



NEOEN



Empreinte carbone du projet HORIZEO

Janvier 2025



Hélène TEULON
helene.teulon@gingko21.com

Claire REBOURG
claire.rebourg@gingko21.com

Table des matières

Table des matières	2
Table des figures	3
Table des tableaux	4
1 Contexte	5
2 Objectifs et cadrage de l'étude	5
2.1 Le scénario HORIZEO	6
2.2 Les problématiques auxquelles doit répondre l'étude	6
2.3 Le cadre considéré pour l'étude.....	7
2.4 Les scénarios de référence.....	8
2.5 Synthèse des unités fonctionnelles et des flux de référence	10
3 Modélisation et inventaires	11
3.1 Sources des données et méthodologie.....	11
3.2 Inventaires.....	13
3.2.1 Production d'électricité	13
3.2.2 Pôle de production maraîchère et agrivoltaïque	25
4 Résultats et interprétations	33
4.1 Empreinte carbone globale.....	33
4.2 Empreintes carbone par composante du projet.....	36
4.2.1 Production d'électricité	36
4.2.2 Pôle de production maraîchère et agrivoltaïque	40
4.3 Analyses de sensibilité	43
4.3.1 Sensibilité sur la production des panneaux photovoltaïque.....	43
4.3.2 Sensibilité sur l'intégration d'un système de stockage	43
5 Conclusion et limitations de l'étude	48
Références	50
Annexe A – Empreinte carbone de la fabrication des panneaux	51
Annexe B – Modélisation de la batterie LFP	52

Table des figures

Figure 1 : Méthode des stocks	12
Figure 2 : Frontière du système du parc photovoltaïque.....	14
Figure 3 : Répartition du mix de la production électrique française de 2019 (RTE, 2021) et les empreintes carbone associées (Ecoinvent v3.6 cut-off en vert et Base Empreinte en bleu)	22
Figure 4 : Répartition du mix de la production électrique française en 2030 (RTE, 2021)	23
Figure 5 : Frontières du système du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque.....	26
Figure 6 : Contributions à l'empreinte carbone pour HORIZEO et les références sur 37 ans d'exploitation	34
Figure 7 : Zoom des contributions à l'empreinte carbone pour HORIZEO et les références sur 37 ans d'exploitation.....	34
Figure 8 : Contributions à l'empreinte carbone du parc photovoltaïque HORIZEO.....	37
Figure 9 : Contributions à l'empreinte carbone du parc photovoltaïque : zoom sur la fabrication des autres composants.....	38
Figure 10 : Contributions à l'empreinte carbone du mix électrique français, 2019	39
Figure 11 : Contributions aux empreintes carbone du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque	41
Figure 12 : Contributions aux empreintes carbone de la production agricole (sans la production d'électricité)...	42
Figure 13 : Empreinte carbone d'1 kWh produit selon les scénarios HORIZEO et Références	43
Figure 14 : 6 scénarios prospectifs de mix électriques français à horizon 2050 (RTE, 2022)	44
Figure 15 : Frontières du système des batteries	53
Figure 16 : Contributions à l'empreinte carbone des batteries NMC et LFP	59

Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des unités fonctionnelles et flux de référence	10
Tableau 2 : Inventaire de production de 1 333 107 panneaux photovoltaïques avec cadre en aluminium	16
Tableau 3 : Inventaire de production des autres composants du parc photovoltaïque : 96+150 onduleurs, 28 600 km de câble électrique, 48+75 transformateurs HTA et 2 sous-stations.....	17
Tableau 4 : Inventaire de production de 12 km de raccordement réseau des composants du raccordement réseau (1/2)	18
Tableau 5 : Inventaire de production de 12 km de raccordement réseau des composants du raccordement réseau (2/2)	19
Tableau 6 : Inventaire de l'installation du parc photovoltaïque et du raccordement réseau	20
Tableau 7 : Inventaire de fin de vie des modules du parc.....	21
Tableau 8 : Mix énergétiques des scénarios de référence pour la production d'électricité	24
Tableau 9 : Production énergétique par ilot du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque.....	26
Tableau 10 : Culture par ilot du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque avec rendement et surface associés.....	27
Tableau 11 : Inventaire de la production agricole de 3253 t d'aliments, des bâtiments de stockage pour le scénario HORIZEO et les scénarios de référence	29
Tableau 12 : Empreintes carbone du cycle de vie d'HORIZEO et des références en million de kg de CO ₂ éq.	33
Tableau 13 : Empreinte carbone du parc photovoltaïque et des références.....	36
Tableau 14 : Empreintes carbone du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque HORIZEO et du scénario de référence.....	40
Tableau 15 : Contributions aux empreintes carbone du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque	41
Tableau 16 : Caractéristiques du module monocristallin de 615 Wc	51
Tableau 17 : Coefficients G _i (kg CO ₂ éq. / kWc) du module monocristallin de 615 Wc	51
Tableau 18 : Inventaire de fabrication des batteries LFP et NMC (avec renouvellement au bout de 15 ans)	54
Tableau 19 : Inventaire de fabrication des autres composants du système batterie	55
Tableau 20 : Inventaire de l'exploitation du système batterie	57
Tableau 21 : Inventaire de fin de vie du système batterie.....	58
Tableau 22 : Empreintes carbone de l'utilisation des batteries et du scénario de référence.....	59

1 Contexte

A l'Ouest de la commune de Saucats, à 20 km à vol d'oiseau, au sud de Bordeaux, les entreprises ENGIE et NEOEN développent le projet HORIZEO, visant à associer sur un même site un parc photovoltaïque et un pôle de production maraîchère et agrivoltaïque.

Ainsi, les deux sociétés mettent en œuvre les moyens de produire de l'électricité renouvelable durablement et à grande échelle et se sont fixées comme objectif de concevoir un projet :

- au service de la transition énergétique du territoire,
- qui répond à la stratégie de développement des énergies renouvelables en France.

Le projet HORIZEO s'intègre dans la trajectoire de décarbonation du mix électrique français.

Gingko 21, cabinet de conseil en éco-conception, et l'INRAE, Institut National de la Recherche Agronomique, ont été mandatés pour calculer l'empreinte carbone du projet, traduisant son impact sur le changement climatique. Gingko 21 a calculé l'empreinte carbone des infrastructures du projet (construction, exploitation, démantèlement) et l'INRAE celle des terrains concernés par le projet, en comptabilisant principalement le carbone biogénique de la biomasse, du sol et des produits récoltés en sylviculture.

Ce rapport détaille la méthode et les résultats de l'impact du projet sur le changement climatique (travaux de Gingko 21). Les hypothèses, les détails méthodologiques et les résultats des travaux de l'INRAE sont détaillées dans le rapport « Bilan de carbone du déboisement lié à l'installation du projet de parc photovoltaïque HORIZEO de Saucats ». Une synthèse des deux bilans sera proposée une fois les études finies.

2 Objectifs et cadrage de l'étude

Au travers de cette étude, ENGIE et NEOEN souhaitent évaluer les conséquences du projet HORIZEO sur le changement climatique. Le calcul de l'empreinte carbone doit orienter les porteurs du projet dans la conception globale de l'aménagement, en identifiant les leviers d'optimisation.

Ainsi, l'empreinte carbone du scénario HORIZEO a été étudiée et comparée à des scénarios de référence. Ces derniers correspondent à des scénarios où :

- le projet HORIZEO n'est pas construit,
- le site d'étude est conservé en exploitation sylvicole,
- les services envisagés dans le projet HORIZEO sont fournis selon les technologies classiquement observées sur le marché actuel.

Le choix des scénarios de référence est discuté au paragraphe 2.4.

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que cette étude a pour objectif de quantifier l'impact du projet sur le changement climatique et de mettre en regard les émissions induites, ainsi que celles des scénarios de référence définis.

Cette étude est réalisée en suivant la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie des normes ISO 14040 et ISO 14044 centrée sur un unique indicateur environnemental : le changement

climatique. Ce calcul des empreintes carbone a été fait à partir de la méthode **Global Warming Potential (GWP) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2021 100 years** en kg CO₂ eq. avec le logiciel Simapro.

Les premiers résultats ont été présentés pendant le débat public à la fin de l'année 2021. Ils ont depuis été mis à jour pour prendre en compte les modifications du projet et les remarques de la revue critique.

Le projet étant actuellement en instruction par les services de l'État, la conception n'est pas totalement figée. Les caractéristiques fines des équipements pourront évoluer en fonction des avancées technologiques et du matériel disponible sur le marché au moment de la phase de construction. Dans ce cadre, les porteurs de projet ont retenu une démarche conservatrice sur la comptabilité des émissions de gaz à effet de serre c'est-à-dire que lorsque les choix de conception n'ont pas encore été tranchés, et que plusieurs hypothèses se présentent ou lorsqu'une incertitude existe, c'est l'option la plus défavorable qui est prise en compte dans le calcul de l'empreinte carbone.

2.1 Le scénario HORIZEO

Scénario découpé par composantes

Le scénario HORIZEO est constitué de différentes infrastructures, qui ont été réparties en deux composantes, comme suit :

1. Un **parc photovoltaïque** de 818,2 Mwc de puissance de panneaux solaires (puissance crête).
2. Un **pôle de production maraîchère et agrivoltaïque**, combinant une production maraîchère et une production d'énergie dans le but de garantir une alimentation locale pour les collectivités voisines.

A ces composantes s'ajoutent :

- Les **parcelles non aménagées** et conservées en exploitation sylvicole.
- Les **parcelles non aménagées et gérées uniquement pour la biodiversité**. Ces parcelles ne sont plus exploitées pour la production de bois.

2.2 Les problématiques auxquelles doit répondre l'étude

L'objectif de cette étude est de répondre aux questions ci-dessous, par composante :

1. Le **parc photovoltaïque HORIZEO** permet-il de réduire l'impact carbone de la production d'électricité française ?
2. La **production d'aliments et d'électricité du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque** permettent-elles de réduire l'impact carbone de la consommation moyenne d'aliments en Gironde et d'électricité en France ?



2.3 Le cadre considéré pour l'étude

L'étude tient compte de la vie d'HORIZEO de la construction des composantes à leur démantèlement et traitement en fin de vie, en passant par leur exploitation et maintenance. La partie défrichement et la partie reboisement sont traitées dans le rapport de l'INRAE.

L'usage des services et produits résultants de l'activité de la plateforme n'est pas pris en compte.

Durée considérée

L'empreinte carbone du projet HORIZEO est calculée pour les 40 ans de vie des installations avec 37 ans d'exploitation.

Dans le cadre de la construction de ce projet, il est prévu :

- la mise à disposition des parcelles à aménager sous la forme d'un bail, pour une durée de 40 ans pour le parc photovoltaïque ;
- l'achat de la parcelle agricole pour le pôle de production maraîchère et agrivoltaïque.

A l'issue de cette période, selon le contexte énergétique national et le choix du propriétaire, deux scénarios pourront être envisagés pour le parc solaire :

- soit un démantèlement des installations avec la remise en état du site, déjà prévu au titre de la promesse de bail ;
- soit un renouvellement du bail avec le remplacement des équipements qui le nécessitent (obsolescence, amélioration de la performance...).

Pour le calcul de l'empreinte carbone, c'est l'option conservatrice (la plus impactante) qui a été prise en compte, pour l'ensemble du projet, à savoir :

- une exploitation des installations se limitant à la durée du bail du parc photovoltaïque (absence de renouvellement),
- un démantèlement des installations à l'issue de cette exploitation (parc photovoltaïque et équipement photovoltaïque du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque).

En considérant 3 années consacrées à la construction et au démantèlement nécessaires pour le parc solaire, l'exploitation des installations est prévue sur 37 années. Dans un souci d'homogénéisation de l'approche de l'étude et en considérant les incertitudes des besoins agricoles dans 40 ans, cette hypothèse (37 ans d'exploitation) est étendue à l'ensemble du projet (pôle agricole compris).

Défrichement et reboisement

Concernant la partie défrichement et reboisement, non traitée dans ce rapport, les calculs de l'INRAE considèrent le déboisement des parcelles concernées par le projet, et donc l'absence de tout boisement sur les secteurs aménagés pendant 40 années (prise en compte de la période de travaux, de la période d'exploitation et de démantèlement), la conservation en

sylviculture des autres secteurs et la gestion des secteurs alloués uniquement pour la biodiversité. La coupe des boisements des parcelles à aménager et à gérer pour la biodiversité est donc considérée comme réalisée dans sa totalité dès le début du bail. Dans la réalité, les travaux de coupe commenceront au début du bail et seront réalisés progressivement. Pendant la durée d'exploitation, le carbone de la végétation de la strate herbacée présente sur le parc solaire est prise en compte, ainsi que le carbone du sol.

