyenne de GES émis selon la manière dont l'électricité est produite (part de nucléaire, de gaz, de PV etc.).</p> <p>Le fait de choisir le mix de l'électricité « consommée » et non « produite » est plus proche de la réalité en termes de besoins. En périodes de forte consommation, la France peut être amenée à utiliser une électricité importée plus carbonée que celle produite à l'intérieur des frontières.</p> <p>Pour les détails sur le choix de l'échelle spatiale d'analyse, voir la partie dédiée en fin de rapport.</p> <p><u>Pour les stocks et puits de carbone des milieux naturels</u></p> <p>Le scénario de référence est le prolongement de la situation historique du site de Montbelleux. Il est à noter que la gestion future choisie en l'absence de panneaux solaires influe beaucoup sur les capacités de stockage de carbone. Voici les hypothèses que nous avons retenues :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pour la <b>partie boisée (9 ha)</b> : elle reste boisée, exploitée de manière modérée. Son stock de carbone est considéré cyclique au fil des prélèvements forestiers<sup>6</sup>, voire quasi-stable si les prélèvements sont légers comme dans une gestion type futaie irrégulière. Malgré ces fluctuations, le stock moyen de carbone augmente avec l'âge moyen des arbres et celui du sol.</li> <li>- pour la <b>partie prairie permanente (5 ha)</b> : elle reste</li> </ul> |

<sup>6</sup> Denis Loustau, Christophe Chipeaux, Pierre Trichet, Barry A. Gardiner. Bilan de carbone du déboisement lié au projet de déboisement lié au projet de parc photovoltaïque Horizeo.. [Rapport de recherche] INRAE. 2021. hal-03778686 - <https://hal.science/hal-03778686/>

|   |                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                                       | <p>en prairie permanente (pas de labour, considéré comme dangereux par la Chambre d'agriculture<sup>7</sup>). Le propriétaire continue de la gérer en fauche, le foin pouvant être utilisé ou revendu comme fourrage de grande qualité issu d'une prairie permanente.</p> <p><u>Note</u> : les surfaces sont approximatives et issues de photos satellites, sans connaissance précise de l'implantation du futur projet.</p> <p>Remarque : un <b>scénario alternatif</b> sera également envisagé, pour information et pour comparaison, dans les résultats : la <b>construction d'un parc PV en terrain « neutre »</b>, c'est-à-dire sans émissions de carbone par le milieu naturel, soit en culture (stocks de carbone supposés stables, voire étape 6. Encadré 2.), soit en terrain déjà artificialisé.</p>                   |
| 2 | Sélectionner le scénario le plus probable en l'absence d'action et expliquer ce choix | <p>Le scénario de référence principal (mix électrique / stocks et puits de carbone) est le plus probable car c'est la gestion déjà appliquée jusqu'ici par le propriétaire.</p> <p>Ensuite, <b>dans la recherche d'une action bénéfique pour le climat</b> et si l'opportunité d'un parc PV était remise en question, les forêts et prairies permanentes sont les deux milieux naturels les plus stockants en carbone. La meilleure option qui se présenterait au propriétaire pour agir en faveur du climat, serait de poursuivre sa gestion extensive, optimale en termes de stockage du carbone<sup>8</sup>.</p>                                                                                                                                                                                                              |
| 3 | Déterminer la note de fiabilité associée au scénario de référence retenu              | <p>Nous ignorons la réelle conviction du propriétaire à agir en faveur du climat. Nous ne pouvons donc pas évaluer la fiabilité de notre scénario « conservation de la gestion actuelle des parcelles », la plus favorable au climat en l'absence de panneaux solaires.</p> <p>Cependant, les acteurs publics impliqués dans la réduction des gaz à effet de serre pourraient indirectement se prononcer sur la gestion des parcelles, en refusant une demande de défrichement par exemple. De même la mobilisation citoyenne autour de la préservation des milieux naturels pourrait influencer le propriétaire dans le sens de leur conservation.</p> <p><b>Note de fiabilité n°1</b> retenue = 1,5 (moyenne entre 1 et 2, dans le cas d'un dire d'expert argumenté à partir de 2 scénarios possibles, cf. QuantiGES p.33)</p> |

<sup>7</sup> Ouest-France du 18-19 novembre 2023. Contesté, le projet de parc photovoltaïque de Montbelleux se dévoile. Citation de la Chambre d'agriculture : « le potentiel de ces parcelles est quasi nul et impropre à la production alimentaire et son exploitation mécanisée est dangereuse ».

<sup>8</sup> INRA 2020. Stocker du carbone dans les sols français.



## Etape 4. Construire l'arbre des conséquences de l'action

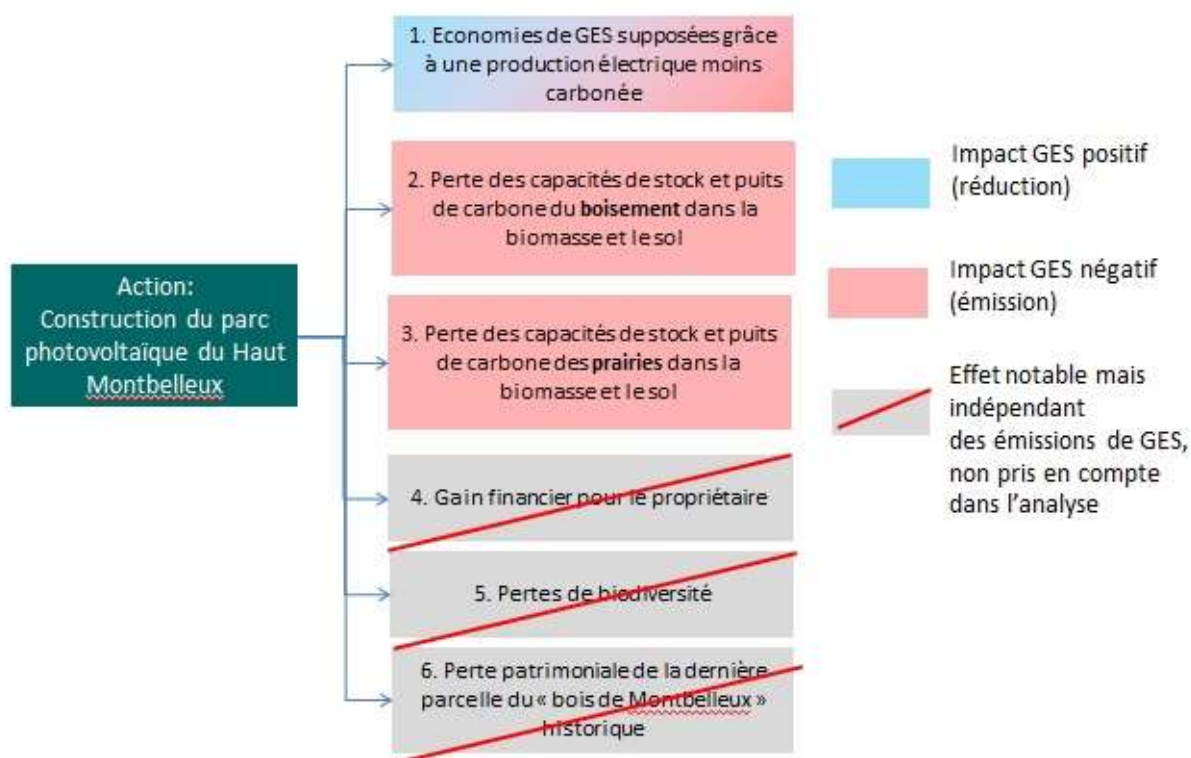


Figure 3. Arbre des conséquences de l'action de construction d'un parc photovoltaïque sur le site du Haut Montbelleux

Nous retiendrons uniquement trois conséquences de l'action : les économies de GES réalisées par le PV et le rejet de carbone par les milieux naturels, forêt et prairie permanente. Ces conséquences seront d'abord quantifiées pour chaque milieu naturel pour pouvoir distinguer l'impact de l'action dans chacun de ces milieux. Puis les deux impacts seront additionnés, proportionnellement à la surface de chaque milieu sur le site du projet.

## Etape 5. Définir le périmètre de la quantification

| # | Sous-étape                           | Mise en application                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Période des conséquences de l'action | <p>Les conséquences de l'action sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- de <b>25 ans pour le fonctionnement optimal des panneaux solaires</b> (ou plus mais sans moyen de quantification) comme justifié à l'étape 1.5 → échelle de temps retenue ici ;</li> <li>- de <b>plusieurs dizaines d'années de déstockage du carbone du sol</b> après perturbation de milieux naturels développés (forêt, ou semi-naturels pour les prairies), à la différence de milieux récemment ou régulièrement perturbés (respectivement plantation ou culture) sur lesquels l'impact serait moindre ;</li> <li>- <b>irréversible</b> pour le puits de carbone, c'est-à-dire la</li> </ul> |

|   |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                                                                  | capacité de la forêt à absorber du carbone en continu (jusqu'à un état de pseudo-équilibre rarement atteint).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 2 | Période d'observation en cohérence avec la période des conséquences de l'action                                  | <p>Dans le cas de notre quantification « Ex ante », il s'agit d'une période de planification des conséquences, plutôt que d'une période d'observation.</p> <p>Les conséquences de l'action sont évaluées sur la durée de vie attendue des panneaux solaires, à savoir 25 ans. Au-delà, les émissions de GES ne sont plus quantifiables pour les panneaux solaires et donc notre analyse serait biaisée.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 3 | GES pris en compte dans la quantification                                                                        | <p>Pour le facteur d'émissions de GES associé à la production photovoltaïque, la Base Empreinte<sup>®</sup> exprime la donnée en « équivalent CO2 » (eqCO2) associé à un ensemble de gaz à effet de serre (sans préciser lesquels) ramenés au « pouvoir réchauffant » du CO2.</p> <p>Pour le carbone des milieux naturels, le carbone est à l'état organique contenu dans le sol et la biomasse. On affecte à celui-ci le coefficient x3,7 pour obtenir la masse de CO2 (exprimée en teqCO2) libérée dans l'atmosphère, tel que présenté dans l'Encadré 2 de l'étape 6.</p>                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 4 | Exclure les conséquences sans impact GES, les conséquences de type effet multiplicateur et effet rebond indirect | Les conséquences sans effet sur les GES ont été exclues de l'arbre dans la figure 1 ci-dessus.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 5 | Évaluer a priori l'ordre de grandeur de l'impact GES de chaque conséquence ayant un impact GES                   | Nous n'avons pas d'idée a priori de l'ordre de grandeur relatif des économies de carbone apportées par le photovoltaïque par rapport à leurs émissions induites. L'impact sur le milieu naturel, en particulier, semble être usuellement méconnu et non considéré par les études consultées. C'est l'exercice auquel nous nous sommes livrés ici.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 6 | Ordonner les conséquences par ordre de grandeur en valeur absolue                                                | <p>C'est justement ce que nous allons rechercher.</p> <p>Au préalable, nous vérifierons que l'électricité PV en Bretagne économise effectivement des émissions de CO2 en Bretagne par rapport au mix de référence.</p> <p>Cette vérification faite, deux possibilités s'ensuivent :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si :<br/> <math>teqCO2(\text{économisé par le photovoltaïque}) &gt; teqCO2(\text{émis par l'impact sur les milieux})</math><br/> alors la conséquence « économies de carbone » prime et le projet dans son ensemble économise du carbone</li> <li>- Si :<br/> <math>teqCO2(\text{économisé par le photovoltaïque}) &lt; teqCO2(\text{émis par l'impact sur les milieux})</math><br/> alors les conséquences « émission de GES par le boisement et les prairies » priment et le projet rejette</li> </ul> |

|   |                                                                    |                                                                                                                                                                                                          |
|---|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                    | globalement des gaz à effet de serre sur l'ensemble de sa durée de vie<br><b>teqCO2 : tonnes de carbone-équivalent = unité de mesure des GES utilisée dans toute l'analyse</b>                           |
| 7 | Conserver les conséquences au regard de la note de fiabilité visée | En l'absence de hiérarchisation possible des conséquences (toutes d'importance équivalente), nous ne pouvons en rejeter aucune dans l'analyse.                                                           |
| 9 | Déterminer la note de fiabilité associée à l'étape 5               | Les deux seuls impacts GES connus dans cette opération sont pris en compte dans la quantification, à savoir 100% des paramètres en jeu.<br><b>Note de fiabilité n°2 retenue = 4 (cf. QuantiGES p.63)</b> |

## Etape 6. Rassembler les données disponibles

Nous avons utilisé à chaque fois que cela était possible les données directement disponibles sur la Base Empreinte<sup>®</sup> développée par l'ADEME (reprenant largement les données de l'ancienne Base Carbone<sup>®</sup>). Les données réelles du projet n'étant pas encore publiques, nous les avons remplacées par des moyennes nationales ou régionales. D'autres données pourraient également être précisées ou actualisées (par exemple le mix électrique de référence et son empreinte).