Bien que le reboisement du site à l'issue du démantèlement soit envisagé, que le démantèlement sera réalisé dans cette perspective, l'empreinte carbone du projet n'a pas pris en compte le reboisement (pins maritimes) des parcelles du site à l'issue du démantèlement, considérant qu'il dépend du choix du propriétaire.

2.4 Les scénarios de référence

Comme précisé au début du chapitre, les scénarios de référence ont été établis de façon à être représentatifs du marché moyen en France. Ces scénarios sont dimensionnés pour fournir les mêmes services que le projet HORIZEO.

Le projet HORIZEO s'étendrait des années 2020 aux années 2060. Les technologies représentatives du marché devraient évoluer sur cette période. La France s'est fixée un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 ; aussi, que cet objectif soit atteint ou non on peut raisonnablement considérer que les technologies futures émettront moins de carbone que les technologies actuelles. Il n'est cependant pas possible de prédire ces évolutions, et de quantifier l'évolution des émissions de carbone des technologies étudiées ici, dans le temps. Nous rappelons également que le projet HORIZEO s'intègre dans la réalisation de l'objectif de neutralité carbone de la France et donc dans la diminution de l'empreinte carbone du mix électrique français. En effet, l'objectif est de remplacer l'électricité d'origine fossile, qui constitue la part la plus carbonée du mix français.

D'autre part, le projet HORIZEO permettrait de répondre à la demande en électrification de différents usages. Selon les usages, l'électricité produite par le parc HORIZEO remplacerait un mix énergétique différent.

Pour ces raisons, nous avons choisi de comparer l'impact de l'électricité produite par le parc HORIZEO à différents points de comparaison permettant d'encadrer les différents usages et l'évolution temporelle.

La comparaison à ces points de référence permet d'apporter un regard critique sur les résultats de l'empreinte carbone du projet HORIZEO.

Ainsi, pour répondre à chaque problématique par composante, les scénarios de références suivants sont considérés :

1. **Parc photovoltaïque** : Le parc HORIZEO permet-il de réduire l'impact carbone de la production actuelle d'électricité française ?

Comparaison entre :

- la production d'électricité par le parc photovoltaïque d'HORIZEO sur 37 ans (35 491 GWh).



- la production de la même quantité d'électricité (35 491 GWh) par :
 - le mix électrique français actuel
 - un mix électrique prospectif à horizon 2030
 - un mix électrique prospectif à horizon 2050
 - un mix électrique 100 % fossile.

Cette production d'électricité annuelle représenterait 0,2 % de la consommation en 2022 d'électricité en France.

2. **Pôle de production maraîchère et agrivoltaïque** : La production d'aliments et d'électricité sur le pôle de production maraîchère et agrivoltaïque permettent-elles de réduire l'impact carbone de la consommation moyenne d'aliments en Gironde et d'électricité en France ?

Comparaison entre :

- la production maraîchère d'aliments (3253 t de fruits et légumes) et d'électricité (57 GWh) sur 37 ans
- la même quantité d'aliments issus du mix de consommation français (3253 t de fruits et légumes) et la même quantité d'électricité produite (57 GWh) par :
 - le mix électrique français actuel
 - un mix électrique prospectif à horizon 2030
 - un mix électrique prospectif à horizon 2050
 - un mix électrique 100 % fossile.



2.5 Synthèse des unités fonctionnelles et des flux de référence

Chaque scénario (HORIZEO et scénarios de référence) est découpé en unités fonctionnelles, en considérant les services rendus par l'exploitation de la plateforme HORIZEO. Ainsi, deux unités fonctionnelles sont définies, une pour chaque composante du projet (les valeurs retenues sont expliquées au chapitre 3) :

- Pour la **production d'électricité** (basée sur le service rendu par le parc photovoltaïque), l'unité fonctionnelle est « Mise à disposition sur le réseau national de 35 491 GWh d'électricité Haute Tension sur 37 ans » ;
- Pour **l'activité du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque**, l'unité fonctionnelle est : « Production de 3253 t de fruits et légumes et de 57 GWh d'électricité sur 37 ans » (types de fruits et légumes produits détaillés au chapitre 3.2.2).

Les parcelles de la plateforme HORIZEO conservées en sylviculture rendent également des services (stockage de carbone biogénique et production de bois).

Le carbone biogénique et les émissions de carbone associées à l'entretien de la végétation (fauche pour le parc solaire, débroussaillage et coupe des boisements pour les parcelles sylvicoles) sont traités dans le rapport de l'INRAE.

Ensuite, pour chaque unité fonctionnelle de chaque scénario, les flux de références sont déterminés. Les flux de références constituent la quantité de produit nécessaire pour remplir la fonction définie dans l'unité fonctionnelle (production de 35 491 GWh d'électricité, etc.).

Les unités fonctionnelles et les flux de références d'HORIZEO et des scénarios de référence sont synthétisés dans le tableau suivant.

Unité fonctionnelle	Flux de référence – HORIZEO	Flux de référence – scénarios de référence
Mise à disposition sur le réseau national de 35 491 GWh d'électricité haute tension (225 kV) sur 37 ans	35 491 GWh d'électricité haute tension produits par le parc photovoltaïque HORIZEO sur 37 ans et mis à disposition sur le réseau national.	35 491 GWh d'électricité haute tension produits par un des 4 mix électrique français (actuel, H2030, H2050 ou 100% fossile) sur 37 ans et mis à disposition sur le réseau national.
Production de 3253 t de fruits et légumes et de 57 GWh d'électricité sur 37 ans – <i>types de fruits et légumes produits détaillés au chapitre 3.2.2</i>	Production sur le pôle de production maraîchère et agrivoltaïque d'HORIZEO de 3253 t de fruits et légumes et de 57 GWh d'électricité par les panneaux solaires sur 37 ans.	Production de 3253 t de fruits et légumes du mix de consommation français et de 57 GWh d'électricité par un des 4 mix électrique français (actuel, H2030, H2050 ou 100% fossile) sur 37 ans.

Tableau 1 : Synthèse des unités fonctionnelles et flux de référence

3 Modélisation et inventaires

3.1 Sources des données et méthodologie

Bases de données

La modélisation et l'évaluation de l'empreinte carbone du cycle de vie des infrastructures du projet sont réalisées sur le logiciel Simapro 9.1.1.

Les données de premier plan permettent de dimensionner les systèmes modélisés. Ce sont des paramètres comme le type et le nombre de panneaux photovoltaïques, la quantité de matières dans les structures, la puissance des équipements... Elles correspondent :

- aux données primaires collectées auprès d'ENGIE et de NEOEN sur les caractéristiques des aménagements prévus sur la plateforme,
- si les données primaires ne sont pas accessibles, aux données secondaires les plus représentatives, issues des bases de données des Inventaires de Cycle de Vie (ICV) et de la littérature.

Les données d'arrière-plan permettent de préciser le modèle des systèmes sur le logiciel Simapro et de quantifier les flux de matières entre les systèmes et la biosphère comme par exemple la quantité des émissions de gaz à effet de serre due à la production de l'acier. Ces données sont issues des inventaires des bases de données ecoinvent 3.9.1 cut-off (et Agribalyse 3.0.1) pour les raisons suivantes :

- c'est une base de données fiable et reconnue internationalement pour la réalisation des Analyse de Cycle de Vie,
- dans le cadre d'HORIZEO, la base de données ecoinvent permet de couvrir l'ensemble des activités envisagées et assure une cohérence dans la modélisation de l'ensemble du projet,
- les données d'arrière-plan (c'est-à-dire les données utilisées pour le calcul des empreintes carbone des bases de données) sont explicitées dans la base de données ecoinvent assurant ainsi une transparence dans les hypothèses et les calculs de l'étude.

Toutefois, concernant la production d'énergie, les données de la Base Empreinte® (ADEME) sont plus récentes, présentent la meilleure représentativité géographique et font référence aux données de la Commission de Régulation de l'énergie (CRE, 2019). Ce sont donc les données de la Base Empreinte® qui ont été retenues pour les scénarios de référence.

On peut noter que la Base Empreinte® (ADEME) donne un mix de consommation électrique, qui inclut les imports-exports; le mix est donc un peu plus carboné que le mix de production électrique car les imports sont plus carbonés que les exports.

Méthode d'allocations

Pour l'allocation des impacts liés au traitement des déchets et aux matières recyclées, la méthode des stocks est appliquée. La fin de vie est prise en compte mais pas les bénéfices de la valorisation des matières en fin de vie.

Le principe appliqué avec la méthode des stocks consiste à considérer que la frontière entre les deux cycles de vie se situe au niveau du stock homogène de matière à recycler. Dans la

Figure 9 présentée ci-après, le premier cycle de vie mobilise de l'acier primaire pour la fabrication d'une voiture, le second utilisateur mobilise de l'acier en partie recyclée pour armer du béton. En considérant la frontière au niveau du stock de matière homogène, le premier utilisateur de matière se voit attribuer les impacts des premières étapes de recyclage (broyage, tri, éventuellement lavage selon les cas). Le second utilisateur se voit attribuer les étapes suivantes du recyclage, ici la fonte de l'acier dans une aciérie électrique.

Dans cette configuration, l'utilisateur de matière secondaire est avantagé car seuls les impacts de l'action de recyclage à partir d'un stock de matière triée lui sont attribués. L'impact de la matière en elle-même est virtuellement nul. Les impacts de production de la matière première depuis l'extraction dans l'environnement sont intégralement attribués au premier utilisateur.

Ce choix méthodologique a une influence sur les résultats car :

- l'impact de la matière recyclée en entrée seraient plus « coûteuse » en émissions des gaz à effet de serre
- mais a contrario, l'impact de la matière vierge en entrée serait moins « coûteuse » si celle-ci est recyclée en fin de vie.

Concrètement, les systèmes étudiés bénéficient d'un meilleur score environnemental quand les matières premières utilisées sont recyclées ou réutilisées mais pas quand ils sont eux-mêmes recyclés en fin de vie.

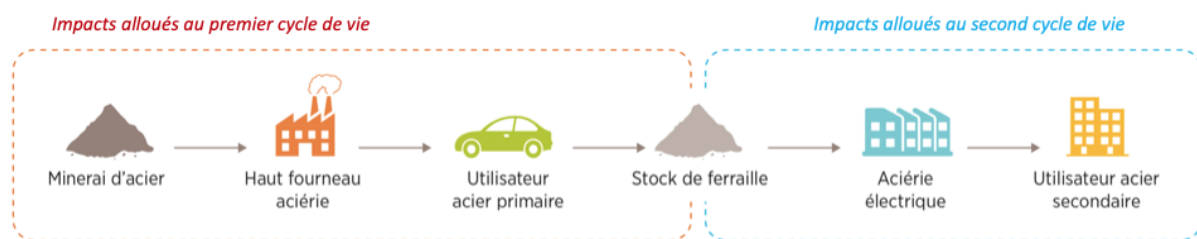


Figure 1 : Méthode des stocks

3.2 Inventaires

3.2.1 Production d'électricité

Dans cette partie, sont explicités les hypothèses et les inventaires de la première composante du projet HORIZEO (le parc photovoltaïque) et des scénarios de référence pour répondre à l'unité fonctionnelle :

**« Mise à disposition sur le réseau national de 35 491 GWh
d'électricité haute tension (225 kV) sur 37 ans »**

Le parc HORIZEO s'inscrit dans la direction de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte promulguée en 2015 : atteindre 40 % de la production d'électricité d'origine renouvelable en 2030 (Ministère de la Transition Écologique, 2021). En 2020, 27 % de la consommation d'électricité en France métropolitaine provenait d'énergie renouvelable (RTE, 2021).

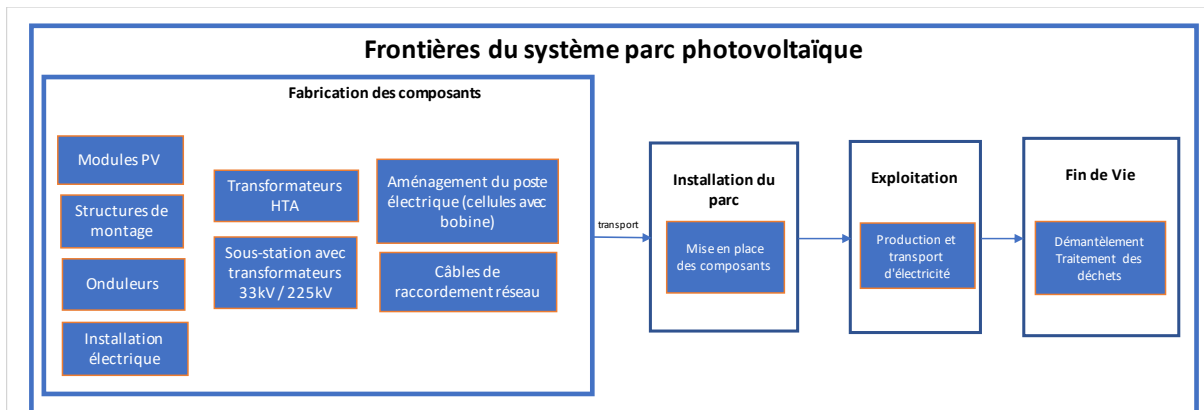
3.2.1.1 HORIZEO - Production de 35 491 GWh d'électricité sur 37 ans

Le **parc photovoltaïque HORIZEO** est caractérisé par une puissance crête de 818,2 MWc avec 498,6 MWc sur la partie d'ENGIE et 319,7 MWc sur la partie de NEOEN. Il est construit sur une surface d'environ 688 ha.

Les différents composants du parc sont :

- 1 333 107 panneaux d'une puissance unitaire de 615 Wc (en prenant en compte 0,2 % de taux de casse des modules à l'installation et à l'exploitation du parc),
- 20 000 tonnes d'acier pour les structures sur lesquelles les panneaux sont installés (15 kg par module installé),
- 28 600 km de câbles (Haute Tension A et Direct Current Power Supply) dans le parc,
- 96 onduleurs de 4,4 MW et 4200 kg et 150 onduleurs de 2 MW,
- 48 transformateurs HTA de 9 MW et de 13 t et 75 transformateurs de 4 MW,
- 2 sous-stations avec chacune 4 transformateurs : 4 transformateurs de 120 MW et 720 t et 4 transformateurs de 100 MW,
- environ 6000 m³ de béton dans le parc pour l'ancrage des poteaux de clôture et le soubassement des postes de transformation et des sous-stations,
- 12 km de 2 x 3 câbles pour le raccordement réseau entre le parc et les postes électriques (moyenne sur les linéaires minimal et maximal établis),
- 3 cellules (avec chacune une bobine, des disjoncteurs, transformateurs de tension et de courant) pour aménager les postes électriques de raccordement.

Les frontières du système du parc photovoltaïque HORIZEO sont présentées en Figure 2 :



Activités non prises en compte dans les frontières du système :

Fabrication : emballage des câbles et des transformateurs

Installation : gestion des déchets du chantier

Exploitation : transport pour la maintenance du système, fauche prise en compte dans le bilan de l'INRAE

Fin de vie : traitement de fin de vie des équipements autres que les panneaux

Figure 2 : Frontière du système du parc photovoltaïque

Les caractéristiques du parc ont été spécifiées par ENGIE et NEOEN.

Certaines activités (emballage des câbles et transformateurs, gestion des déchets du chantier, transport des opérateurs pour la maintenance du parc et traitement en fin de vie des autres équipements du parc – hors panneaux photovoltaïques) ont été exclues du système car présentant un impact négligeable.

Les fournisseurs de panneaux photovoltaïques ne sont pas encore définis. Cependant, ENGIE et NEOEN visent des panneaux types correspondants aux caractéristiques suivantes :

- Des modules monocristallins bifaciaux à base de silicium de la nouvelle technologie TOPCON
- Des cellules de dimensions 182 mm x 210 mm soit d'une surface de cellules de 2,52 m² et de surface cadrée de 2,7 m²
- L'utilisation en partie de polysilicium recyclé (chutes de polysilicium vierge remis en production),
- Une puissance crête de 615 Wc par panneau,

Le module Tiger Neo (66HL4M-BDV 600-625 Watt) produit par l'entreprise Jinko Solar est représentatif de ce type de module.

L'empreinte carbone des modules est un paramètre critique pour cette étude dans le sens où les résultats sont liés au premier ordre à cette donnée qui varie selon les fournisseurs.

L'empreinte carbone retenue pour la modélisation de la fabrication des panneaux (de l'extraction des matières premières à la sortie de l'usine) est issue de l'Évaluation Carbone simplifiée ECS PPE2 N°029-2023_002 transmise par NEOEN, la valeur est 427,402 kg CO₂ éq. / kWc. Cette donnée a été certifiée par Certisolis. La méthode de calcul suivie est la méthode PPE2 avec ACV. La justification de cette valeur est détaillée dans l'*Annexe A - Empreinte carbone de la fabrication des panneaux*.

La masse des cadres en aluminium a été fournie par ENGIE à 4 kg par module selon les dimensions du panneau photovoltaïque Tiger Neo de Jinko Solar.

La modélisation des autres éléments du parc (onduleurs, transformateurs, câbles...) utilise en majorité des données génériques d'ecoinvent v3.9.1 cut-off.

Concernant les pays d'approvisionnement en matériel, si la grande majorité des modules photovoltaïques est actuellement fabriquée en Asie (notamment en Chine où la production s'est massivement développée ces dix dernières années), l'option de s'approvisionner également auprès de fabricants de modules européens est envisagée. Elle dépendra cependant des capacités de production ainsi que des prix. Les structures en acier sont généralement fabriquées en Europe, ainsi que les câbles, les transformateurs et les onduleurs. En fonction de l'évolution du marché d'ici la construction du parc photovoltaïque, certains produits pourraient également provenir d'autres régions du monde.

Aussi, pour le calcul de l'empreinte carbone, les panneaux photovoltaïques, onduleurs et transformateurs ont été considérés comme provenant de Chine, de façon conservatrice.

Il existe des projets d'usines de panneaux photovoltaïque français. Afin d'estimer le potentiel gain d'impact de l'usage de panneaux produits en France, une analyse de sensibilité a été réalisée avec la donnée de l'entreprise Carbon transmise par NEOEN : 360 kgCO₂eq / kWc.

Pour la partie raccordement réseau, les hypothèses de modélisation ont été établies avec RTE en collaboration avec ENGIE et NEOEN, notamment pour le calcul des pertes sur le transport d'électricité.

Les sources et justifications des valeurs ainsi que les données utilisées pour la modélisation du système dans son ensemble sont détaillées dans les inventaires ci-après.

Dans les trois premiers tableaux, les procédés ACV utilisés pour la modélisation de la fabrication des différents composants du système y sont explicités :

Inventaire pour la fabrication des modules	Unité	Quantité	Inventaire - ecoinvent v3.9.1 cut-off	Commentaire
Flux de référence				
Fabrication des 1 333 107 modules photovoltaïques		1		Le parc compte 1 330 446 modules de 615 Wc. Nb modules produits au total pour le parc * 1,002 = 1 333 107 modules pour prendre en compte du taux de casses à l'installation et à l'exploitation de 0,2 %.
Intrants				
Aluminium pour le cadre des panneaux	kg	5,33E+06	Aluminium, wrought alloy {GLO} market for aluminium, wrought alloy Cut-off, U	Source : Engie. 4 kg d'aluminium pour le cadre par module (cadre non pris en compte dans la donnée Certisolis).
Mise en forme de l'aluminium	kg	5,33E+06	Section bar extrusion, aluminium {RER} section bar extrusion, aluminium Cut-off, U	Masse totale aluminium = 4 kg x 1 333 107 modules.
Polypropylène pour la boîte de jonction	kg	6,63E+05	Polypropylene, granulate {RoW} polypropylene production, granulate Cut-off, U	Source : Miquel, 2019. Extrapolation de données pour un panneau de 7,6 m2 par ratio de surface (boîte de jonction non pris en compte dans la donnée Certisolis).
Mise en forme du polypropylène	kg	6,63E+05	Injection moulding {RoW} injection moulding Cut-off, U	Masse totale PP = 1,4 kg x (2,54 m2 / 7,6 m2) x 1 333 107 modules
Silicone pour la boîte de jonction	kg	4,26E+05	Silicone product {RoW} silicone product production Cut-off, U	(surface cadrée des modules : 2,70 m2)
Transport amont des modules en bateau	tkm	1,06E+09	Transport, freight, sea, container ship {GLO} market for transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	Provenance des modules : Chine (source : Certisolis) Distance 1 en camion : Xianyang, Chine - Jiaxing, Chine = 1400 km ; Distance 2 en bateau : Xianyang, Chine - Port Bordeaux-Verdon = 11600 nautiques (1 nautique = 1,852 km) ;
Transport amont des modules en camion	tkm	7,60E+07	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Distance 3 en camion : Port Bordeaux-Verdon - Saucats = 135 km Masse totale transportée (avec emballage) = 4,95 E+07 kg
Emballage en plastique	kg	7,13E+05	Polyethylene, linear low density, granulate {GLO} market for polyethylene, linear low density, granulate Cut-off, U	Calcul d'un emballage moyen en plastique pour un panneau cadré de 2,70 m2 (source : fiche technique Jinko Solar)
Palette en bois	p	3,70E+04	EUR-flat pallet {RER} market for EUR-flat pallet Cut-off, U	36 modules par palette (source : fiche technique des modules)
Utilisation de containers	kg*day	1,61E+09	Operation, intermodal shipping container {GLO} operation, intermodal shipping container, 40-foot, high-cube Cut-off, U	Hypothèse sur le nombre de jours de transport en container : 32 jours avec une vitesse moyenne à 15 nœuds (ports.com).
Sortants				
Emissions de CO2eq à la fabrication des modules photovoltaïques	kg	4,21E+08	Carbon dioxide, fossil	Source : ECS PPE2 N°029-2023_002 - voir justification en annexe A Emissions à la fabrication des panneaux : 427,402 kg CO2 eq / kWc

Tableau 2 : Inventaire de production de 1 333 107 panneaux photovoltaïques avec cadre en aluminium

Inventaire pour la fabrication des autres composants hors raccordement réseau	Unité	Quantité	Inventaire - ecoinvent v3.9.1 cut-off	Commentaire
Flux de référence				
Fabrication des autres composants du parc photovoltaïque		1		Structures de montage des panneaux, 96+150 onduleurs, installation électrique du parc, 48+75 transformateurs HTA, 2 sous-stations avec chacune 4 transformateurs.
Intrants				
Matière des structures de montage des panneaux en acier	kg	2,00E+07	Steel, low-alloyed {Europe without Switzerland and Austria} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U	Source : Engie. Masse unitaire : 15 kg d'acier par module de 2,70 m2. Masse totale acier = 15 kg x 1330446 modules
Mise en forme des structures de montage	kg	2,00E+07	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} metal working, average for steel product manufacturing Cut-off, U	
Transport amont des structures de montage en camion	tkm	3,99E+07	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Provenance des structures de montage : Europe (source : Engie). Distance moyenne en camion : Europe - Saucats = 2000 km
Onduleurs de 500 kW	p	2,30E+02	Inverter, 500kW {GLO} market for inverter, 500kW Cut-off, U	96 onduleurs de 4,4 MW + 150 onduleurs de 2 MW. Les 246 onduleurs sont équivalents à 164 onduleurs de 4,4 MW et 4200 kg/onduleur sur l'ensemble du parc (source : Engie). Donnée de la base ecoinvent la plus proche en terme de puissance (500 kW pour 3000 kg). D'après Engie et Neoen, la donnée utilisée correspond à une technologie plus ancienne, des meilleures performances sont aujourd'hui accessibles. Un rapport de masse a été appliqué sur le nombre d'onduleurs pour extrapoler la donnée ecoinvent de 3000 kg à 4200 kg.
Transport amont des onduleurs en bateau	tkm	1,48E+07	Transport, freight, sea, container ship {GLO} market for transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	Provenance des onduleurs : Chine - cas le plus défavorable (source : Engie & Neoen). Distance en bateau : Chine - Bordeaux = 11600 nautiques (1 nautique = 1,852 km)
Transport amont des onduleurs en camion	tkm	1,47E+06	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Provenance des onduleurs : Chine (source : Engie & Neoen). Distance en camion considérée : En Chine : 2000 km (moyenne) Bordeaux (le Verdon) - Saucats = 135 km
Câbles en aluminium 1	m	1,17E+05	Aluminium around steel bi-metal stranded cable, 3x3.67mm external diameter wire {RoW} aluminium around steel bi-metal stranded cable production, 3x3.67mm external diameter wire Cut-off, U	Source : Engie. 4000 kg/km de câble HTA aluminium 3x240 mm2 avec 0,03 km/MWc. Rapport de diamètre utilisé pour extrapoler la donnée ecoinvent.
Câbles en aluminium 2	m	3,25E+07	Aluminium around steel bi-metal wire, 3.67mm external diameter {RoW} aluminium around steel bi-metal wire production, 3.67 mm external diameter Cut-off, U	Source : Engie. 3000 kg/km de câble HTA aluminium 1x630 mm2 avec 0,24 km/MWc. 1160 kg/km de câble HTA aluminium 1x300 mm2 avec 2,57 km/MWc. 76 kg/km de câble HTA aluminium 1x6 mm2 avec 32,1 km/MWc. Rapport de diamètre utilisé pour extrapoler la donnée ecoinvent.
Transport amont des câbles en camion	tkm	1,02E+07	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Provenance des câbles : Europe (source : Engie & Neoen). Distance moyenne en camion : Europe - Saucats = 2000 km. Masse totale transportée : 5,12E+06 kg.
Transformateurs HTA	kg	1,06E+06	Transformer, high voltage use {GLO} market for transformer, high voltage use Cut-off, U	48 transformateurs de 9 MW + 75 transformateurs de 4 MW. Les 123 transformateurs sont équivalents à 81 transformateurs de 9 MW et 13 t/transformateur (source : Engie). Transport amont compris dans la donnée.
Transformateurs des sous-stations	kg	5,28E+06	Transformer, high voltage use {GLO} market for transformer, high voltage use Cut-off, U	4 transformateurs de 120 MW et 720 t + 4 transformateurs de 100 MW et 600 t. Source : Engie & Neoen. Transport amont compris dans la donnée.