C'est pourquoi toutes les données potentiellement « à préciser » ou « à adapter au projet » ont été précédées d'un astérisque. Pour certaines données, il n'est cependant ni nécessaire ni réaliste de disposer de toutes les données précises mesurées *in situ* : par exemple la teneur en carbone du sol. Les ordres de grandeur suffisent dans ce cas à tirer des conclusions.

La qualité (DA/FE/DB) et l'incertitude (en %) de chaque donnée sont mentionnées après son intitulé. Elles suivent la nomenclature suivante (QuantiGES), hormis la catégorie DB « données biologiques » qui a été ajoutée pour mieux traiter l'incertitude associée.

### Tableau 1. Catégories des incertitudes liées aux données utilisées selon QuantiGES.

En ce qui concerne les données biologiques issues de la bibliographie (déterminantes dans cette étude), une variabilité associée est généralement mentionnée. Celle-ci gagne à être gardée telle quelle dans un souci de précision, d'où la catégorie « X% » qui dépend du jeu de données utilisé.

| Incertitude DA (données d'activité)                      |                                                                                               |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 70 %                                                     | Données approchées (ou dires d'expert)                                                        |
| 30 %                                                     | Données extrapolées (calculs ou extrapolations grossiers)                                     |
| 15 %                                                     | Données secondaires (calculs ou extrapolations précis)                                        |
| 5 %                                                      | Données primaires (mesures ou factures)                                                       |
| Incertitude FE (facteurs d'émissions)                    |                                                                                               |
| 70 %                                                     | Approximatif (ni représentatif ni précis)                                                     |
| 30 %                                                     | Moyen (représentatif mais peu précis, ou précis mais peu représentatif)                       |
| 5 %                                                      | Spécifique à la source/puits (pleinement représentatif et précis)                             |
| [Catégorie ajoutée] Incertitude DB (Données biologiques) |                                                                                               |
| 70 %                                                     | Données approchées (ou dires d'expert)                                                        |
| X%                                                       | L'incertitude est souvent indiquée avec la donnée (écart-type, IC) dans la publication source |
| 1-5%                                                     | Données mesurées, avec incertitude propre à la méthode de mesure                              |

### Encadré 1. Données relatives aux économies de GES grâce au photovoltaïque (PV) :

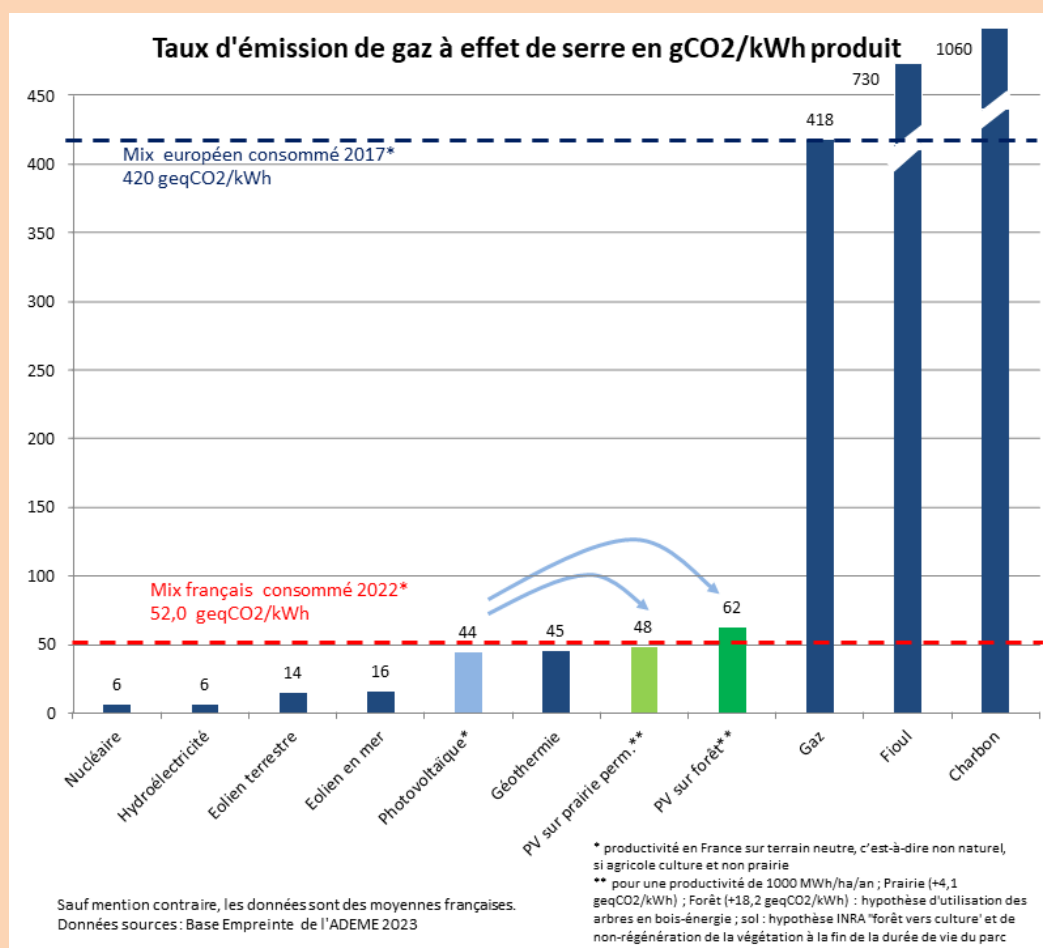
- scénario de référence et avec action :

**Facteur d'émission du « mix électrique français » en 2022 (FE/30%) :** 52,0 gCO<sub>2</sub>/kWh consommé (Base Empreinte<sup>®</sup>). Sa valeur est variable d'année en année mais en constante diminution depuis 2019. Selon l'ADEME, elle chuterait à 29,0 gCO<sub>2</sub>/kWh en 2030 (cf. note 11).

Le « mix électrique breton » est a priori du même ordre de grandeur que le national, estimé de façon approximative à 52,8 gCO<sub>2</sub>/kWh consommé, voir tableau en annexe 2.

- scénario avec action :

**Facteur d'émission associé à l'énergie photovoltaïque, moyenne française (FE/30%) :** 43,9 gCO<sub>2</sub>/kWh produit (Base Empreinte<sup>®</sup>). Ces émissions de GES correspondent à l'énergie grise de la filière photovoltaïque : fabrication, transformation, transport, entretien, recyclage, etc. et varient fortement entre les types de panneaux et sites d'installation (la moyenne de 43,9 reflète en réalité une fourchette de 39 à 89 gCO<sub>2</sub>/kWh produit, cf. ministère de la Transition écologique en note 8).



Ce graphique présente les facteurs d'émissions de gaz à effet de serre par type de production électrique, ainsi que les mix français et européen d'électricité consommée. Ces valeurs ne tiennent pas compte du carbone des milieux naturels, sauf les valeurs pour le photovoltaïque (PV) implanté sur prairie permanente ou sur une forêt (barres vertes), dont les calculs sont présentés à l'étape 7, aux encadrés 4 et 5.

Encadré 1 (suite). Données relatives aux économies de GES grâce au photovoltaïque (PV) :

**Durée de production champ PV : choix de la garantie puissance constructeur** : 25 ans (dépend du constructeur mais 25 est une valeur courante ; un point important dans notre analyse est que cette durée soit cohérente avec les FE de la Base Empreinte<sup>®</sup>, justement calés sur une durée de 25,2 ans.

**\*Facteur d'émission associé à l'énergie photovoltaïque pour le projet en particulier (FE/30%)** : 39 gCO<sub>2</sub>/kWh (soit mieux que la moyenne bretonne attendue :  $43,9/0,976=45,0$  gCO<sub>2</sub>/kWh mais moins bien que des panneaux solaires fabriqués en France à 25,2 gCO<sub>2</sub>/kWh) – **d'après le bilan carbone donné par le porteur de projet en interview au journal Actu du 23/11/2023**

Nous appellerons « **plus-value** » du photovoltaïque l'écart entre le facteur d'émissions du mix électrique français consommé et celui du PV en Bretagne. C'est en d'autres termes la quantité de CO<sub>2</sub> économisée grâce au photovoltaïque. A partir des données précédentes elle est de :  $52-39=13$  gCO<sub>2</sub> économisés par kWh électrique PV produit en Bretagne.

Sur le diagramme de l'encadré 1, on remarque d'emblée que la différence entre les GES émis par le photovoltaïque et la moyenne française est moindre ( $52-44=8$ ). La différence est majeure, en revanche, par rapport à la moyenne européenne ( $420-44=376$ ) du fait des pays européens où l'énergie fossile domine et où le mix électrique est 10 ou 15 fois plus polluant qu'en France (461 en Allemagne, 781 en Pologne). **C'est un premier résultat : la marge de manœuvre du photovoltaïque pour décarboner l'électricité en France est réduite à nulle.** Tout comme la géothermie en moyenne, il fait partie des productions d'électricité moyennement polluantes qui constituent des leviers d'action à échelles européenne ou internationale mais pas pour diminuer efficacement les gaz à effet de serre français. Ces limites du PV sont bien identifiées par les pouvoirs publics qui, au-delà des objectifs chiffrés d'installation de parcs PV, recherchent l'« excellence de la filière photovoltaïque »<sup>9</sup> considérant qu'« il est essentiel que le soutien public à l'énergie photovoltaïque cible en priorité des panneaux solaires peu carbonés »<sup>10</sup> parmi des filières qui, derrière la valeur moyenne de 43,9 gCO<sub>2</sub>/kWh, émettent du simple au double (39 à 89 gCO<sub>2</sub>/kWh, note 8).

Ce constat sera accentué à l'avenir si le facteur d'émission lié au mix électrique français continue de diminuer comme le prévoit l'ADEME (voir Encadré 1). La plus-value dégagée par le PV, quand elle existe, devrait alors s'annuler dans la majorité des situations, sauf évolution majeure de la filière de production des panneaux vers moins d'énergie grise. Dans l'impossibilité de quantifier précisément cette évolution, nous garderons toutefois la valeur actuelle du FE. La présente étude est donc *a priori* trop optimiste quant à l'efficacité d'un parc PV projetée sur l'ensemble de sa durée de vie (25 ans).