Tableau 3 : Inventaire de production des autres composants du parc photovoltaïque : 96+150 onduleurs, 28 600 km de câble électrique, 48+75 transformateurs HTA et 2 sous-stations

Inventaire pour la fabrication des composants du raccordement réseau	Unité	Quantité	Inventaire - ecoinvent v3.9.1 cut-off	Commentaire
Flux de référence				
Fabrication des composants du raccordement réseau		1		12 km tracé pour le raccordement réseau entre le parc et les postes électriques avec 2x3 câbles. 3 cellules avec chacune une bobine, des disjoncteurs, transformateurs de tension et de courant... pour aménager les postes électriques de raccordement.
Intrants				
Cuivre pour la fabrication des câbles pour le raccordement réseau	kg	1,66E+06	Copper cake {GLO} market for copper cake Cut-off, U	Source : RTE. 23 t de cuivre / km de raccordement pour 1 câble de 2500 mm2.
Mise en forme du cuivre pour la fabrication des câbles pour le raccordement réseau	kg	1,66E+06	Sheet rolling, copper {RER} sheet rolling, copper Cut-off, U	
Aluminium pour la fabrication des câbles pour le raccordement réseau	kg	9,07E+04	Aluminium, wrought alloy {GLO} market for aluminium, wrought alloy Cut-off, U	Calcul de masse réalisé avec des données RTE : écran d'aluminium de 1,2 mm d'épaisseur et de 125 mm de diamètre (moyennes pour 1 câble de 2500 mm2) et masse volumique de l'aluminium à 2700 kg / m3.
Mise en forme de l'aluminium pour la fabrication des câbles pour le raccordement réseau	kg	9,07E+04	Sheet rolling, aluminium {RER} sheet rolling, aluminium Cut-off, U	
Polyéthylène pour la fabrication des câbles pour le raccordement réseau	kg	7,01E+05	Polyethylene, linear low density, granulate {GLO} market for polyethylene, linear low density, granulate Cut-off, U	Source : RTE. 9,74 t de polyéthylène / km de raccordement pour 1 câble de 2500 mm2.
Mise en forme du polyéthylène pour la fabrication des câbles pour le raccordement réseau	kg	7,01E+05	Injection moulding {RoW} injection moulding Cut-off, U	
Transport amont des câbles pour le raccordement réseau en camion	tkm	2,78E+06	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Provenance des câbles : Portugal, île de France et Belgique (source : RTE). Hypothèse qu'un tiers des câbles proviennent de chacun des lieux. Distance moyenne en camion jusqu'à Saucats = 1500 km, 650 km et 900 km respectivement.. Masse totale transportée : 2,74E+03 kg.

Tableau 4 : Inventaire de production de 12 km de raccordement réseau des composants du raccordement réseau (1/2)

Inventaire pour la fabrication des composants du raccordement réseau	Unité	Quantité	Inventaire - ecoinvent v3.9.1 cut-off	Commentaire
Acier pour la fabrication du poste électrique du raccordement réseau	kg	4,20E+04	Steel, low-alloyed {Europe without Switzerland and Austria} steel production, electric, low-alloyed Cut-off, U	Source : RTE. 14 t d'acier issue de la BOM d'une bobine.
Mise en forme de l'acier pour la fabrication du poste électrique du raccordement réseau	kg	4,20E+04	Metal working, average for steel product manufacturing {RER} metal working, average for steel product manufacturing Cut-off, U	
Cuivre pour la fabrication du poste électrique du raccordement réseau	kg	4,26E+04	Copper cake {GLO} market for copper cake Cut-off, U	Source : RTE. 14,19 t de cuivre issue de la BOM d'une bobine.
Mise en forme du cuivre pour la fabrication du poste électrique du raccordement réseau	kg	4,26E+04	Metal working, average for copper product manufacturing {RER} metal working, average for copper product manufacturing Cut-off, U	
Papier pour la fabrication du poste électrique du raccordement réseau	kg	1,35E+03	Paper, woodcontaining, lightweight coated {RER} market for paper, woodcontaining, lightweight coated Cut-off, U	Source : RTE. 450 kg de papier issue de la BOM d'une bobine.
Fer pour la fabrication du poste électrique du raccordement réseau	kg	8,25E+04	Pig iron {RER} market for pig iron Cut-off, U	Source : RTE. 27,5 t de fer issue de la BOM d'une bobine.
Mise en forme du fer pour la fabrication du poste électrique du raccordement réseau	kg	8,25E+04	Metal working, average for metal product manufacturing {RER} metal working, average for metal product manufacturing Cut-off, U	
Huile pour la fabrication du poste électrique du raccordement réseau	kg	9,15E+04	Base oil {GLO} market for base oil Cut-off, U	Source : RTE. 30,5 t d'huile minérale (pétrole) issue de la BOM d'une bobine.
Sortants				
Emissions de CO2eq à l'aménagement du poste électrique pour le raccordement réseau	kg	2,50E+05	Carbon dioxide, fossil	Source : étude interne RTE. Valeur comprenant la fabrication des éléments des 3 cellules : disjoncteur, sectionneur, transformateur de tension, de courant, colonne isolante, charpente support, parafoudre, portique, chaîne d'isolateur et la démolition et la création de pistes lourdes.

Tableau 5 : Inventaire de production de 12 km de raccordement réseau des composants du raccordement réseau (2/2)

Les procédés utilisés pour la modélisation de l'installation du parc et du raccordement réseau sont explicités dans le tableau ci-dessous :

Inventaire pour l'installation du parc	Unité	Quantité	Inventaire - ecoinvent v3.9.1 cut-off	Commentaire
Flux de référence				
Installation du parc sur 40 ans	p	1		
Intrants				
Béton	m3	5924	Concrete, 40MPa {RoW} concrete production, 40MPa, for civil engineering, with cement, Portland Cut-off, U	Source : Engie & Neoen. Comprend l'ancrage des poteaux de cloture, les soubassements des postes de transformation et des sous-stations.
Transport amont du béton en camion	tkm	6,63E+06	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Provenance du béton : France (hypothèse Gingko 21). Distance moyenne en camion : France - Saucats = 500 km
Diesel consommé par les engins de chantier	MJ	9,23E+07	Diesel, burned in building machine {GLO} diesel, burned in building machine Cut-off, U	Hypothèse de 70 000 L de diesel consommée pour un parc de 25 MWc (source : Engie), extrapolé au 818 MWc puis converti en MJ avec 40,3 MJ / L de diesel.
Electricité consommée à l'installation du parc	kWh	5,17E+04	Electricity, medium voltage {FR} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	Extrapolation des valeurs de la donnée "photovoltaic plant construction" d'ecoinvent v3.9.1 cut-off
Sortants				
Emissions de CO2eq à l'installation des câbles du raccordement réseau	kg	1,20E+06	Carbon dioxide, fossil	Source : étude interne RTE. Valeur comprenant la consommation des engins, la fourniture des fourreaux en PHD (pas de béton), les ouvrages spéciaux...

Tableau 6 : Inventaire de l'installation du parc photovoltaïque et du raccordement réseau

Concernant l'exploitation du parc, les composants du système sont supposés avoir une durée de vie non limitante sur la durée de l'exploitation. Cependant, une dégradation de la performance des panneaux photovoltaïques est prise en compte dans le calcul de la production d'énergie.

Pour ce calcul, les hypothèses considérées en collaboration avec ENGIE, NEOEN et RTE sont :

- capacité de production initiale du parc sur l'année 1 : 1279 kWh / kWc soit 1045 GWh pour l'ensemble du parc de 818,2 MWc (pertes internes au parc prises en compte). La perte de puissance du module Tiger Neo de Jinko Solar est égale à 1 % la première année.
- un taux de dégradation de productivité des panneaux, donné par ENGIE, entre 0,4 et 0,5 % / an entre la deuxième et trentième année. La fiche technique du panneau type TOPCON, Tiger Neo de Jinko Solar, affiche une garantie de 12 ans ainsi qu'une garantie de puissance linéaire de 30 ans. La perte de puissance annoncée est égale à 0,4 % entre la 2^{ème} et 30^{ème} année.
- Entre la 30^{ème} et 37^{ème} année, il a été considéré une perte de productivité plus importante allant jusqu'à 1,3 % / an.
- Nota : on rappelle qu'un taux de remplacement de 0,2 % a été retenu pour prendre en compte le remplacement de panneaux cassés ou défectueux.
- 0,11 % de pertes dues au raccordement réseau (soit 1,152 GWh sur l'année 1)

L'électricité ainsi délivrée par le parc sur le réseau est de **35 491 GWh** sur les 37 ans de réelle exploitation. La production d'électricité ramenée à une production annuelle représenterait 0,2% de la consommation actuelle d'électricité en France (en 2022).

Concernant la modélisation de la fin de vie des panneaux photovoltaïques, l'entreprise SOREN a transmis les hypothèses suivantes :

- 85 % de la masse des matériaux des panneaux est recyclé (non modélisé car hors des frontières du système du fait de la méthode cut-off appliquée),
- 8 % est incinéré avec récupération d'énergie (récupération d'énergie non modélisée car hors des frontières du système),
- 7 % est incinéré sans récupération d'énergie.

Inventaire pour la fin de vie du parc	Unité	Quantité	Inventaire - ecoinvent v3.9.1 cut-off	Commentaire
Flux de référence				
Démantèlement et traitement de fin de vie des composants du parc	p	1		
Intrants				
Diesel consommé par les engins de chantier	MJ	9,23E+07	Diesel, burned in building machine {GLO} diesel, burned in building machine Cut-off, U	Hypothèse d'une consommation de diesel au démantèlement identique à celle à l'installation du parc.
Electricité consommée au démantèlement du parc	kWh	5,17E+04	Electricity, medium voltage {FR} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	Hypothèse d'une consommation d'électricité identique au démantèlement qu'à l'installation du parc.
Transport des panneaux au centre de traitement	tkm	1,84E+06	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	En camion Centre de traitement à Saint Loubès (33) - distance Saucats Saint Loubès env. 42 km
Incinération avec récupération d'énergie de 8 % de la masse des panneaux	kg	3,50E+06	Municipal solid waste {FR} treatment of municipal solid waste, incineration Cut-off, U	Source : Responsable technique de PVcycle Traitement de fin de vie des panneaux : - recyclage à 85 % (non modélisé)
Incinération sans récupération d'énergie de 7 % de la masse des panneaux	kg	3,06E+06	Municipal solid waste {FR} treatment of municipal solid waste, incineration Cut-off, U	- incinération avec récupération d'énergie à 8 % - incinération sans récupération d'énergie à 7 %

Tableau 7 : Inventaire de fin de vie des modules du parc

3.2.1.2 Références - Production de 35 491 GWh d'électricité sur 37 ans

Les scénarios de référence permettant la comparaison est la production de la même quantité d'électricité annuellement par différents mix électriques tels que présentés au chapitre 2.4 :

1. le mix électrique français actuel
2. un mix électrique prospectif à horizon 2030
3. un mix électrique prospectif à horizon 2050
4. un mix électrique 100 % fossile.

Référence 1 : Mix électrique français actuel

Le mix électrique français actuel est modélisé par la donnée « Electricité/2022 – mix moyen/consommation » de la Base Empreinte de l'ADEME. Elle affiche une empreinte carbone de 52 gCO₂eq / kWh. C'est une donnée récente se basant sur des données d'arrière-plan de l'ADEME. Le mix électrique provient de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie), il n'est cependant pas précisé dans la documentation de la base de données.