Pour notre étude, le mix électrique français (et non européen) a été retenu comme référence. En effet, c'est bien l'Etat en synergie avec les collectivités qui détiennent la réelle gouvernance de l'énergie et de sa production. Améliorer continuellement les bilans de carbone des territoires est au cœur des politiques territoriales (PCAET). Dans ce cadre, le constat précédent de « faiblesse » du PV en France n'enlève pas l'intérêt du présent exercice de quantification précise, car chaque projet PV a ses spécificités et son empreinte écologique propre. Mais gardons à l'esprit que l'on ne peut de toute façon espérer qu'une plus-value moindre en termes d'effet sur nos émissions intérieures. Ce choix de l'échelle, déterminant, est approfondi dans la partie dédiée : « Réflexion sur l'échelle de l'analyse ».

<sup>9</sup> <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4793-comment-mener-la-filiere-photovoltaïque-vers-l-excellence-environnementale-.html>

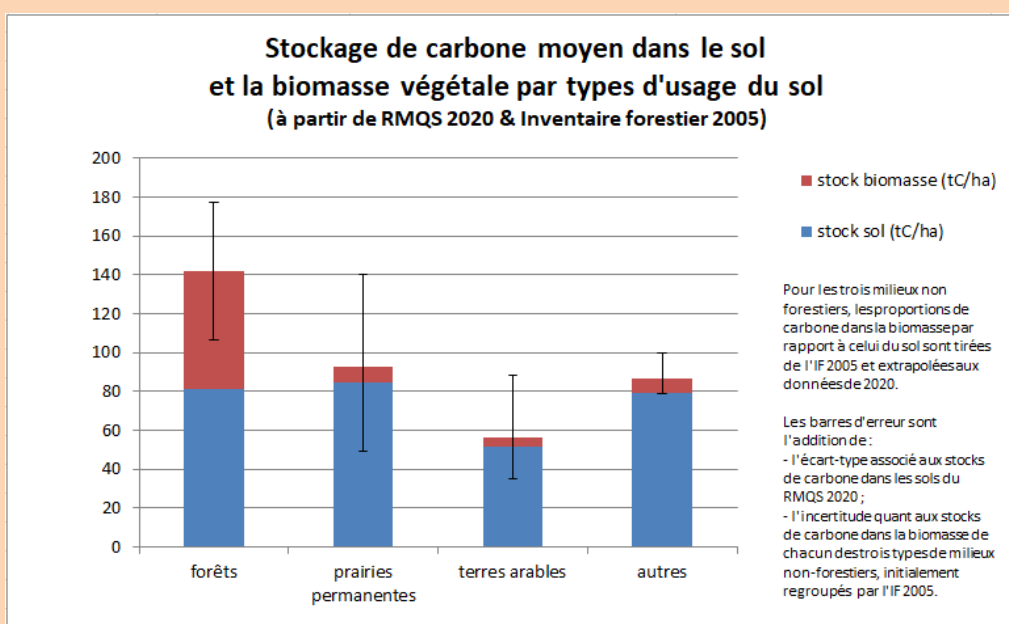
<sup>10</sup> Ministère de la transition énergétique, octobre 2021. Les panneaux solaires bas-carbone en France.

**Encadré 2 : Données et hypothèses sur les émissions de GES « biogénique », c'est-à-dire provenant des milieux naturels impactés :**

- scénario de référence :

**(1) Stock de carbone initial par grands types de milieux naturels (DB/30 à 40%) :** valeurs du RMQS (INRA, 2020. Stocker du carbone dans les sols français) et de l'Inventaire forestier (2005), voir figure ci-dessous). Ces valeurs sont des stocks moyens à échelle française et comportent de fortes variabilités, mais donnent des ordres de grandeur fiables, pour le carbone du sol et de la biomasse.

Comme le montre le diagramme ci-dessous, **forêts** (ou boisements, les deux termes sont équivalents) et **prairies permanentes** sont les éléments paysagers qui stockent le plus de carbone.



|                      | stock sol (tC/ha) | stock biomasse (tC/ha)±30% | Ecart-type (RMQS 2020, lié au sol uniquement) |
|----------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|
| forêts               | 81,0              | 61,1                       | 35,4                                          |
| prairies permanentes | 84,6              | 8,1                        | 35                                            |
| terres arables       | 51,6              | 5,0                        | 16,2                                          |
| autres               | 79                | 7,6                        | 0                                             |

**Données de carbone dans le sol d'après les données du RMQS (INRA, 2020), dans la biomasse d'après l'inventaire forestier national (IF 2005) et leur représentation graphique**

- scénario avec action :

**\* (2) Flux de carbone du sol après implantation d'un parc photovoltaïque (DB/40%) :** d'après le modèle GO+ utilisé dans l'étude « Horizeo » (Loustau et al. 2021), il apparaît qu'un sol au pied des panneaux stocke, à terme, environ autant qu'un sol passé en culture/prairie temporaire. Pour quantifier cette diminution du stock de carbone, nous utilisons les facteurs d'émission de la Base Empreinte® à ce sujet : "forêt vers culture" : 2,75 teqCO<sub>2</sub>/ha.an ; "prairie vers culture" : 3,48 teqCO<sub>2</sub>/ha.an. Tout comme les données de stock de carbone, ces données de flux contiennent une variabilité de l'ordre de +/- 40%

Encadré 2 (suite) : Données et hypothèses sur les émissions de GES « biogénique », c'est-à-dire provenant des milieux naturels impactés :

**\*Flux de carbone de la biomasse après implantation d'un parc photovoltaïque :**

- (3) conformément à plusieurs études (Horizeo ; Madej, 2022), la biomasse sous panneaux est considérée similaire à une prairie permanente (valeur de 8,1tC/ha, voir tableau ci-dessus). Pour la partie du site déjà en prairie permanente, pas de changement mais pour la partie forêt, c'est une perte importante (DB/40%) ;

- (4) devenir du carbone dans le bois exporté après récolte : nous considérons que 80% du carbone est réémis dans l'hypothèse d'une utilisation en bois d'œuvre (~50% perdu à la taille puis à nouveau ~60% en scierie) contre 100% pour du bois-énergie (DA/30%. Leturcq, 2020. Empreinte carbone de la forêt et de l'utilisation de son bois, *Rev. For. Fr.* ).

**(5) Puits de carbone sol/biomasse de la forêt annulé :** une forêt constitue un puits de carbone lors de sa croissance. En effet, la photosynthèse et l'accumulation de matière organique par le sol font augmenter d'année en année le stock de carbone total. Un FE de 6,71 tCO<sub>2</sub>/ha/an est donné sur la base Empreinte® pour les « forêts fermées et ouvertes de feuillus en Bretagne », mais peu circonstancié (biomasse seule ou sol+biomasse ? quel stade de développement de la forêt ?).

Dans le cas particulier des forêts européennes anciennes et non gérées, les chercheurs se sont demandés si ce stock atteignait un plafond (et donc un puits nul), la forêt étant arrivée à un « pseudo-équilibre ». Une série de publications récente conclut au contraire que même les forêts anciennes (mais pas forcément matures) sont toujours un puits de carbone évalué à 5,9±2,2 tCO<sub>2</sub>/ha/an (soit DB/37,5%. Gundersen, 2021. Old-growth forest carbon sinks overestimated, *Nature*) pour l'ensemble sol+biomasse.

Dans le cas de Luitré, la forêt semble être effectivement ancienne (200 ans ou plus) et gérée de façon modérée. On lui applique donc cette dernière valeur de puits de carbone, qui deviendrait un manque à gagner dans le scénario de défrichement pour installation de panneaux solaires.

**Equivalence entre carbone du sol et CO<sub>2</sub> atmosphérique :** on affecte le coefficient 3,7 correspondant au rapport entre la masse de l'atome de carbone et celle de la molécule de CO<sub>2</sub>. En effet le CO<sub>2</sub> minéralisé dans l'atmosphère est plus lourd que le carbone seul, et en faisant l'hypothèse que 100% du carbone minéralisé dans l'atmosphère devient du CO<sub>2</sub>. Ainsi :  $teqCO_2 = 3,7 * tC(\text{sol ou biomasse})$ . INRA, 2020 ; Leturcq, 2020 (cf. supra).

**Synthèse des stocks et flux de carbone biogéniques considérés dans l'étude**

Les numéros renvoient aux jeux de données présentés en encadré 2 ; X : grandeur considérée comme nulle ou négligeable ; en jaune : données fournies par la base Empreinte de l'ADEME, privilégiées lorsque disponibles.

| Milieu transformé :                          | Forêt - sol | Forêt - biomasse | Prairie perm. - sol | Prairie perm. - biomasse |
|----------------------------------------------|-------------|------------------|---------------------|--------------------------|
| Stock avant                                  | (1)         | (1)              | (1)                 | (1)                      |
| Stock après                                  |             | (3), (4)         |                     | (3)                      |
| <b>ou FE ADEME chgt d'affectation du sol</b> | (2)         |                  | (2)                 |                          |
| Changement d'un flux existant                | (5)         |                  | X                   | X                        |



### Encadré 3. Données relatives au projet photovoltaïque :

**\*Emprise au sol (DA/30%) :** elles ont été mesurées sur le site Geoportail à partir des données cadastrales et des photos satellites. On considère en l'absence des données précises, que le projet s'implanterait en lieu et place de 9 ha de boisement (la totalité) et les 5 ha de prairies permanentes dont M. Paris est propriétaire.

Ces données seraient faciles à préciser en remplaçant nos estimations par les surfaces exactes.

**\*Productivité des panneaux photovoltaïques (DA/30%) :** une productivité attendue de 1000 MWh/an/ha semble réaliste en Bretagne. Elle est obtenue en multipliant la puissance-crête par le productible associé au site d'implantation et par le ratio de performance. En l'absence de ces données précises, nous avons retenues une valeur plausible par rapport aux projets similaires : 738 MWh/ha/an pour la centrale de Baud dans le Morbihan, 1346 MWh/ha/an pour une région plus ensoleillée, à Cestas près de Bordeaux.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance\\_cr%C3%AAtte](https://fr.wikipedia.org/wiki/Puissance_cr%C3%AAtte)

[https://centre-valdeloire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Centre-Val-de-Loire/122\\_Inst-Centre-Val-de-Loire/Produire\\_Innover/Energies/Documents\\_JR\\_photovoltaique/Solaire\\_Photovoltaïque\\_au\\_sol.pdf](https://centre-valdeloire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Centre-Val-de-Loire/122_Inst-Centre-Val-de-Loire/Produire_Innover/Energies/Documents_JR_photovoltaique/Solaire_Photovoltaïque_au_sol.pdf)

<https://www.fermesolaire.fr/magazine/combien-rapportent-1-000-m2-de-panneaux-solaires>

<https://france3-regions.francetvinfo.fr/bretagne/morbihan/plus-grande-centrale-solaire-bretonne-inauguree-baud-1696552.html>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale\\_solaire\\_photovolta%C3%AFque\\_de\\_Cestas](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_photovolta%C3%AFque_de_Cestas)

Marion *et al.*, 2005. Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems (final PV system yield = nameplate d.c. power \* reference yield \* performance ratio)

\* : données potentiellement à améliorer et adapter au site pour plus de précision

### Calculs d'incertitudes liés aux données utilisées :

- Dans l'encadré 1., nous avons appelé « **plus-value** » du **photovoltaïque** la différence entre le facteur d'émission associé au mix électrique français consommé.