Afin d'illustrer la composition de ce mix électrique, la figure ci-dessous reprend la composition du mix électrique donné par le rapport RTE « Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France, édition 2021 » et correspondent à la production française d'électricité en 2019. Il est à noter que les diagrammes représentent le mix électrique de la production française et non les puissances installées.

Les empreintes carbone de chaque source d'énergie par kWh produit sont précisées sur le graphe en gCO₂eq. selon les deux sources : la base Ecoinvent 3.6 (texte en vert) et la Base Empreinte (texte en bleu), lorsque les valeurs diffèrent.

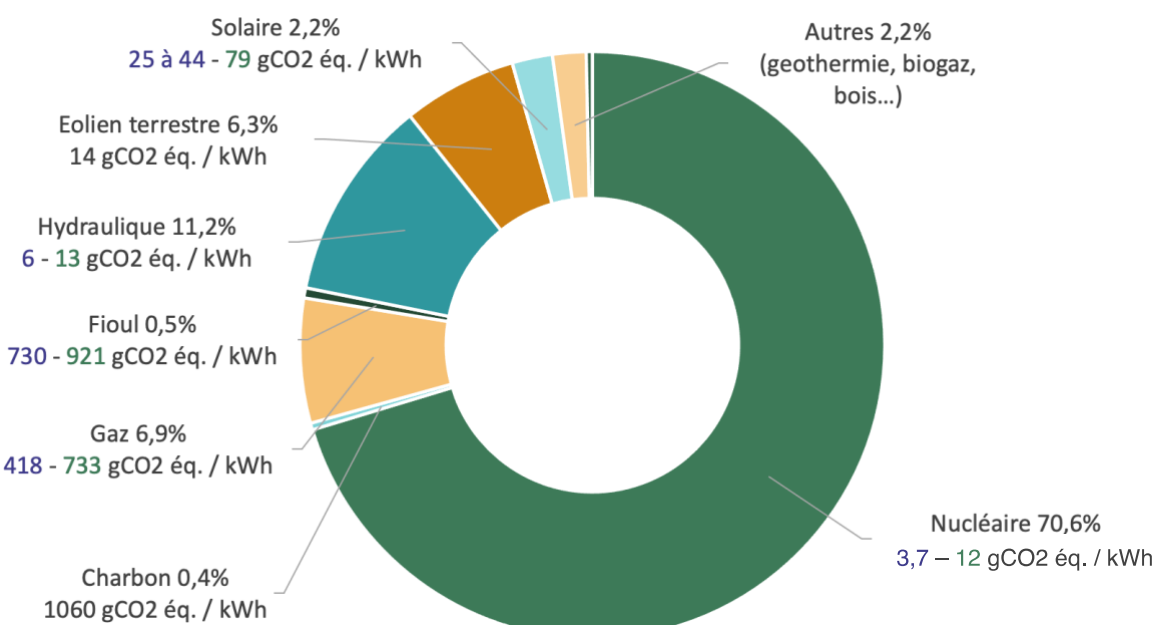


Figure 3 : Répartition du mix de la production électrique française de 2019 (RTE, 2021) et les empreintes carbone associées (Ecoinvent v3.6 cut-off en vert et Base Empreinte en bleu)

Référence 2 : Mix électrique français prospectif à horizon 2030

Une première projection du mix électrique français a été réalisée à horizon 2030. Cette projection correspond à l'atteinte des objectifs de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) dans le cadre de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). La répartition énergétique à cet horizon est illustrée dans la figure ci-dessous. Les prévisions anticipent le non-recours au fioul et au charbon dans la production d'énergie électrique.

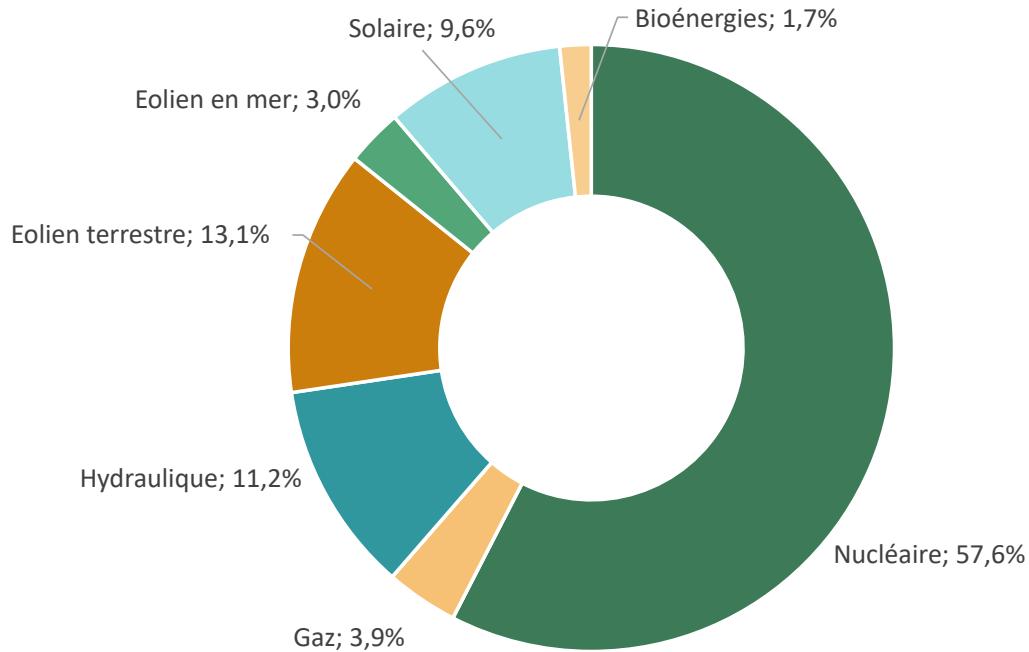


Figure 4 : Répartition du mix de la production électrique française en 2030 (RTE, 2021)

Référence 3 : Mix électrique français prospectif à horizon 2050

Une deuxième projection du mix électrique français a été réalisée à horizon 2050. Parmi les 6 scénarios prospectifs proposés par RTE, le scénario N1¹ a été choisi. En effet, la France a programmé la construction de plusieurs EPR 2 et ce scénario est le seul à répondre au nombre de réacteurs annoncés par l'Etat au moment de la rédaction du présent rapport (3 à 4 paires d'EPR2). La répartition énergétique à cet horizon est détaillée dans le Tableau 8.

Référence 4 : Mix électrique français 100 % fossile

Le dernier point de comparaison est un mix électrique basé sur des énergies fossiles. En effet, le premier objectif du développement des énergies renouvelables est de se substituer aux énergies fossiles. Ce mix d'énergies est basé sur la part des énergies fossiles dans le mix électrique actuel, les mix sont détaillés dans le Tableau 8.

¹ <https://rte-futursenergetiques2050.com/scenarios/n1>

	RTE 2019	Base Empreinte (ADEME) 2022	RTE 2030	RTE 2050 N1	100% fossile
Solaire	2,2%	-	9,56%	22,0%	0%
Eolien terrestre	6,3%	-	13,09%	17,0%	0%
Eolien en mer	0,0%	-	3,02%	24,0%	0%
Nucléaire	70,5%	-	57,55%	26,0%	0%
Hydraulique	11,1%	-	11,24%	9,0%	0%
Bioénergie	2,2%	-	1,68%	2,0%	0%
Charbon	0,4%	-	0%	0%	5,4%
Gaz	6,8%	-	3,86%	0%	86,5%
Fioul	0,5%	-	0%	0%	8,1%
Facteur d'émission en gCO2eq / kWh	-	52	26	18	478

Tableau 8 : Mix énergétiques des scénarios de référence pour la production d'électricité

3.2.2 Pôle de production maraîchère et agrivoltaïque

Dans cette partie, sont explicités les hypothèses et les inventaires du scénario HORIZEO et du scénario de référence pour répondre à l'unité fonctionnelle :

**« Production de 3253 t de fruits et légumes et de 57 GWh d'électricité
sur 37 ans d'exploitation »**

A ce stade, une superficie de 5 ha de cultures est envisagée (sur une parcelle d'environ 8 ha).

Dans le cadre de la modélisation, 5 ha ont été considérés cultivés, et associés à une production d'énergie photovoltaïque. L'objectif de cette zone de production est double :

- produire des fruits et des légumes pour approvisionner des circuits d'alimentation locaux et,
- expérimenter différentes techniques de culture agrivoltaïque.

ENGIE souhaite diviser l'exploitation en 4 ilots de culture. La répartition de la surface par ilot est la suivante :

- des cultures sous panneaux photovoltaïques orientables (agrivoltaïsme dynamique aussi nommé AVD) :
 - o un verger (kiwis) de 0,7 ha,
 - o des vignes sur 0,7 ha,
- une culture de fruits rouges (groseilles, framboises, cassis) sous ombrières photovoltaïques fixes (panneaux non orientables) de 0,82 ha.
- une culture maraichère sous serre non chauffée de type « tunnel bâché » de 0,21 ha,
- une culture maraichère en rang, comprenant de la culture maraichère de 2,5 ha,

L'exploitation inclut également deux bâtiments de stockage de 426 m² de surface totale, modélisés par le jeu de données « Building, hall, steel construction {GLO} » de la base ecoinvent. La consommation des bâtiments est supposée négligeable comme pour le scénario de référence.

Ilot	Culture	Surface (ha)	Rendement annuel (t/ha/an)	Production annuelle (t/an)
Verger	Kiwi	0,7	30	21,0
Vignes	Raisin de table	0,7	25	17,5
Serres souples	Maraichage diversifié (moyen)	0,2	18	3,7
Cultures en rang	Maraichage diversifié (moyen)	2,5	15	37,5
Ombrières	Fruits rouges*	0,8	10	8,2
Total		4,9	-	87,9

Tableau 10 : Culture par ilot du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque avec rendement et surface associés

D'après ENGIE, les rendements de production agricole ne seront pas affectés par les panneaux. Le décret relatif à l'agrivoltaïsme² impose un maintien de rendement d'au moins 90 % par rapport à la même culture sans panneaux. Le dispositif photovoltaïque installé est adapté à la culture. Dans le projet d'HORIZEO :

- pour les petits fruits, ce sont des panneaux semi-transparents dont le taux de cellule/verre est choisi pour ces variétés,
- pour les cultures kiwi/vignes ce sont des trackers pilotés en fonction du besoin des plantes, c'est ce qu'on appelle le taux d'effacement.

Il est possible que les panneaux ne soient pas installés dans leur configuration optimale. L'utilisation de technologies autres (trackers, modules bifaciaux) pourrait permettre de compenser cette baisse de productivité énergétique.

Pour la modélisation des panneaux, les mêmes hypothèses de modélisation sur la productivité, les pertes, les équipements... par kWc que pour le parc solaire sont appliquées. L'inventaire « **Production énergie parc photovoltaïque HORIZEO** » issu des inventaires du chapitre 3.2.1 est utilisé pour modéliser cette production d'énergie. La puissance crête totale étant de 1,3 MWc, la parcelle produit 1,55 GWh sur 1 an d'exploitation, en considérant le même productible par mètre carré de panneau que pour le parc photovoltaïque. Cette approximation n'est pas significative pour le bilan carbone d'HORIZEO car l'impact des panneaux du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque ne représentent que moins d'1 % du bilan total du projet HORIZEO.

La modélisation sur la partie agricole représente une exploitation cultivée de manière conventionnelle. L'exploitation des parcelles agricoles est modélisée sur une durée de 37 ans pour la production effective, même si cette activité conçue pour l'approvisionnement local devrait perdurer dans le temps.

² Décret n° 2024-318 du 8 avril 2024 relatif au développement de l'agrivoltaïsme et aux conditions d'implantation des installations photovoltaïques sur des terrains agricoles, naturels ou forestiers

Les inventaires de production choisis pour la modélisation sont basés sur les mixes de consommation de la base de données Agribalyse 3.0.1 et sur la base de données ecoinvent v3.9.1 cut-off. Les données Agribalyse 3.0.1 utilisent en données d'arrière-plan des données ecoinvent v3.9.1 cut-off.

Toutefois, les *mixes de consommation* n'ont pas été utilisés tels quels car ils représentent la consommation française et non la production française de fruits et légumes. Le « kiwi, consommation mix » par exemple, comprend une part de production de kiwi français et une part de kiwi produits en Italie et en Nouvelle Zélande et transportés jusqu'en France. Seules les données d'arrière-plan correspondant à la production française ont été conservées.