L'incertitude de la plus-value du découle des deux données qui la composent, selon la méthode QuantiGES :  $\sqrt{(\text{incertitude FE mix français})^2 + (\text{incertitude FE PV})^2} = \sqrt{(30^2 + 30^2)} = 42\%$

- Le **carbone contenu dans chaque milieu** est l'addition des pertes dans le sol et dans la biomasse (que l'on résume ici à la biomasse aérienne). L'incertitude totale est donc l'addition des incertitudes liées à chaque terme, pondérés par leur contenu en carbone :

Incertaine carbone en boisement : incertaine sol + incertaine biomasse  
=  $35,4/81 * 81/142,1 + 0,3 * 61,1/142,1 = 38\%$

Incertaine carbone en prairie permanente : incertaine sol + incertaine biomasse  
=  $35/84,6 * 84,6/92,7 + 0,3 * 8,1/92,7 = 40\%$



*Incertitude carbone en culture/prairie temporaire (scénario alternatif en « terrain neutre ») :*  
*incertitude sol + incertitude biomasse =  $16,2/51,6 * 51,6/56,6 + 0,3 * 5,0/56,6 = 31\%$*

- Les **flux de carbone** utilisés ont un intervalle d'erreur propre fourni avec les données biologiques :

FE sol prairie->culture =  $3,48 \pm 1,1$  soit 32% d'incertitude

Le FE sol forêt-> culture n'a pas d'erreur propre dans la Base Empreinte®, on lui affecte donc l'incertitude générique associée aux FE de changement d'affectation des sols soit 40%

FE puits forêt (Selon Gundersen *et al.*, 2021) =  $5,9 \pm 2,2$  soit 37,5%

Pour la forêt, on peut agréger les deux derniers FE sol et biomasse qui sont simplement additionnés et leurs incertitudes associées, ce qui donne :

Incertitude FE émissions totales forêt =  $2,75/(2,75+5,9) * 0,4 + 5,9/(2,75+5,9) * 0,375 = 38\%$  d'incertitude

- Pour chaque « conséquence » (ou composante) du bilan GES (implantation de panneaux PV, respectivement dans un boisement, dans une prairie permanente, ou hypothèse alternative dans une culture ou un sol artificialisé), l'incertitude se calcule comme suit, selon la méthode du GIEC choisie par QuantiGES :

$$\text{Incertitude (\%)} \text{ de la conséquence} = \sqrt{(\text{Incert. stock carbone initial})^2 + \text{Incert. FE}_{\text{plus-value photovoltaïque}}^2 + \text{Incert. FE}_{\text{émissions biogéniques}}^2}$$

Avec dans notre cas FE1 la plus-value de carbone dégagée par l'énergie photovoltaïque et FE2 les rejets de carbone (biogénique) engendrés par la construction de la centrale PV

**Incertitude totale pour l'implantation PV en boisement :  $\sqrt{(38^2 + 42^2 + 38^2)} = 68\%$**

**Incertitude totale pour l'implantation PV en prairie permanente :  $\sqrt{(40^2 + 42^2 + 32^2)} = 66\%$**

**Incertitude totale pour l'implantation PV en culture/prairie temporaire (action non envisagée dans le projet, intégrée pour comparaison) :  $\sqrt{(31^2 + 42^2 + 0^2)} = 52\%$**

## Etape 7. Quantifier l'impact GES de l'action

1. Voici les résultats séparés de chaque facteur d'économie ou d'émissions de GES de l'action.

- Economie de GES grâce à la **plus-value du PV** sur ses 25 ans de production (sur 1 ha) :

Economie PV = Productivité \* Plus-value PV \* Durée de vie =  $-1000 * (52 - 39) * 25 / 1000 = 13 * 25$   
 =  **$-325,0 \pm 42\%$  teqCO<sub>2</sub>/ha** potentiellement économisées

- Emissions de GES de l'**impact sur boisement** (1 ha) :

Emission GES d'impact sur boisement (bois d'œuvre) = [Biomasse(forêt) \* 80% - Biomasse(prairie perm)] \* 3,7 + FE(sol) « boisement vers culture » \* 25 ans  
 =  $2,75 * 25 + (61,1 * 0,8 - 8,1) * 3,7 + 5,9 * 25 = 367,0$  **teqCO<sub>2</sub>/ha**

*Non retenu : Emission GES d'impact sur boisement (bois énergie) = [Biomasse(forêt)\*100%-Biomasse(prairie permanente)]\*3,7+FE(sol)« boisement vers culture »\*25 ans  
 $= 2,75*25 + (61,1 - 8,1)*3,7 + 5,9*25 = 207,6 + 68,8 = 412,2 \text{ teqCO}_2/\text{ha}$*

- Emissions de GES de l'impact sur prairie permanente (1 ha) :

Emission GES d'impact sur prairie permanente, biomasse inchangée = FE(sol)« prairie vers culture »\*25 ans =  $3,48*25 = 87,0 \text{ teqCO}_2/\text{ha}$

2. Puis on calcule, pour chaque « conséquence » au sens de QuantiGES, c'est-à-dire pour chaque milieu d'implantation, le bilan de la plus-value d'une électricité moins carbonée produite par le photovoltaïque, contrebalancée par le carbone biogénique (émis par le milieu naturel) sur toute la durée de vie du parc PV. Telles que représentées en figure 3, les conséquences sont regroupées ici en (1+2) et (1+3).

- Bilan GES de la « Sous-action envisagée » **implantation de PV sur 1 ha de boisement** sur 25 ans d'exploitation

Emission GES d'implantation PV sur boisement (bois d'œuvre) - Economie PV =  $367,0 - 325,0 = 42 \pm 29 \text{ teqCO}_2$  ( $-13 \pm 9\%$  de l'objectif de réduction)

#### Encadré 4 : Résultat intermédiaire : **quelles émissions biogéniques en boisement ?**

En prenant toutes les hypothèses les plus favorables, à savoir : le bois coupé est utilisé en bois d'œuvre, celui-ci permet de stocker du carbone pour longtemps et l'on se cantonne à regarder les émissions biogéniques sur 25 ans, alors que le processus de rejet par le milieu naturel défriché est enclenché pour 70 ans ou plus (graphiques INRA), les émissions supplémentaires sont calculées comme suit :  $\text{GES/kWh } 367,0*1000/(1000*25) = 15 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$  (et  $18 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$  en prenant les hypothèses les moins favorables)

**Le choix d'un site de boisement pour du photovoltaïque revient à augmenter son facteur d'émission de 15 à 18 gCO<sub>2</sub>/kWh (+33 à 43%) en moyenne en France ce qui conduit à émettre au total des GES au lieu d'en économiser.** On passe à 59 voire 62 gCO<sub>2</sub>/kWh contre 44 en terrain neutre (voir graphique en encadré 1).

-13% d'efficacité sont obtenus ci-dessus dans le cas du Haut Montbelleux, ce qui signifie que les panneaux solaires prévus sur boisement :

- n'atteindraient jamais l'équilibre carbone à l'échelle de la durée de vie d'un parc PV soit 25 ans (Annexe 1a) pour un équilibre censé être effectif à t+1 à 1,5 ans selon l'ADEME ; on serait alors dans le cas d'un projet « contre-productif » (voir Figure 1) ;
- atteindraient encore moins l'efficacité attendue, car même l'équilibre représente 0% d'efficacité, c'est-à-dire un projet juste « inutile » du point de vue climatique selon la Figure 1.

- Bilan GES de la « Sous-action envisagée » **implantation de PV sur 1 ha de prairie permanente** et 25 ans d'exploitation

Emission GES d'implantation PV sur prairie permanente - Economie PV = 87,0-325,0  
 = -238 ±157teqCO2 (économie réalisée à **73±48% de l'objectif de réduction**)

#### Encadré 5 : Résultat intermédiaire : **quelles émissions biogéniques en prairie permanente ?**

Le calcul est plus simple qu'en forêt car on considère que le sol uniquement émet du carbone au fil des années :  $\text{GES/kWh} = 87,0 \cdot 1000 / (1000 \cdot 25) = 3,5 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$  (et 4,1 gCO<sub>2</sub>/kWh en prenant en compte les émissions post-25 ans).

**Le choix d'un site de prairie permanente pour du photovoltaïque revient à augmenter son facteur d'émission d'environ 4 gCO<sub>2</sub>/kWh (+8 à 9%) en moyenne en France pour une perte d'efficacité d'1/4 de l'objectif climatique de réduction des GES.**

- Pour comparaison : bilan GES de la « Sous-action alternative » **implantation de PV en terrain neutre** (culture ou sol artificialisé) et 25 ans d'exploitation

Emission GES d'implantation PV sur terrain neutre (supposées nulles)- Economie PV = 0-325,0  
 = -325,0teqCO2 réellement économisées (soit 100% de l'objectif)

-Bilan GES total rapporté aux surfaces : **implantation sur 9ha de boisement et 5ha de prairie permanente (projet complet)**

Emission GES de l'implantation PV sur 9ha de boisement + 5ha de prairie permanente - Economie PV sur 14 ha = -325,0\*14+367,0\*9+87,0\*5 = -4550+3303+435  
 = -812 teqCO2 économisées (**soit 18% de l'objectif attendu de l'action globale**)

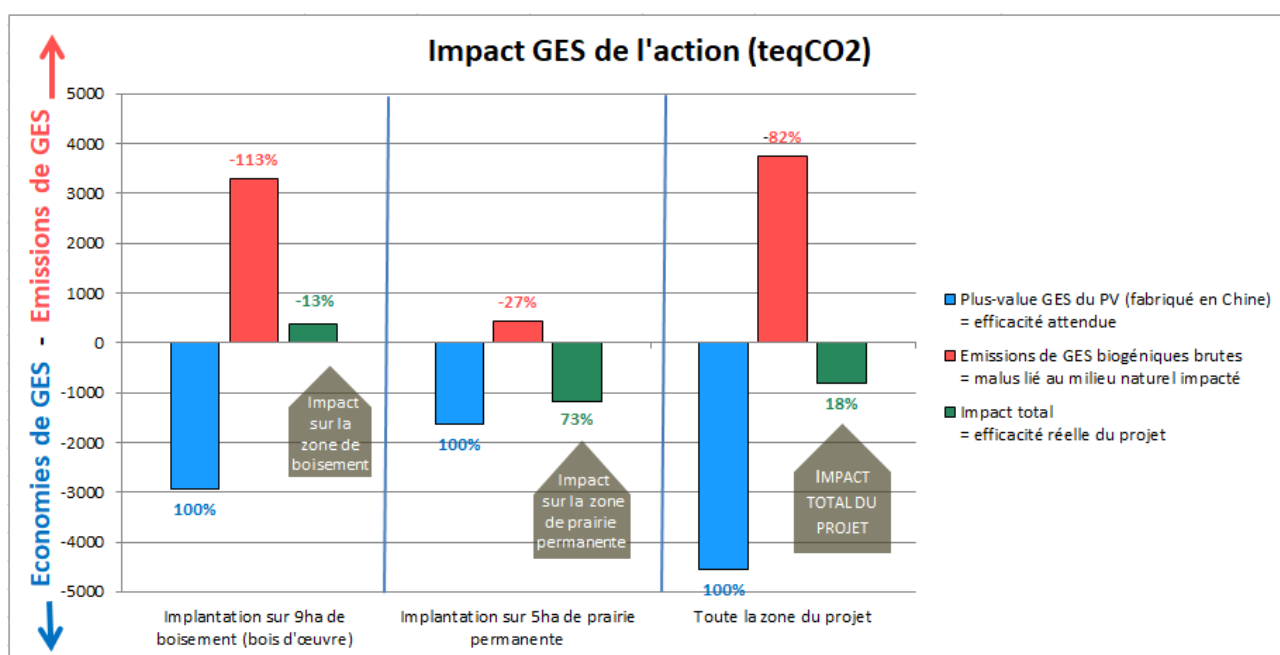


Figure 4. Graphique final de l'analyse QuantiGES : impact GES dans chaque milieu et global

### Note de fiabilité n°3 d'après la formule du GIEC préconisée par QuantiGES :

Grâce au dernier résultat nous pouvons calculer la note de fiabilité n°3 dite note de fiabilité globale. La note de fiabilité globale s'applique au bilan GES de l'ensemble de l'action à savoir l'implantation de panneaux PV, dans 9 ha de boisement et 5 ha de prairie permanente. Elle découle de deux données :

- L'implantation PV sur 9ha de boisement (incertitude 68%)
- L'implantation PV sur 5ha de prairie permanente (incertitude 66%)

**Note de fiabilité n°3** =  $4 * (1 - \sqrt{(\text{somme des incertitudes}^2) / \text{somme des émissions des conséquences}}) = 4 * (1 - \sqrt{((0,68 * 367 * 9)^2 + (0,66 * 87 * 5)^2) / 812}) = -7,2$

Cette note de fiabilité négative est un artefact lié à l'incertitude élevée : la somme des incertitudes passées en racine carrée est supérieure en valeur absolue au résultat global du bilan carbone.