Nous avons sélectionné les inventaires Agribalyse 3.0.1 et ecoinvent v3.9.1 cut-off selon leur localisation géographique, par ordre de priorité : France {FR} (1), Europe (excl. Suisse) ou Europe {RER} (2), Reste du Monde {RoW} ou Mondial {GLO} (3). Les inventaires de production ont été sélectionnés plutôt que ceux de marché pour ne pas inclure de transports en excès.

Les cultures maraichères choisies représentent une moyenne des fruits et légumes traditionnellement cultivés en maraichage. Les rendements totaux sont répartis équitablement entre les différentes cultures (15 tonnes/ha pour les cultures en rang, 18 tonnes/ha pour les cultures sous serres et 10 tonnes/ha pour les ombrières).

Il n'existe pas d'inventaire de culture de petits fruits rouges. Comme proposé dans la méthodologie d'Agribalyse 3.0, l'inventaire « Strawberry, open field, conventional » a été sélectionné comme donnée approchée.

L'inventaire utilisé pour la production de kiwi a été modifié pour correspondre aux spécificités de la culture de kiwi en verger. L'inventaire original « Kiwi {GLO}, production » inclut en effet une part importante d'énergie, nécessaire au chauffage de la serre. Or, la culture de kiwi en verger ne nécessite pas d'apport de chaleur. Il en a été de même pour la production de concombres.

Des **scénarios de référence** ont été définis pour comparaison. Ils représentent une consommation moyenne française des mêmes quantités d'aliments et d'énergie. Ainsi, pour la production d'aliments, les *mixes de consommation* d'Agribalyse 3.0 ont été utilisés. La même quantité d'aliment est produite : on considère donc les mêmes surfaces et les mêmes quantités produites. Une production équivalente à la quantité d'énergie produite par la parcelle est modélisée à partir des mêmes mix électriques définis au chapitre 3.2.1.2. Les frontières du scénario de référence sont les mêmes que pour le scénario HORIZEO.

Les inventaires sélectionnés et les quantités modélisées sont présentés ci-dessous dans le Tableau 11, pour 37 ans d'exploitation.

Tableau 11 : Inventaire de la production agricole de 3253 t d'aliments, des bâtiments de stockage pour le scénario HORIZEO et les scénarios de référence

Inventaire pour l'ilot "Verger"	Unité	Quantité Référence	Inventaire		Commentaire
			Scénario Saucats	Scénario de référence	
Flux de référence					
Verger	p	37			Pour 37 ans d'exploitation
Intrants					
Kiwi	t	21,00	Kiwi {GLO} production, unheated Cut-off, U	Kiwi, consumption mix/FR U	Adaptation du procédé ecoinvent pour extraire la consommation de chaleur, non représentatif d'une culture en verger.

Inventaire pour l'ilot "Vigne"	Unité	Quantité Référence	Inventaire		Commentaire
			Scénario Saucats	Scénario de référence	
Flux de référence					
Vignes	p	37			Pour 37 ans d'exploitation
Intrants					
Raisin de table	t	17,50	Grape {RoW} grape production Cut-off, U	Table grape, consumption mix/FR U	Production en tonne pour 37 ans de d'exploitation sur la surface dédiée de 0,7 ha / rendement : 25 t/ha/an

Inventaire pour l'ilot "Serre souple"	Unité	Quantité Référence	Inventaire		Commentaire
			Scénario Saucats	Scénario de référence	
Flux de référence					
Serres non chauffées	p	37			Pour 37 ans d'exploitation
Intrants					
Serre tunnel	m2	112	Plastic tunnel {FR} plastic tunnel construction Cut-off, U	Plastic tunnel {FR} plastic tunnel construction Cut-off, U	Culture maraichère traditionnelle sous-serre bachée non chauffée Durée de vie de la serre : 25 ans, changement de la toile tout les 4 ans. Répartis sur 37 ans.
Oignons	t	0,27	Onion, national average, at farm/FR U	Onions, consumption mix/FR U	Production en tonne pour 37 ans d'exploitation sur la surface dédiée de 0,21 ha. Répartition équitable de la surface entre les cultures (0,21/14 ha)
Tomates, fraîches	t	0,27	Tomato, medium size, conventional, soil based, non-heated greenhouse, at greenhouse/FR U	Fresh tomato, consumption mix/FR U	
Carottes et navets	t	0,27	Carrot, conventional, national average, at farm gate/FR U	Carrot, consumption mix/FR U	
Laitue et chicorée	t	0,27	Lettuce, conventional, national average, at farm gate/FR U	Lettuce, consumption mix/FR U	
Haricots frais	t	0,27	French bean, conventional, national average, at farm gate/FR U	French bean, consumption mix/FR U	
Pois frais	t	0,27	Winter pea, conventional, 15% moisture, at farm gate/FR U	Snow pea, consumption mix/FR U	
Choux-fleurs et brocolis	t	0,27	Cauliflower, national average, at farm gate/FR U	Cauliflower, consumption mix/FR U	
Citrouilles, courges et potirons	t	0,27	Squash, conventional, national average, at farm gate/FR U	Squash, consumption mix/FR U	
Melons, cantaloups	t	0,27	Melon, national average, at farm gate/FR U	Melon, consumption mix/FR U	
Choux et autres brassicacée	t	0,27	Cauliflower, national average, at farm gate/FR U	Cauliflower, consumption mix/FR U	
Poireaux et autres légumes alliacés	t	0,27	Leek, national average, at plant/FR U	Leek, consumption mix/FR U	Production en tonne pour 37 ans d'exploitation sur la surface dédiée de 0,21 ha. Répartition équitable de la surface entre les cultures (0,21/14 ha)
Concombres, cornichons	t	0,27	Cucumber {GLO} production Cut-off, U - Copied from Ecoinvent G21	Cucumber, consumption mix/FR U	
Epinards	t	0,27	Spinach {GLO} spinach production Cut-off, U	Spinach, consumption mix/FR U	
Fraises	t	0,27	Strawberry, open field, conventional, at farm gate/FR U	Strawberry, consumption mix/FR U	

Inventaire pour l'ilot "Culture en rang"	Unité	Quantité Référence	Inventaire		Commentaire
			Scénario Saucats	Scénario de référence	
Flux de référence					
Plein champ	p	37			Pour 37 ans d'exploitation
Intrants					
Oignons	t	2,68	Onion, national average, at farm/FR U	Onions, consumption mix/FR U	Production en tonne pour 37 ans d'exploitation sur la surface dédiée de 2,5 ha. Répartition équitable de la surface entre les cultures (2,5/14 ha)
Tomates, fraîches	t	2,68	Tomato, medium size, conventional, soil based, non-heated greenhouse, at greenhouse/FR U	Fresh tomato, consumption mix/FR U	
Carottes et navets	t	2,68	Carrot, conventional, national average, at farm gate/FR U	Carrot, consumption mix/FR U	
Laitue et chicorée	t	2,68	Lettuce, conventional, national average, at farm gate/FR U	Lettuce, consumption mix/FR U	
Haricots frais	t	2,68	French bean, conventional, national average, at farm gate/FR U	French bean, consumption mix/FR U	
Pois frais	t	2,68	Winter pea, conventional, 15% moisture, at farm gate/FR U	Snow pea, consumption mix/FR U	
Choux-fleurs et brocolis	t	2,68	Cauliflower, national average, at farm gate/FR U	Cauliflower, consumption mix/FR U	
Citrouilles, courges et potirons	t	2,68	Squash, conventional, national average, at farm gate/FR U	Squash, consumption mix/FR U	
Melons, cantaloups	t	2,68	Melon, national average, at farm gate/FR U	Melon, consumption mix/FR U	
Choux et autres brassicacée	t	2,68	Cauliflower, national average, at farm gate/FR U	Cauliflower, consumption mix/FR U	
Poireaux et autres légumes alliacés	t	2,68	Leek, national average, at plant/FR U	Leek, consumption mix/FR U	Production en tonne pour 37 ans d'exploitation sur la surface dédiée de 2,5 ha. Répartition équitable de la surface entre les cultures (2,5/14 ha)
Concombres, cornichons	t	2,68	Cucumber {GLO} production Cut-off, U - Copied from Ecoinvent G21	Cucumber, consumption mix/FR U	
Epinards	t	2,68	Spinach {GLO} spinach production Cut-off, U	Spinach, consumption mix/FR U	
Fraises	t	2,68	Strawberry, open field, conventional, at farm gate/FR U	Strawberry, consumption mix/FR U	Rendement moyen (toutes cultures maraichères) : 15 t/ha/an

Inventaire pour l'ilot "Ombrières"	Unité	Quantité Référence	Inventaire		Commentaire
			Scénario Saucats	Scénario de référence	
Flux de référence					
Plein champ	p	37			Pour 37 ans d'exploitation
Intrants					
Framboise	t	2,73	Strawberry, open field, conventional (Agribalyse 3.0)	Strawberry, consumption mix/FR U	Framboise, groseille et cassis approchés par la fraise. Production en tonne pour 37 ans d'exploitation sur la surface dédiée de 0,82 ha. Répartition équitable de la surface entre les cultures (0,82/3 ha)
Groseille	t	2,73	Strawberry, open field, conventional (Agribalyse 3.0)	Strawberry, consumption mix/FR U	
Cassis	t	2,73	Strawberry, open field, conventional (Agribalyse 3.0)	Strawberry, consumption mix/FR U	

4 Résultats et interprétations

4.1 Empreinte carbone globale

Dans cette partie du rapport, l'empreinte carbone globale du projet résulte de la concaténation des résultats des deux briques du projet : le parc photovoltaïque et le pôle de production maraîchère et agrivoltaïque. Les résultats spécifiques au parc et au pôle de production maraîchère et agrivoltaïque sont détaillés dans les sections suivantes.

Le tableau ci-dessous présente le résultat de la somme des impacts sur le changement climatique des briques du projet HORIZEO sur l'ensemble de la durée de vie du projet soit 37 ans d'exploitation. Ce résultat est mis en regard des empreintes carbone des scénarios de référence.

	Unité	HORIZEO	Référence 1 ADEME 2022	Référence 2 RTE 2030 (SNBC)	Référence 3 RTE 2050 N1	Référence 4 100 % fossile
Émissions de CO ₂	million de kg CO ₂ éq.	592	1 850	926	641	16 993

Tableau 12 : Empreintes carbone du cycle de vie d'HORIZEO et des références en million de kg de CO₂ éq.

Plus précisément, l'empreinte carbone du projet d'HORIZEO est de 591 819 408 kg CO₂ éq.

Sur les 37 ans, :

- l'empreinte carbone du scénario de référence 1 ADEME 2022 est 3 fois plus importante que celle du projet HORIZEO à services équivalents (production de 35 491 GWh d'électricité pour le parc solaire, de 3253 t d'aliments et de 57 GWh d'électricité pour le pôle de production maraîchère et agrivoltaïque)
- l'empreinte carbone du scénario de référence 2 RTE 2030 (SNBC) est 1,5 fois plus importante que celle du projet HORIZEO
- l'empreinte carbone du scénario de référence 3 RTE 2050 N1 est équivalente à celle du projet HORIZEO
- l'empreinte carbone du scénario de référence 4, 100 % fossile est quasiment 29 fois plus importante que celle du projet HORIZEO

Les graphiques et tableau ci-dessous montrent les contributions de chaque brique du projet HORIZEO (à gauche) et des références (à droite) à l'empreinte carbone sur les 37 ans d'exploitation :

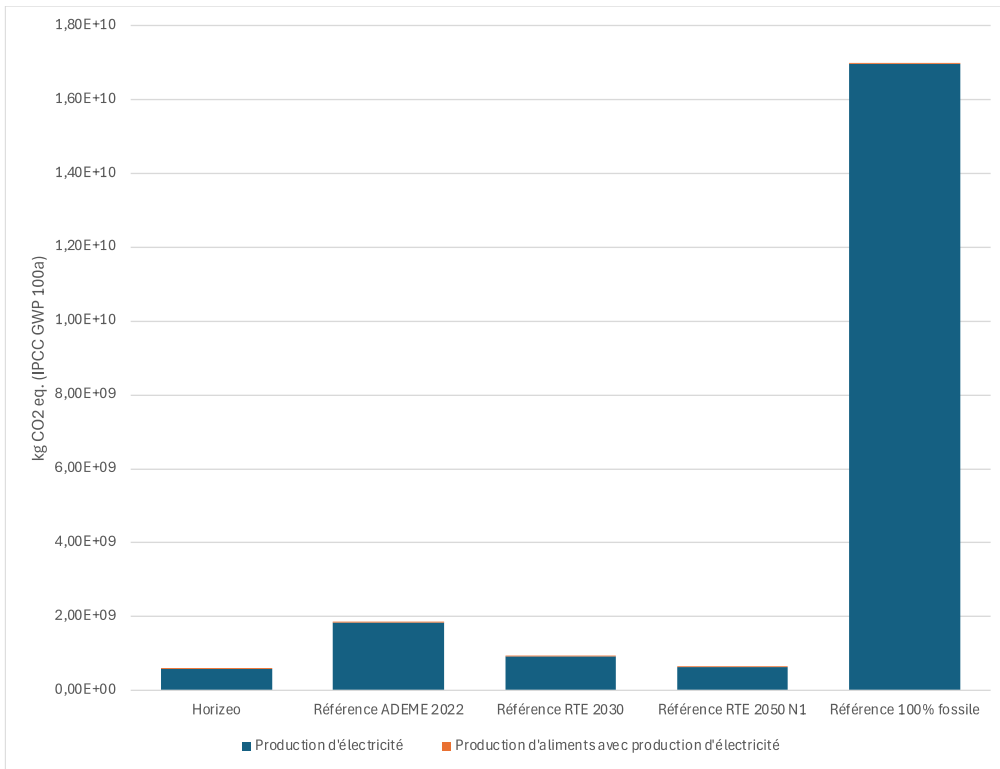


Figure 6 : Contributions à l’empreinte carbone pour HORIZEO et les références sur 37 ans d’exploitation

Pour plus de lisibilité, le même graphe est proposé ci-après sans le scénario de référence 100 % fossile.