Le résultat global de l'action (-812 teqCO<sub>2</sub>) est donc, en lui-même, très peu précis. En revanche, pour chaque sous-action, les ordres de grandeur obtenus sont suffisants sont robustes : que ce soit dans le cas de Montbelleux ou tout projet PV équivalent (même puissance de parc et même énergie grise des panneaux), remplacer tout espace boisé par des panneaux solaires est émetteur de GES et toute implantation en prairie permanente amoindrit les économies de GES attendues (voir encadrés précédents).

En termes quantitatifs le défrichement remet en question plus de 100% du bénéfice du PV. Pour la prairie permanente on aurait préféré une estimation plus précise (73 ±48% signifie une efficacité entre 25 et 100% de son objectif) mais elle n'est sans doute pas possible au vu de l'état des connaissances embryonnaire sur le sujet et de la grande hétérogénéité 1. des stocks de carbone en sol de prairie 2. des réponses des prairies à l'installation de panneaux (échanges personnels avec un chercheur de l'INRA).

### Déterminer l'indice de confiance du résultat général de l'étude

Indice de confiance = Note de fiabilité n°1 \* Note de fiabilité n°2 \* Note de fiabilité n°3 =  $1,5 * 4 * -7,2 = -43,2$

**L'indice de confiance de notre analyse est très faible (et même négatif)** à cause de la note de fiabilité n°3, commentée ci-dessus. Cela provient :

- De données sources avec une forte incertitude et notamment de nombreuses valeurs moyennes (stocks de carbone dans les milieux, FE d'émissions électrique, FE de carbone biogénique) ;
- De « l'incertitude des données utilisées en approche ex ante, qui, par définition, ne peuvent être des données réelles » (méthode QuantiGES) ;
- Du cas de figure étudié où les 2 composantes se soustraient l'une et l'autre, d'où un dénominateur faible pour le calcul de la note n°3 et un résultat négatif.

A noter que les problèmes de fiabilité associés aux résultats de l'étude concernent uniquement la précision au sens strict et non l'exactitude<sup>11</sup>. La partie ci-après « Biais et zones d'ombre de l'étude » développe cette question.

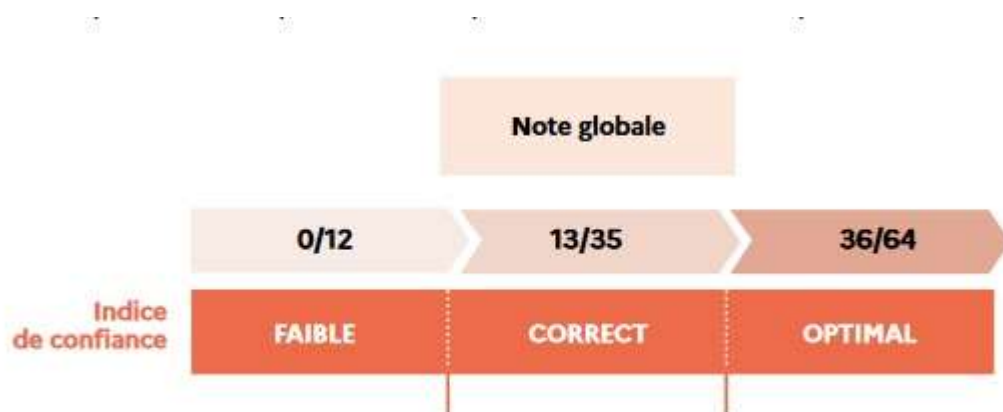


Figure 5. Barème relatif à l'indice de confiance final sur le résultat de la quantification (figure 33 QuantiGES)

La présente étude donne un indice de confiance aberrant (-42) qui traduit un niveau d'incertitude très élevé du résultat global.

### Etape 6. Analyser le résultat de la quantification

#### Rappel des éléments de cadrage

- Intitulé de l'action : Projet de parc photovoltaïque sur le site du Haut Montbelleux
- Descriptif : l'action vise à implanter environ 14 ha de panneaux solaires, dont 9 ha nécessitent le défrichement d'un bois et 5 ha se situent en prairie permanente (surfaces approximatives, en l'absence du dimensionnement précis du projet)
- Type d'action : action physique
- Porteur de l'action : M. Paris (porteur de projet privé et propriétaire des lieux) mais aussi les acteurs publics associés au processus de décision
- Période de mise en œuvre : pour l'instant à l'étude, l'implantation pourrait être effective dès 2024. Son impact est évalué sur 25 ans, correspondant à la période de production attendue des panneaux PV.
- Statut de l'action : en réflexion
- Indice de confiance visé : correct
- Moment de la quantification : ex ante

#### Analyse de la caractérisation de l'action

<sup>11</sup> Autrement dit, le résultat « vise au bon endroit » mais avec peu de précision ; à la différence d'un problème d'exactitude où le résultat présenterait des biais qui le feraient « dévier » vers un résultat erroné, même si précis. Sur cette distinction, voir par exemple : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Exactitude\\_et\\_pr%C3%A9cision](https://fr.wikipedia.org/wiki/Exactitude_et_pr%C3%A9cision)

Le schéma des conséquences est simple. De la construction du parc PV découlent directement tout un faisceau de conséquences, parmi lesquelles trois impactent le climat par émission ou économie de GES :

1. la plus-value GES associée à une production électrique photovoltaïque
2. l'émission de GES par perte des capacités de stocks et puits de carbone du boisement
3. Idem pour les prairies permanentes.

### Analyse des résultats de la quantification

- Le carbone biogénique émis par la transformation des milieux naturels n'est pas négligeable, en France et en Bretagne il est actuellement du même ordre de grandeur que les économies de GES réalisées par l'énergie photovoltaïque (voir ci-dessous, encadré « A retenir »).

- Plus précisément, en décomposant par type de milieu naturel impacté :
  - par rapport à un parc PV en « zone neutre » (culture ou sol artificialisé), le choix de l'implantation en **prairie permanente** diminuerait de l'ordre d'un quart le bénéfice climatique du projet : cela retirerait entre 0 et 75% de l'efficacité attendue en termes de réduction des GES (73%  $\pm$  48% d'efficacité, soit 27  $\pm$  48% de différentiel);
  - c'est encore pire pour l'implantation sur un **boisement**, qui a un effet contre-productif : elle émettrait entre 9 et 21% de GES de plus (-13%  $\pm$  9%) qu'en l'absence de projet (production électrique habituelle et milieux naturels du Haut Montbelleux préservés).

- Le projet PV du Haut Montbelleux dans son ensemble, majoritairement implanté sur boisement, voit son efficacité en termes de GES grandement amoindrie une fois pris en compte les milieux naturels. Le projet sur toute sa durée de vie perdrait plus de 80% de son efficacité **c'est-à-dire un bénéfice climatique réduit à seulement 18% de son ambition** (contre 100% d'efficacité en l'absence d'émissions biogéniques).

### **Tableau 2. Potentiel de réduction des gaz à effet de serre par la conversion au photovoltaïque pour le poste « production d'électricité »**

Les émissions de la production électrique PV sont comparées à celles de la production électrique habituelle (mix moyen français consommé).  $(52,0-43,9)/52,0=15,6\%$  / Les émissions du projet PV de Montbelleux sont comparées à celles d'une production électrique habituelle pour la même énergie produite  $(1000 \text{ MWh/ha/an} * 15\text{ha} * 25\text{ans} = 375 \text{ GWh})$ .  $812/(375*52)=4,2\%$

| Poste à décarboner                                                                                                                                                                                                       | Production d'électricité  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Potentiel du photovoltaïque en France<br>Pour 1 kWh consommé, quel % de décarbonation espéré par une production PV plutôt qu'au mix électrique national 2022 ? (attention inapplicable à toute la production électrique) | <b>15,6%</b><br>🔒 = 84,4% |
| Potentiel du parc PV de Montbelleux, compte tenu des caractéristiques techniques du projet et de l'implantation sur milieux naturels                                                                                     | <b>4,2%</b><br>🔒 = 95,8%  |

Impact sur les réductions de GES

Important (>5%) / Faible (1 à 5%) / Négligeable (-1 à 1%) / Légèrement négatif (-5 à -1%) / Négatif (<-5%)

🔒 = Verrouillage d'émissions de GES induit par un usage moins polluant mais toujours polluant

- Nous présentons en annexe quelques graphes de la cinétique des émissions de **GES biogéniques** au cours de la vie du parc (Annexe 1). On réalise qu'une grande partie des émissions brutes ont lieu au moment du défrichement et de l'implantation, pour la biomasse (environ 1/3 du total) mais également le sol. C'est particulièrement visible pour la partie boisement.

C'est d'autant plus vrai pour l'énergie grise, qui rejette environ 4 fois plus de GES que les milieux naturels<sup>12</sup>. Au total, c'est comme si, de façon concentrée sur les quelques semaines/mois de construction de la centrale, les 781 ménages de Luitré-Dompierre **avaient roulé en voiture pendant 9 ans**<sup>13</sup>. Un tel **pic d'émissions de GES** n'est pas anodin dans le contexte de l'urgence climatique.

Le manque d'efficacité du projet en GES économisés se répercute aussi sur la durée d'amortissement. Contre 1 à 1,5 ans usuellement admis<sup>4</sup>, le projet de Montbelleux prendrait 18 ans, soit les trois quarts de la durée de vie du projet, pour atteindre son équilibre (Annexe 1b).

- Le choix de l'échelle européenne donnerait un résultat beaucoup plus favorable pour la plus-value carbone du PV et pour le bilan du projet en général. Une telle réflexion à échelle européenne est pertinente, mais pas suffisante : elle ne devrait pas effacer les objectifs territoriaux de réduction des GES affichés par les pouvoirs publics et fondement même des projets d'énergies renouvelables. C'est ce que nous argumenterons plus en détail dans la partie suivante.

Notons que le choix de référentiel, qu'il soit régional, national ou européen, influe sur le bilan comptable de l'action mais n'enlève rien à la pollution initiale et biogénique, telles qu'évaluées ci-dessus en « années de voiture ». Ces émissions restent vraies dans l'absolu, indépendamment des raisonnements par comparaison que l'on peut appliquer à plus grande échelle.

#### Encadré 6 : les ordres de grandeur apportés par l'étude

- La plus-value carbone du photovoltaïque est obtenue en comparant :
  - les émissions de GES pour l'énergie grise d'1 ha de parc photovoltaïque, **1000** teqCO<sub>2</sub> ;
  - et ce que le mix électrique français actuel aurait rejeté pour la même quantité d'électricité produite, soit **1300** teqCO<sub>2</sub>.

(étape 6, données des encadrés 1 et 3)
- Cette plus-value carbone de **300** teqCO<sub>2</sub>/ha est remise en question par :
  - le carbone biogénique émis par dans le cas d'une implantation sur forêt : **350 à 400** teqCO<sub>2</sub>/ha selon l'usage qui est fait du bois récolté et la fenêtre d'observation 25 ans/long terme;
  - le carbone biogénique émis dans le cas d'une implantation sur prairie permanente : **100** teqCO<sub>2</sub>/ha

(étape 7)

14605/1658 = 8,8 ans de circulation routière de tout le parc automobile de Luitré concentrées au début du projet ; ces émissions sont progressivement compensées par la plus-value du PV au cours de la durée de vie du parc (cf. figure 4) pour atteindre le point d'équilibre à environ t+18 ans.



## Réflexion sur l'échelle spatiale de l'analyse

Cette question, source de divergences dans les résultats, mérite d'être mise au clair. Selon le niveau d'analyse choisi, on aboutit :

- à l'**échelle du site** à des émissions nettes de GES. Ces émissions sont même très élevées : 13650 teqCO<sub>2</sub> pour l'énergie grise importée et 3738 teqCO<sub>2</sub> émises ou non absorbées pour le carbone biogénique soit l'équivalent de 10 ans et demi<sup>14</sup> de circulation de tout le parc automobile de Luitré-Dompierre, surtout concentrés au début du projet comme on l'a vu. Ce bilan nous rappelle que le gain carbone recherché n'est que relatif. Rien ne pourra annuler toutes ces émissions, mais on espère que des émissions encore plus importantes (par une source d'électricité plus carbonée) seront évitées : c'est le pari des EnR.
  - à l'**échelle territoriale**, à un résultat inconnu : nous n'avons pas accès au mix électrique consommé par Fougères communauté. Cette information devrait être incluse dans le PCAET : peut-être que le facteur d'émission du projet PV est déjà plus élevé que celui du territoire, auquel cas le projet serait émetteur de GES à l'échelle de la communauté d'agglomération.
  - à l'**échelle régionale**, des émissions nettes de GES. Comme le FE du mix électrique breton est proche du FE national, on obtiendrait un résultat équivalent (voir Annexe 2).
  - à l'**échelle nationale**, des émissions nettes de GES. C'est le niveau choisi dans cette étude, car il semble correspondre à un niveau décisionnel sur l'énergie ainsi qu'à une interconnexion supposée totale du réseau à échelle française<sup>15</sup>. C'est cette échelle qui a été choisie également par le bureau d'études Gingko21 dans le cadre du projet Horizeo<sup>16</sup>.
  - à l'**échelle européenne**, la comparaison donne cette fois des économies importantes de GES. Cette échelle est souvent mise en avant par les promoteurs. Son résultat aussi positif est lié au contexte d'un mix électrique européen encore très carboné (420 gCO<sub>2</sub>/kWh soit environ dix fois plus que le PV). L'échelle de réflexion européenne n'est pas absurde, puisque dans le cadre d'un problème planétaire, c'est bien l'échelle géographique la plus grande qui importe *in fine*.
- Cependant, la prise en compte du niveau européen comme référence peut se résumer à poser cette question : est-ce que la construction d'une centrale PV à Fougères pourra un jour contribuer à fermer une centrale à charbon en Allemagne ou en Pologne ? Cela nécessite pour être réaliste que plusieurs conditions soient remplies à la fois :
- Que les interconnexions du réseau électrique interétatique européen soient opérationnelles et non saturées. C'est un point délicat à gérer en particulier pour les EnR à production variable comme le photovoltaïque et l'éolien<sup>15, 17</sup>.
  - Que les choix d'approvisionnement électrique au niveau européen privilégient toujours les sources les moins carbonées au détriment des plus carbonées. Sur ce

Niveau  
d'analyse  
retenu pour  
cette étude

<sup>14</sup>  $(13650+3738)/1658=10,5$  ans (voir note 13 pour la valeur d'une « année-voitures » à Luitré-Dompierre).

<sup>15</sup> « le réseau public [national] de transport actuel [...] ne risque pas de devenir un facteur limitant pour l'intégration des EnR dans les années à venir si des adaptations ciblées sont mises en œuvre » RTE-AIE 2021 - [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE\\_synthese%20ENR%20horizon%202050\\_FR.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese%20ENR%20horizon%202050_FR.pdf)

<sup>16</sup> [https://www.debatpublic.fr/sites/default/files/2021-11/AtelierBilanCarbone0911\\_PublieCPDP\\_Light.pdf](https://www.debatpublic.fr/sites/default/files/2021-11/AtelierBilanCarbone0911_PublieCPDP_Light.pdf)

<sup>17</sup> <https://www.sia-partners.com/fr/publications/publications-de-nos-experts/lintegration-des-energies-renouvelables-un-defi-pour-le>

point, il n'existe pas de contrainte mais une réglementation de marché conçue pour favoriser les EnR et le nucléaire, qui semble efficace<sup>18</sup>.

- Que cet effet de marché, défavorable aux énergies fossiles en général, se traduise par de réels arbitrages politiques et l'abandon des énergies fossiles dans les pays concernés. Or, fermer des centrales n'est pas qu'un choix économique mais également souverain : il faut accepter de réduire son autosuffisance énergétique, de reposer sur l'électricité importée d'autres pays européens et de mettre en œuvre des solutions techniques adaptées. Ces arbitrages nationaux restent incertains.

Même en faisant le pari du marché européen, qui postule que chaque pays peut contribuer à la transition énergétique européenne dans son ensemble, il n'en reste pas moins qu'aux échelles locale, régionale et nationale, un parc PV comme celui de Montbelleux est émetteur de plus de GES pour le territoire. On peut alors questionner la pertinence et l'éthique d'un projet qui augmente les émissions GES d'un territoire pour diminuer celles d'un autre.

**Délaisser l'échelle territoriale (ainsi que régionale et nationale) dans l' « efficacité climatique » des projets, c'est renoncer à l'excellence environnementale souhaitée par l'Etat français en matière de PV (cf. note 7) et à l'objectif même des PCAET<sup>19</sup>.** Le risque serait de s'appuyer sur un mix électrique européen médiocre (voir diagramme de l'encadré 1.), pour se dispenser d'améliorer le nôtre. Le ministère de la Transition écologique, dans sa recherche de panneaux solaires bas-carbone, pose comme un point « essentiel pour notre pays [...] que le développement des énergies renouvelables permette de poursuivre la décarbonation de notre mix électrique » (cf. note 8).

La question climatique, par son urgence et l'ampleur de la décarbonation demandée, imposerait donc de viser l'efficacité dans chacune de nos actions, en particulier nos choix énergétiques. Il ne suffirait pas, alors, de déployer un maximum d'EnR sur le territoire mais de veiller **à ce que chaque projet soit vertueux à toutes les échelles**. Le choix d'un emplacement « neutre en carbone » aiderait grandement à cela. A l'inverse, entériner la construction d'un parc PV sur un boisement et/ou une prairie permanente créerait un précédent pour une filière PV en plein développement sur tout le territoire.

---

<sup>18</sup> <https://observatoire-electricite.fr/systeme-electrique/couplage-marches-europeens-electricite>

<sup>19</sup> Celui de Fougères agglomération (2020) par exemple : « 2.3 Le positionnement régional [...] Réduction des émissions de GES. » ou encore « 3.1 Cadre d'élaboration du PCAET [...] Un diagnostic réalisé sur le territoire et portant sur : Les émissions territoriales de gaz à effet de serre ».

## Biais et zones d'ombre de l'étude

Ce type d'étude est par nature imprécis car elle s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses citées explicitement dans le document. Cependant, les données utilisées l'ont été dans un sens optimiste afin que les résultats, pessimistes sur l'intérêt de la centrale PV, ne puissent pas l'être à cause des données et de la méthode. Ces choix délibérés des scénarios les plus optimistes à chaque étape s'appellent des biais conservateurs. L'étude en comprend plusieurs :

- Le bilan de GES du boisement détruit a été considéré pour une utilisation en bois d'œuvre. Une utilisation en bois énergie aurait émis 100% de la biomasse déboisée et non 80% (Leturcq, 2020). De plus, parmi les 20% de biomasse conservée en bois d'œuvre, le carbone est rarement capturé pendant 25 ans mais souvent réémis après quelques années (palettes, meubles etc. brûlés en fin d'utilisation). Enfin, l'énergie grise des travaux forestiers n'a pas été prise en compte.  
Toutes les conclusions seraient aggravées dans le cas d'une utilisation des arbres coupés, même partielle, en bois-énergie. Exemple : une efficacité globale à 8% et non 18%.
- Les milieux impactés déstockent le carbone qu'ils contenaient pendant de longues années, même après 25 ans. Les graphiques INRA (Annexe 1) suggèrent qu'un sol de prairie émet 19% de GES de plus après 25 ans, et un sol forestier 36% après 25 ans lors du passage en culture.  
Par ailleurs, le manque à gagner par annulation du puits de carbone de la forêt ajouterait 1,6% de rejets de GES par an au total calculé sur 25 ans (367 t<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>) , c'est-à-dire une quantité infinie de GES à long terme. En prenant un cadre temporel fixe de 25 ans, nous avons fait l'hypothèse d'une régénération naturelle dès la 26<sup>ème</sup> année, et n'avons pas ajouté les émissions biogéniques ultérieures<sup>20</sup>.

Les biais suivants sont plutôt des zones d'ombre et viennent de l'incertitude et de la méconnaissance sur deux points :

- Les émissions GES de la production d'électricité baissent en continu depuis 2019 et sont vouées à baisser encore dans le futur, par effet des énergies renouvelables (a priori pas le PV comme nous l'avons vu, mais celles qui diminuent vraiment les GES comme l'éolien, voir graphique en encadré 1.) et du maintien du nucléaire. Par manque de valeurs précises sur l'évolution du FE lié au mix électrique français année après année, nous n'avons pas creusé cette voie pourtant réaliste d'un FE en diminution. Si l'on suit le scénario de l'ADEME à 29,0 gCO<sub>2</sub>/kWh en 2030<sup>21</sup>, **d'ici environ 2 ans, le photovoltaïque serait globalement émetteur de GES en France** sans même parler de carbone biogénique (souvent omis), à moins d'un changement drastique de l'énergie grise de la filière photovoltaïque, par sa relocalisation par exemple.

<sup>20</sup> Sauf au graphique de l'encadré 1 concernant les FE du PV et forêt et prairie, pour illustrer la situation vraisemblablement la plus courante (défrichement part en bois-énergie et le site reste artificiel après 25 ans).

<sup>21</sup> Document en note 16, diapo 22. Même si l'empreinte carbone de l'électricité française stagnait à 29,0 gCO<sub>2</sub>/kWh après 2030, on obtiendrait un FE moyen sur 25 ans bien inférieur à celui de 52,0 utilisé dans l'étude, à la défaveur du bilan carbone du projet PV de Montbelleux, et de nombreux projets PV d'ailleurs.

- Notre étude attire l'attention sur la sous-estimation du FE du photovoltaïque dans le cas de l'implantation sur des milieux naturels ou semi-naturels. Mais par ailleurs, il subsiste un doute après toutes nos recherches sur le FE « énergie-grise simple » fourni par l'ADEME. Serait-il déjà sous-estimé ? Plusieurs sources consultées indiquent que le FE donné par l'ADEME ne correspondrait qu'à l'émission par fabrication du module (comme les textes réglementaires notamment<sup>22</sup>). Malheureusement, cette information qui n'est pas précisée dans la base Empreinte® qui ne commente pas le FE fourni. La connaissance de la vraie valeur du FE global est pourtant critique car, si la sous-estimation est avérée, elle serait de 35% (la fabrication du module représente 65% des GES émis<sup>16</sup>). Le FE complet du PV ne serait plus de 39 mais 60 geqCO2/kWh, ce qui suffit à ôter au photovoltaïque son intérêt pour le climat en France.