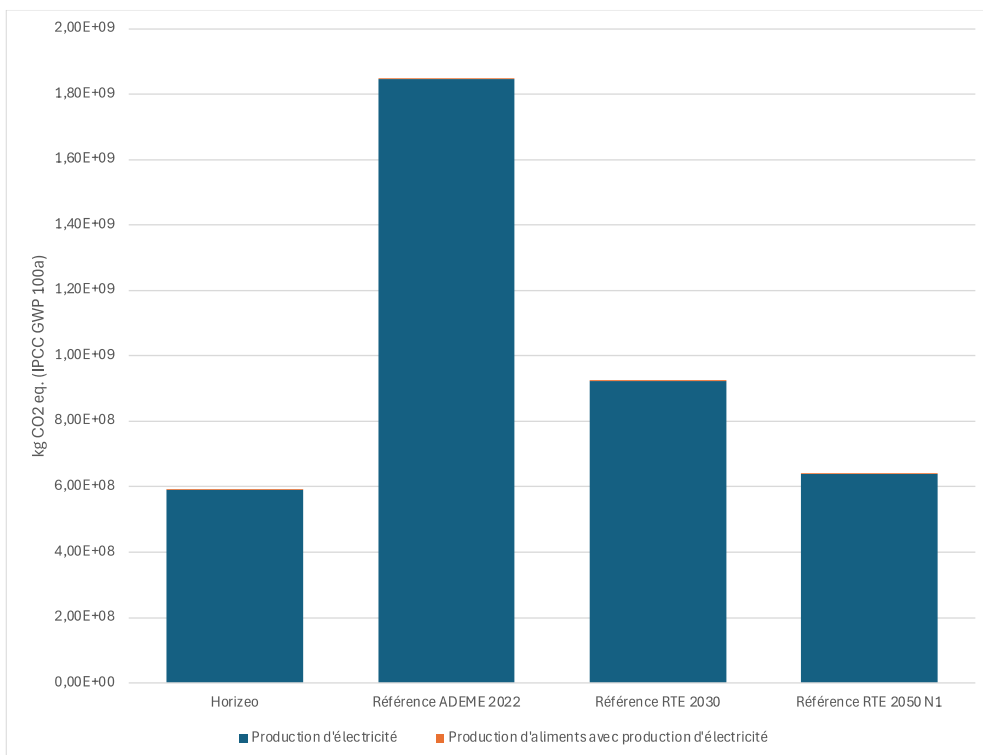


Figure 7 : Zoom des contributions à l’empreinte carbone pour HORIZEO et les références sur 37 ans d’exploitation

Dans tous les cas, plus de 99 % de l’empreinte carbone est due à la production d’électricité. La production des aliments représente moins d’1 % de l’impact.

Le delta entre l’empreinte carbone du projet HORIZEO et ceux des scénarios de référence (2022, 2030 et 100 % fossile) est principalement dû au fait que les mix énergétiques sont basés en partie ou pour totalité sur des énergies fossiles. Seul le scénario de référence RTE 2050 N1 ne contient pas d’énergie fossile.

L’évolution du mix électrique et de l’empreinte carbone des technologies de production d’énergie influera grandement sur l’impact des scénarios de référence et donc sur les écarts. On peut néanmoins remarquer que le projet HORIZEO a une contribution inférieure à l’ensemble des scénarios étudiés.



4.2 Empreintes carbone par composante du projet

4.2.1 Production d'électricité

Dans cette partie, sont explicités les résultats du scénario HORIZEO et du scénario de référence répondant à l'unité fonctionnelle :

« Mise à disposition sur le réseau national de 35 491 GWh d'électricité haute tension (225 kV) sur 37 ans »

Les résultats de la production d'énergie par le parc photovoltaïque ainsi que la production d'énergie des scénarios de référence sont donnés dans le tableau suivant.

Quantité d'énergie mise sur le réseau national français	Unité	HORIZEO	Référence 1 mix électrique FR 2022 (Base Empreinte, ADEME)	Référence 2 mix électrique FR prospectif 2030 (RTE, respect de la SNBC)	Référence 3 mix électrique FR prospectif 2050 (RTE, N1)	Référence 4 mix électrique 100 % fossile
Pour 1 kWh						
1 kWh	kg CO2 eq	1,66E-02	5,20E-02	2,60E-02	1,80E-02	4,78E-01
	%	3%	11%	5%	4%	100%
Pour 1 an d'exploitation du parc						
959 GWh	kg CO2 eq	1,60E+07	4,99E+07	2,49E+07	1,73E+07	4,59E+08
	%	3%	11%	5%	4%	100%
Sur l'ensemble du bail, soit 37 ans d'exploitation						
35 491 GWh	kg CO2 eq	5,90E+08	1,85E+09	9,23E+08	6,39E+08	1,70E+10
	%	3%	11%	5%	4%	100%

Tableau 13 : Empreinte carbone du parc photovoltaïque et des références

Le parc HORIZEO permet-il de réduire l'impact carbone de la production d'électricité française ?

La réponse est oui : le parc photovoltaïque HORIZEO permet une production d'électricité dont l'empreinte carbone est plus basse que l'ensemble des différents mix énergétiques étudiés. A horizon 2050, si la France suit le scénario N1 proposé par RTE comme semble l'indiquer le programme actuel de relance du nucléaire, la production d'électricité française pourrait avoir une empreinte carbone par kWh équivalente à la production du parc HORIZEO, tout en restant légèrement supérieure.

L'empreinte carbone par kWh produit par le parc photovoltaïque HORIZEO est de **16,6 g CO2 éq. / kWh** soit plus basse que les données moyennes présentes dans la bibliographie. La Base Empreinte de l'ADEME donne par exemple des empreintes carbone entre 25 et 44 g CO2 éq. / kWh pour l'électricité produite par des parcs photovoltaïque en France (variation de l'empreinte carbone selon l'origine de la production des panneaux photovoltaïque). Cette différence s'explique notamment par les points suivants :

- une empreinte carbone des panneaux d'environ 427 kgCO2 éq. / kWc, plus faible que la moyenne actuelle marché. Ces panneaux sont d'ores et déjà commercialisés. Cette technologie permet d'atteindre une performance supérieure à 0,22 kWc / m² qui est la valeur maximale de la fourchette utilisée dans la Base Empreinte : 0,15 à 0,22 kWc / m².
- une durée de vie des panneaux poussée à 37 ans (dégradation de la performance des panneaux prise en compte ainsi qu'un taux de casse à 0,2 %) contre 25 ans dans la Base

Empreinte, donc un amortissement plus important des impacts de la fabrication des panneaux.

- une productivité du parc de 1279 kWh / kWc sur la première année qui est dans le haut de la fourchette utilisée dans la Base Empreinte : 600 à 1500 kWh / kWc / an

Contribution à l’empreinte carbone globale

Le parc photovoltaïque de 818,2 MWc contribue à hauteur de 99 % à l’empreinte carbone du projet HORIZEO. Le parc photovoltaïque est donc le premier contributeur à l’empreinte carbone du projet.

Analyse de contribution

Dans les résultats présentés ci-dessous, la série « autres composants » correspond aux composants autres que les modules et les cadres en aluminium soit : les onduleurs, les transformateurs, le câblage électrique et les structures en acier sous les panneaux.

La figure ci-dessous montre la contribution, sur l’ensemble du cycle de vie du projet, des phases des différents composants du système parc photovoltaïque et raccordement réseau.

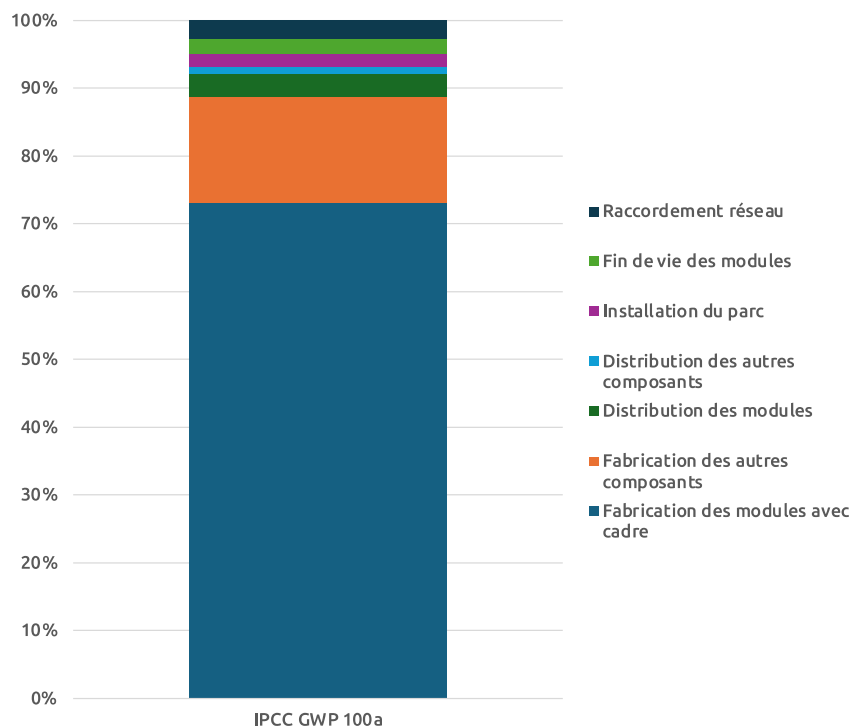


Figure 8 : Contributions à l’empreinte carbone du parc photovoltaïque HORIZEO

59 % de l’impact du parc est dû à la fabrication des modules sans le cadre en aluminium soit environ 350 mille tonnes de CO_2 (environ 80 % de la part en bleu de la Figure 8 ci-dessus). Les postes contribuant à l’empreinte carbone sont ensuite, par ordre d’importance :

- la fabrication des cadres en aluminium qui représente 13 % de l’impact soit environ 80 mille tonnes de CO_2 (quasiment 20 % de la part en bleu de la Figure 8 ci-dessus).

L'aluminium est modélisé par un alliage d'aluminium avec environ 30 % d'aluminium recyclé qui est extrudé en barres profilées.

- la fabrication des autres éléments du parc : onduleurs, transformateurs, câblages, structures en acier... L'ensemble représente 15 % de l'impact. Ce sont les structures en acier qui sont les plus contributrices à hauteur d'environ 91 mille tonnes de CO_2 .
- Le reste des éléments et des étapes du cycle de vie : raccordement réseau, distributions des composants (transport des modules et des autres composants du parc du lieu de fabrication au lieu de construction), installation, fin de vie... qui représentent chacun moins de 3 % et ensemble environ 10 % de l'empreinte carbone du parc.