Ces biais conservateurs signifient que, si les inexactitudes supposées sont avérées, l'empreinte écologique du projet PV du Haut Montbelleux serait pire que les résultats de cette étude.

---

<sup>22</sup> [https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article\\_jo/JORFARTI000044173115](https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000044173115)

## Eventualité d'un « reboisement compensateur pour le carbone »

Nous abordons cette question avec beaucoup de prudence, sans connaissance du dossier d'étude d'impact, car le concept de « boisement compensateur » pour le carbone est fragile. Il n'est défini ni réglementairement, ni scientifiquement, à notre connaissance<sup>23</sup>. Toutefois il nous paraît possible que la notion soit mise en avant dans le dossier, comme elle l'a récemment été dans le dossier Horizeo d'un grand parc photovoltaïque à Saucats dans les Landes (cf. note 4 plus haut) face au constat d'un bilan carbone défavorable. Si tel était le cas, nous préfererions d'emblée avertir le lecteur des limites de cette démarche encore expérimentale.

Le terme « boisement compensateur » est habituellement réservé à la biodiversité, dans le cadre de la compensation de la démarche « Eviter, Réduire, Compenser ». Un tel boisement compensateur est prévu dans le dossier du projet PV du Haut Montbelleux, et a déjà fait l'objet d'acquisitions foncières en périphérie du site pour y planter des arbres. Par opportunité, ce boisement pourrait être présenté avec le double emploi de compensation pour la biodiversité et, de façon non cadrée, pour le carbone.

Point théorique mais important, si une compensation climatique s'avérait être effectivement envisagée dans l'étude d'impact, c'est que l'effet défavorable du projet pour le climat aurait été acté par le porteur de projet lui-même. De plus, une telle « compensation climatique » serait contestable à plusieurs titres car :

- *Retardée par rapport au projet et à l'urgence climatique, voire impossible*

L'étude Horizeo dans les Landes (figure extraite de Loustau *et al.*, 2021. en Annexe 2) envisage la plantation d'un **reboisement compensateur d'une surface deux fois supérieure à la surface déboisée** (2000 ha de boisement pour 1082 ha déboisés), soit une emprise foncière triplée. Le modèle utilisé met en évidence que le boisement compensateur permettrait d'atteindre l'équilibre en carbone, en termes d'émissions biogéniques, au bout de 28 ans, le temps de la croissance des arbres plantés.

A t+28 ans après implantation du parc, l'effet compensateur serait réel, à gestion sylvicole égale (pas plus intensive que le boisement détruit). Mais celui-ci est retardé par rapport à la réalisation du projet, à tel point que l'équilibre en CO<sub>2</sub> rejeté/absorbé (biogénique uniquement) n'arriverait qu'à la fin la de la période d'exploitation du parc PV, estimée en général à 25-30 ans, soit une **émission nette de carbone biogénique pendant toute la durée de vie du projet**.

28 ans est donc, dans le cadre du projet Horizeo, la durée nécessaire à compenser une forêt de pins assez artificielle par un reboisement deux fois plus étendu. Mais compenser une forêt ancienne comme le bois de Montbelleux est plus compliqué, car les stocks de carbone sont plus importants, voire même potentiellement impossible (témoignage de l'auteur principal de l'étude, cité en Annexe 2).

Une plantation additionnelle au projet peut donc **contrebalancer au moins en partie, les émissions biogéniques sans toutefois les annuler**. Notamment en début de projet un reboisement ne peut pas annuler le pic de GES. A moins de planter les arbres longtemps avant le début des travaux, on a

---

<sup>23</sup> Au contraire, le Label Bas Carbone par exemple, proscriit la réutilisation d'une action de compensation (pour la biodiversité) pour pouvoir contribuer à la lutte contre le changement climatique.

toujours une phase d'émission nette de CO2 dans l'atmosphère par les écosystèmes détruits ou perturbés. Idem pour l'énergie grise liée à la fabrication des panneaux. Ces émissions peuvent se justifier si elles sont rapidement amorties et qu'elles participent à un projet au bénéfice climatique clair. Or, dans le cadre de Montbelleux, il semblerait -par comparaison à l'étude de référence Horizeo- qu'un éventuel boisement compensateur serait de toute façon lourd (2x la surface de boisement impacté serait un minimum pour une forêt ancienne, sans même parler des prairies) et que rapprocher la date d'équilibre (estimée par notre étude à 18 ans sans compensation, Annexe 1b) à une durée acceptable de quelques années, serait laborieux.

- *Inappropriée dans le cadre des politiques climatiques en cours*

Ce point propose une réflexion moins quantitative mais plus logique, dans une recherche de cohérence de l'action. Les boisements sont un levier majeur dans la lutte contre le changement climatique. D'une part, comme le mentionne le PCAET de Fougères agglomération : « **Les forêts contribuent à 74% [du] stockage [du carbone], les sols des prairies permanentes représentent les 26% restants** » (p.42). D'autre part, ils remplissent des services pour la population, et notamment la régulation du climat local et l'apport d'ombrage pour les humains pendant les périodes de canicules, qui seront de plus en plus fréquentes. 48,6°C l'été sera un record de chaleur estivale possible dans le nord-ouest de la France, et ce à partir de 2050, nous prévenaient il y a peu Météo France et le CNRS<sup>24</sup>. Cela deviendra vite une question de survie, quand au même moment ces records de température atteignent les 55°C dans l'est de la France.

L'importance des boisements et des éléments naturels du paysage est même ancrée juridiquement. « L'estimation de la séquestration carbone est devenue obligatoire dans le cadre de l'élaboration d'un PCAET (décret le n° 2016-849). L'objectif est de mettre l'accent sur le service rendu par les forêts, les couverts végétaux et les sols, comme "puits carbone" dans le contexte du réchauffement climatique. »<sup>25</sup> Maintenir une exploitation économique de ces milieux n'est pas du tout contradictoire avec cet objectif, tant qu'elle reste modérée.

Dans cette vision, la conservation voire la création d'espaces naturels ou semi-naturels sont toujours bénéfiques pour le climat (par exemple repasser au PLU une parcelle en zone naturelle alors qu'elle était agricole). Puisque des zones de plantations ont déjà été achetées par le porteur de projet aux marges du site du Haut Montbelleux, elles pourraient donc être envisagées de manière volontaire (comme le fait le Label Bas Carbone) ce qui créerait une réelle plus-value, et non comme la compensation d'une destruction de milieux naturels par ailleurs.

On pourrait imaginer un reboisement indépendamment du projet photovoltaïque. Pour le bois historique de Montbelleux qui est une forêt ancienne, ce serait aussi une opportunité de recolonisation, au secours de la biodiversité forestière de Bretagne (-51% d'oiseaux forestiers entre 2003 et 2013<sup>26</sup>). Les marges nouvellement reboisées pourraient atteindre au fil des années un bon état écologique, colonisées par les espèces déjà existantes du bois actuel.

---

<sup>24</sup> Margot Bador et al 2017 Environ. Res. Lett. 12 074025

<sup>25</sup> Base Carbone®, UTCF>Forêt française

<sup>26</sup> Lorrilière & Gonzalez, 2016. Déclinaison régionale des indicateurs issus du Suivi Temporel des Oiseaux Communs (STOC) – Rapport d'analyse

Dans un souci d'efficacité et de cohérence, le recours à la compensation climatique est discutable pour des projets justement à vocation climatique. Autrement dit, les trois points suivants ne devraient pas être mis en conflit mais sollicités en synergie et non pas en conflit<sup>27</sup> :

- (1) **réduction** des émissions de GES liées aux activités humaines ;
- (2) **conservation** des milieux naturels les plus stockants en carbone (forêts, prairies permanentes, zones humides) ;
- (3) adoption de pratiques stockantes **additionnelles**, catégorie dans laquelle on peut ajouter les opérations de « compensation carbone » parmi lesquelles la plantation ou régénération d'arbres.

---

<sup>27</sup> inspiré du rapport INRA, 2020. Stocker du carbone dans les sols français (à l'occasion de la COP21)

### En conclusion générale :

A l'échelle nationale, le projet photovoltaïque sur le site du Haut Montbelleux entraînerait une lourde perturbation sur des milieux naturels pour peu d'effets positifs sur le climat.

L'économie de GES réelle est évaluée à moins de 20% du bénéfice attendu pour des panneaux solaires, sur la base des données techniques connues sur le projet. La période d'efficacité climatique réelle, survenant habituellement après 1 à 2, voire 3 ans d'amortissement sur une durée de vie du parc de 25 ans, serait également retardée : 18 ans d'émissions nettes avant de commencer à économiser des GES.

Ceci est dû à l'énergie grise des panneaux solaires mais aussi à l'impact sur les milieux naturels choisis pour l'implantation, qui par défrichement et artificialisation, émettent beaucoup de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère au début et au cours du projet. L'effet bénéfique associé au photovoltaïque apparaît trop faible, et trop lent à compenser émissions de GES initiales.

**La prise en compte de la composante biogénique du projet remet donc en question son objectif principal, à savoir limiter les émissions de GES dans le contexte de changement climatique actuel.**

A l'échelle européenne, l'énergie PV reste beaucoup moins émettrice de GES que la moyenne des Etats, même en prenant en compte le carbone biogénique (encadré 1). Mais cette vision comparative ne devrait pas masquer l'objectif de décarbonation en France et au niveau local.

Un parc PV sur milieu naturel pollue encore 7 fois moins que la moyenne européenne, mais toujours 2 fois plus que des panneaux fabriqués en France et implantés en « terrain neutre », c'est-à-dire non naturel\*. Le manque à gagner entre ces deux options est crucial pour le climat, comme l'indique le Ministère de la Transition Ecologique dans sa recherche de panneaux solaires bas-carbone\*\*. Nos choix énergétiques d'aujourd'hui sont ceux qui permettront ou non d'atteindre la neutralité carbone en 2050 selon les objectifs climatiques mondiaux et nationaux (SNBC notamment). Le simple argument d'un projet moins émetteur que la moyenne européenne est insuffisant.

**Au vu de ces conclusions, le projet de parc PV du Haut Montbelleux ne semble pas à la hauteur de l'efficacité climatique attendue pour une EnR. Cette étude met en évidence l'importance d'éviter les milieux (semi-)naturels dans les aménagements pour limiter les GES biogéniques. Elle plaide pour leur prise en compte dans tous les projets et valide au niveau local les préconisations du GIEC et de l'IPBES au niveau mondial :**

**« la protection et la restauration des écosystèmes riches en carbone constituent la priorité absolue dans une perspective conjointe d'atténuation du changement climatique et de protection de la biodiversité »\*\*\*.**

\* Mix européen à 420 (déc 2017-Base empreinte), FE du PV fabriqué en France de 25,2 (Base empreinte), FE du PV en forêt de 58 (x2,5) et en prairie permanente de 48 (x1,9), toutes ces valeurs en gCO<sub>2</sub>/kWh

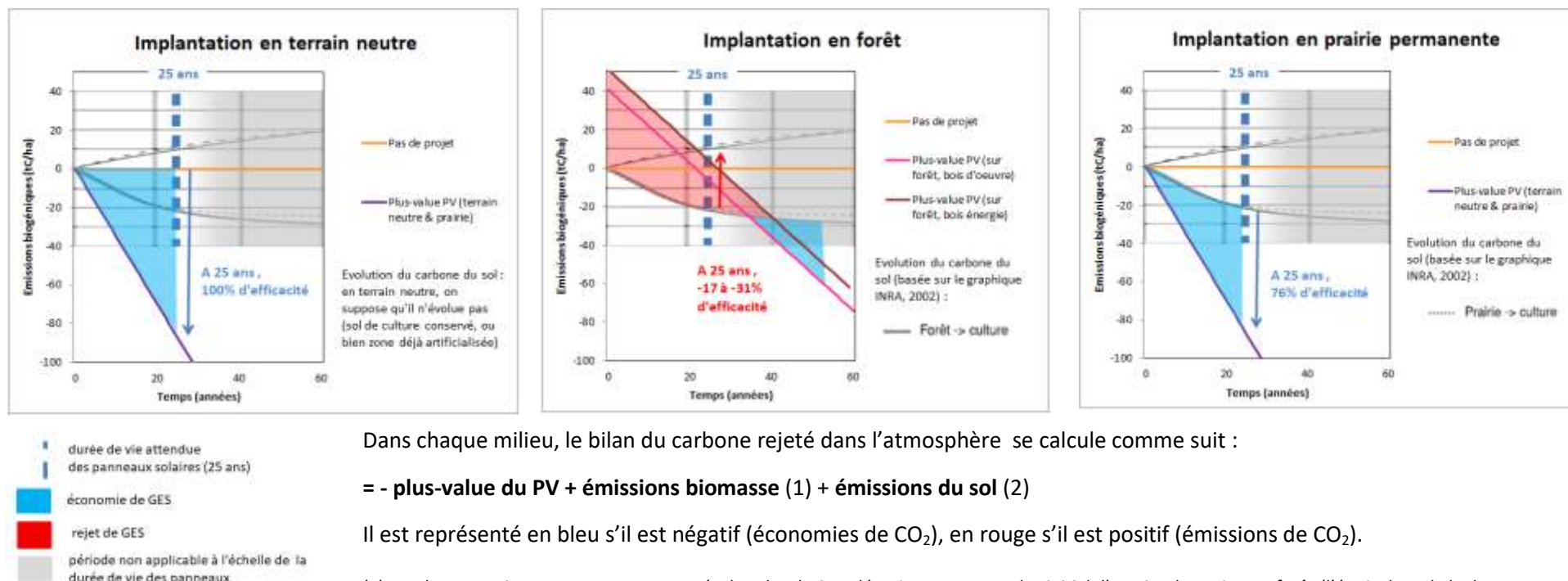
\*\* Ministère de la transition énergétique, octobre 2021. Les panneaux solaires bas-carbone en France

\*\*\* Pörtner, H.O. et al., 2021. IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change



## Annexes

1. **Éléments temporels de l'analyse des GES** : 1a. durée d'amortissement carbone et décarbonation effective à 25 ans lors d'une implantation de panneaux PV sur différents types de milieux, à partir des graphiques de changement d'occupation des sols de l'INRA (courbes en arrière-plan) et des facteurs d'émissions de la base Empreinte® (droites au premier-plan)



Dans chaque milieu, le bilan du carbone rejeté dans l'atmosphère se calcule comme suit :

$$= - \text{plus-value du PV} + \text{émissions biomasse (1)} + \text{émissions du sol (2)}$$

Il est représenté en bleu s'il est négatif (économies de CO<sub>2</sub>), en rouge s'il est positif (émissions de CO<sub>2</sub>).

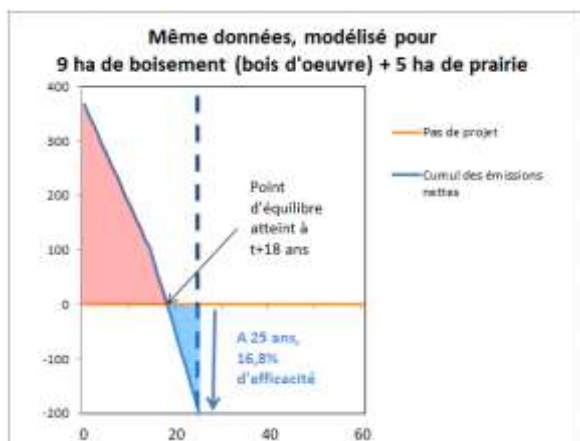
(1) Les deux premiers termes sont regroupés dans les droites décroissantes. Le malus initial d'une implantation en forêt (l'équivalent de la dette verte présentée en fig. 1 de ce rapport) vient de la perte de biomasse. En prairie permanente, on considère que la biomasse avant/après panneaux ne varie pas, seul le sol émet du carbone par changement d'usage. La pente des droites représentées vient des facteurs d'émissions utilisés dans ce rapport : plus-value de l'électricité moins carbonée produite par le photovoltaïque (économie) contrebalancée par le puits de carbone forestier annulé (économie annulé = émission).

(2) Les émissions par changement d'occupation du sol sont tirées du graphe INRA 2002 (in Base Carbone®, consultée en 2024) et affichés en arrière-plan. Cette prise en compte de dynamiques non-linéaires va plus loin que les simples facteurs d'émissions utilisés dans ce rapport mais ne change pas beaucoup les résultats : 76% d'efficacité du PV en prairie permanente contre 73% dans le texte ; -17% d'efficacité en forêt contre -13% ci-dessus.

Limite à l'interprétation des graphiques : les émissions grises du PV sont représentées linéairement ici, alors qu'elles sont en réalité beaucoup plus concentrées au début du projet. Les vraies courbes d'émissions seraient beaucoup moins lissées (mais seraient concentrées au début du graphique, 97% des émissions) et en prairie elle devrait commencer « dans le rouge » également les premières années. Sont interprétables en revanche : l'efficacité GES à 25 ans, le point d'équilibre du projet s'il survient avant 25 ans.

## 1b. Scénario GES temporel indicatif pour le projet PV du Haut Montbelleux

Ce graphique est construit de la même manière que les trois précédents, à partir des mêmes données. Il comprend les mêmes limites mentionnées ci-dessus. Normalement, un vrai scénario d'émissions de GES d'un projet est élaboré à partir d'un modèle complètement évolutif dans le temps (voir ci-dessous le graphique du projet Horizeo, tiré du modèle GO+, Loustau *et al.*, 2021) et non pas de facteurs d'émissions comme ici pour le photovoltaïque.



La simulation temporelle donne 16,8% d'efficacité globale au projet (contre 18% par le calcul QuantiGES).

Elle apporte en plus une durée d'amortissement estimée : 18 ans pour atteindre l'équilibre entre GES émis et économisés, c'est-à-dire les ¾ de la durée de vie attendue du parc PV. Seules les 7 dernières années du parc seraient réellement efficaces pour produire une électricité moins carbonée.

## 2. La compensation carbone dans le cadre d'un défrichement : exemple du parc photovoltaïque Horizeo dans les Landes à Saucats (future plus grande centrale PV de France, 2000 ha d'emprise au sol)

C'est l'un des premiers projets photovoltaïques pour lesquels les rejets de carbone par les milieux naturels impactés (boisement en l'occurrence) ait été étudié. Ce déboisement impacte à 99% des monocultures de pins, qui sont des boisements souvent artificiels. Le bilan de carbone biogénique a été réalisé par des chercheurs de l'INRAE et de l'Institut Européen de la Forêt Cultivée qui ont cherché non pas la balance défrichement/PV comme dans cette étude et l'annexe 1., mais la **balance défrichement/reboisement** dans la perspective d'une plantation d'arbres compensatrice.

Comme l'indique la figure ci-dessous, extraite de l'étude Horizeo (Loustau *et al.*, 2021), la compensation effective entre le carbone émis par le défrichement et le carbone « rattrapé » par les boisements compensateurs **ne serait effective qu'au bout de 28 ans** après le défrichement (2053-2025).

L'auteur principal de l'étude, interviewé par France 3 Bretagne (19/20 du 13 mars 2024) déclare dans un contexte plus général que, s'il est possible de compenser un boisement jeune ou artificiel [comme c'est le cas pour le projet Horizeo], il paraît plus illusoire de compenser une forêt ancienne.

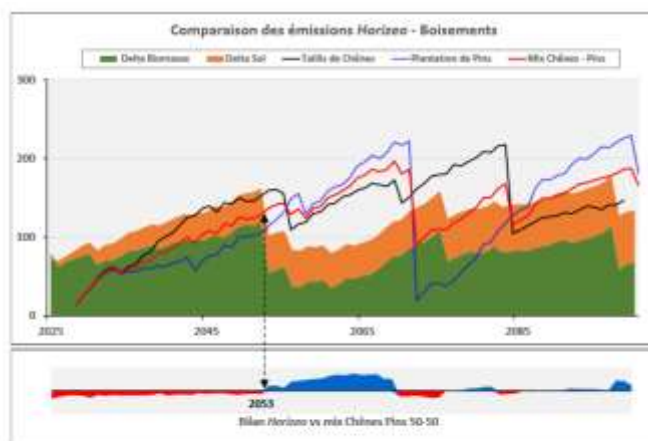


Figure 20. Dynamique des émissions de carbone du projet Horizeo (1771 ha) et de plantations de chênes pédonculés et pins maritimes conduits en taillis et en futaie respectivement, en sylviculture standard. Ces projections correspondent à l'option représentée dans le tableau 4c.

### 3. Recherches sur un « mix électrique breton consommé »

La région Bretagne n'est pas auto-suffisante en électricité, elle importe 80% de l'électricité qu'elle utilise depuis les régions voisines. C'est pourquoi le facteur d'émission associé à l'électricité en Bretagne doit prendre en compte l'ensemble de ces sources, mêmes importées, pour obtenir le « mix électrique consommé ». A défaut d'un chiffre précis disponible, nous avons regroupé différentes données, d'années différentes, disponibles sur internet. Cette estimation est donc calculée uniquement à titre indicatif. Elle s'avère être très proche du mix français.

| Estimation du facteur d'émission du mix électrique consommé en Bretagne (~20 TWh) |                  |                      |                   |                                    |                        |                                           |                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|
|                                                                                   | Proportions      |                      |                   | % élec.<br>consommée<br>(calculée) | *Emissions<br>tCO2/GWh | Emissions nettes bretonnes<br>(calculées) |                                 |
| Importée                                                                          | 0,8 <sup>a</sup> | Nucléaire            | 0,77 <sup>c</sup> | 61,6%                              | 16 <sup>b</sup>        | 9,86                                      |                                 |
|                                                                                   |                  | Thermique<br>fossile | 0,05 <sup>c</sup> | 4,0%                               | 487 <sup>b</sup>       | 19,48                                     |                                 |
|                                                                                   |                  | Renouvelables        | 0,18 <sup>c</sup> | 14,4%                              | 10 <sup>b</sup>        | 1,44                                      |                                 |
| Produite                                                                          | 0,2 <sup>a</sup> | Non<br>renouvelable  | 0,21 <sup>a</sup> | 4,2%                               | 487 <sup>b</sup>       | 20,45                                     |                                 |
|                                                                                   |                  | Renouvelable         | 0,79 <sup>a</sup> | 15,8%                              | 10 <sup>b</sup>        | 1,58                                      |                                 |
|                                                                                   |                  |                      |                   |                                    | <b>Total</b>           | <b>52,81</b>                              | <b>tCO2/GWh<br/>ou gCO2/kWh</b> |

- RTE : Bilan 2020 pour la Bretagne (<https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-05/RTE%20-%20Bilan%20Electrique%202020%20en%20Bretagne.pdf>)
- Graphique ADEME "Taux d'émissions de gaz à effet de serre par type de production électrique", le facteur d'émissions aggloméré de l'électricité « renouvelable » a été arbitrairement fixé à 10 gCO<sub>2</sub>/kWh et celui des « non-renouvelables » à 487 gCO<sub>2</sub>/kWh qui est en fait le mix européen, dominé par l'électricité non-renouvelable (article de 2021 : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/environnement-energie-grise-vrai-bilan-energies-renouvelables-93560/>)
- RTE 2014 in Site web OEB. Approvisionnement en énergie primaire entrant en Bretagne en 2014. Carte des flux en Bretagne. (<https://bretagne-environnement.fr/node/138046>)