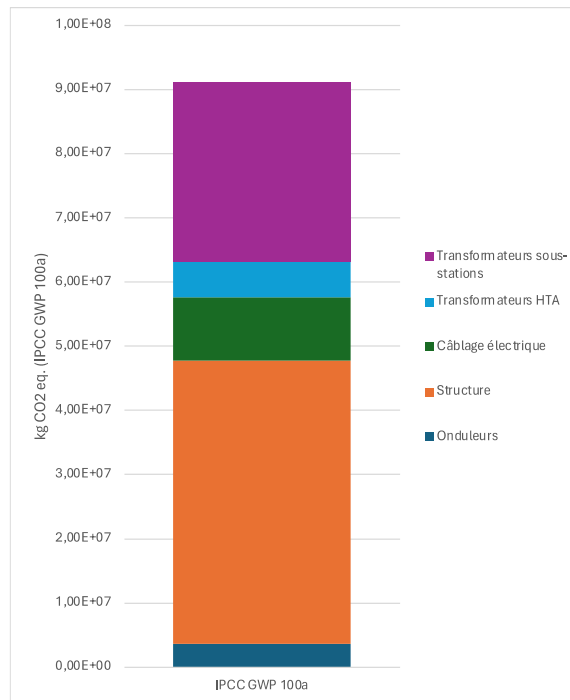


Figure 9 : Contributions à l'empreinte carbone du parc photovoltaïque : zoom sur la fabrication des autres composants

Concernant le mix électrique français, le détail du mix de la donnée utilisée n'est pas précisé par l'ADEME. Afin d'illustrer les contributions d'impact de ce mix, le mix électrique donné par le rapport RTE « Bilan prévisionnel de l'équilibre offre–demande d'électricité en France, édition 2021 » et correspondant à la production française d'électricité en 2019 a été étudié. C'est celui détaillé au 3.2.1.2. Ce mix modélisé avec les données ecoinvent v3.6 a un facteur d'émission plus important que celui affiché par la base Empreinte, celui utilisé pour l'étude. En effet, comme vu à la Figure 3 du chapitre 3.2.1.2, les facteurs d'émissions par source d'énergie d'ecoinvent sont plus importants que ceux de la base Empreinte. Par exemple, l'impact d'1 kWh de nucléaire est de moins de 4 gCO_{2eq} pour la Base Empreinte et de 12 gCO_{2eq} pour ecoinvent. Cependant l'impact relatif en % des sources d'énergie sur l'impact total du mix électrique devrait être relativement proche entre les deux bases de données. Par exemple, comme illustré sur la figure ci-dessous, le nucléaire est responsable de 12 % de

l’empreinte carbone du mix électrique français avec la base ecoinvent. L’ordre de grandeur devrait être conservé avec la base Empreinte.

La contribution des différentes sources d’énergie au mix électrique français (à partir des données ecoinvent) est donc illustrée sur la figure ci-dessous.

Contribution à l'empreinte carbone du mix électrique français, 2019

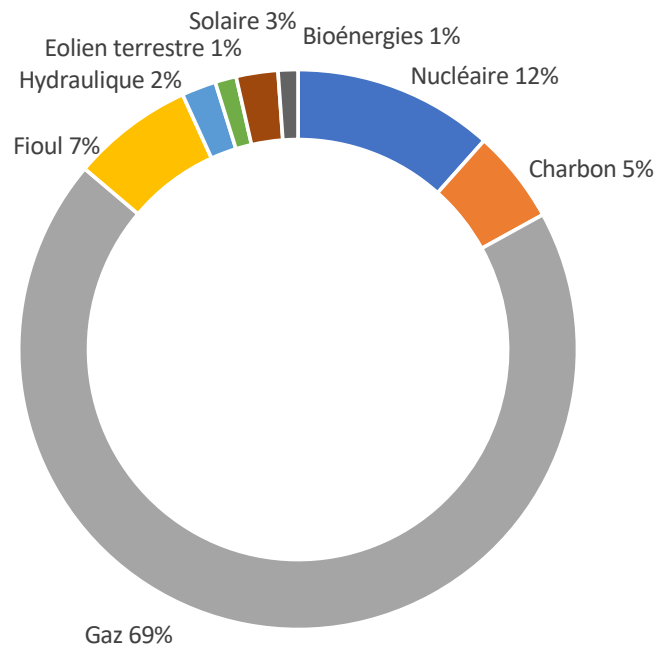


Figure 10 : Contributions à l’empreinte carbone du mix électrique français, 2019

La majorité de l’impact provient bien entendu des énergies fossiles, gaz, charbon et fioul, à hauteur de 81 % alors qu’ils représentent moins de 9 % de la production d’électricité française.

4.2.2 Pôle de production maraîchère et agrivoltaïque

Dans cette partie, sont explicités les résultats du scénario HORIZEO et du scénario de référence répondant à l'unité fonctionnelle :

**« Production 3253 t de fruits et légumes et de 57 GWh d'électricité
sur 37 ans d'exploitation »**

Les empreintes carbone sont présentées ci-dessous dans le Tableau 14.

Quantités d'aliments et d'énergies produites	Unité	Production par les parcelles agri-solaire HORIZEO	Référence 1 Mix de consommation FR + mix électrique FR 2022 (Base Empreinte, ADEME)	Référence 2 Mix de consommation FR + mix électrique R 2030 (RTE, SNBC)	Référence 3 Mix de consommation FR + mix électrique FR 2050 (RTE, N1)	Référence 4 Mix de consommation FR + mix électrique 100 % fossile
Pour 1 an d'exploitation des parcelles agri-solaire						
88 t fruits et légumes	kg CO2 eq	4,48E+04	1,20E+05	7,94E+04	6,70E+04	7,78E+05
1,57 GWh d'électricité	%	6%	15%	10%	9%	100%
Sur l'ensemble du bail, soit 37 ans d'exploitation						
3253 t fruits et légumes	kg CO2 eq	1,66E+06	4,43E+06	2,94E+06	2,48E+06	2,88E+07
57 GWh d'électricité	%	6%	15%	10%	9%	100%

Tableau 14 : Empreintes carbone du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque HORIZEO et du scénario de référence

La production d'aliments et d'électricité sur le pôle de production maraîchère et agrivoltaïque permet-elle de réduire l'impact carbone de la consommation moyenne d'aliments en Gironde et d'électricité en France ?

La réponse est oui : les scénarios de référence ont une empreinte carbone plus élevée que le pôle de production maraîchère et agrivoltaïque HORIZEO.

Contribution à l'empreinte carbone globale

Les résultats obtenus révèlent le faible impact des parcelles agricoles et de la production d'énergie associée sur l'ensemble du projet HORIZEO (< 1 %).

Analyse de contribution

Sur le pôle de production maraîchère et agrivoltaïque : l'impact associé à la production agricole dans le scénario HORIZEO et dans les scénarios de référence 1, 2 et 3 varie entre 30 et 60 % (cf. Figure 11).

La différence entre les scénarios s'explique notamment par la part d'énergie d'origine fossile dans le mix électrique français utilisé dans les scénarios de référence actuel (2022, ADEME), à horizon 2030 (RTE) et 100 % fossile. Se référer au chapitre 4.2.1 Production d'électricité concernant l'analyse de contribution de l'impact de la production d'électricité par les panneaux photovoltaïques.

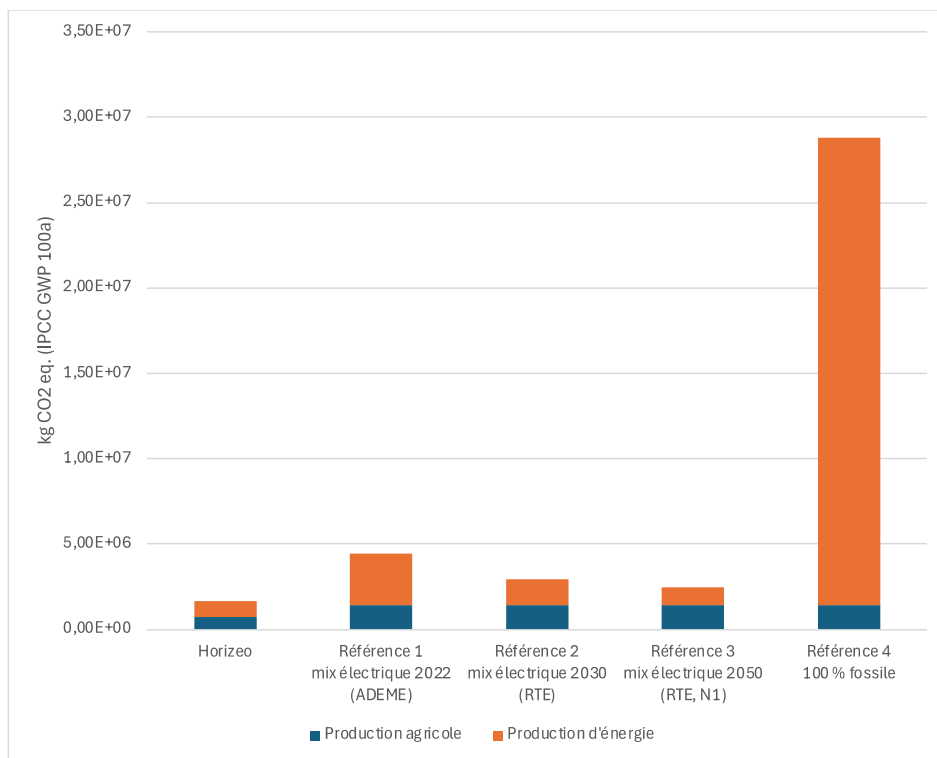


Figure 11 : Contributions aux empreintes carbone du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque

Impact sur le changement climatique en kgCO2eq	Production agricole	Production d'énergie	Total
Horizeo	7,04E+05	9,51E+05	1,66E+06
	43%	57%	100%
Référence 1 mix électrique 2022 (ADEME)	1,45E+06	2,98E+06	4,43E+06
	33%	67%	100%
Référence 2 mix électrique 2030 (RTE)	1,45E+06	1,49E+06	2,94E+06
	49%	51%	100%
Référence 3 mix électrique 2050 (RTE, N1)	1,45E+06	1,03E+06	2,48E+06
	58%	42%	100%
Référence 4 100 % fossile	1,45E+06	2,73E+07	2,88E+07
	5%	95%	100%

Tableau 15 : Contributions aux empreintes carbone du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque

Pour la production agricole sans la production d'électricité, les scénarios de référence sont plus impactants que le scénario HORIZEO (*cf.* Figure 12). Cette différence s'explique notamment par la prise en compte du transport d'aliments produits à l'étranger et consommés en France. On l'observe notamment pour les cultures maraîchères et arboricoles fruitières. Dans le cas du verger, la grande différence entre les deux scénarios s'explique surtout par une forte utilisation d'énergie nécessaire à la production et au stockage des kiwis à l'étranger (et consommés en France).

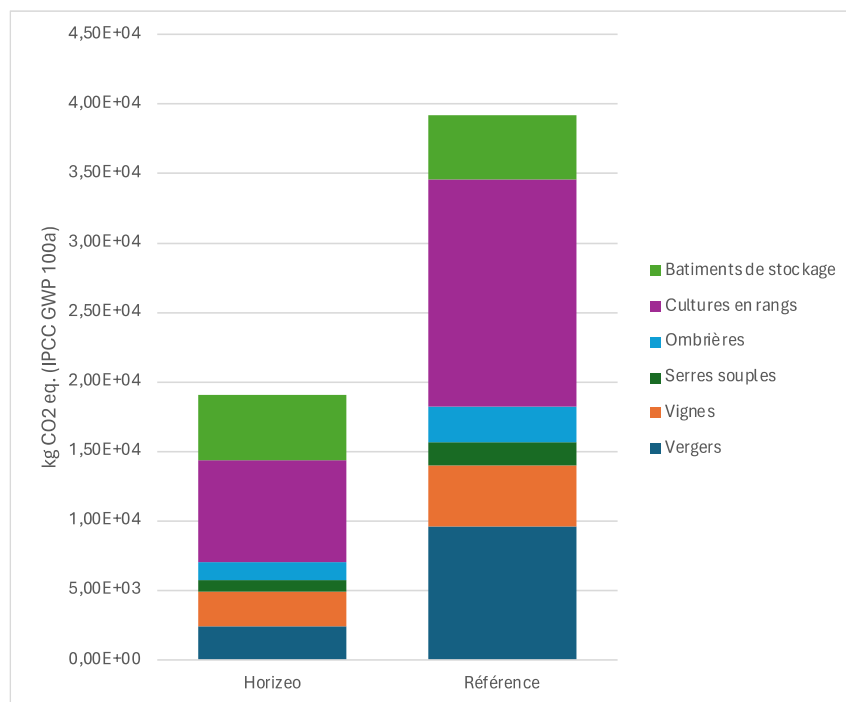


Figure 12 : Contributions aux empreintes carbone de la production agricole (sans la production d'électricité)

4.3 Analyses de sensibilité

4.3.1 Sensibilité sur la production des panneaux photovoltaïque

Il existe des projets d'usines de panneaux photovoltaïque français. Afin d'estimer le potentiel gain d'impact de l'usage de panneaux produits en France, une analyse de sensibilité a été réalisée avec la donnée de l'entreprise Carbon transmise par NEOEN : 360 kgCO₂eq / kWc.

L'usage de tels panneaux permettrait un gain d'impact d'une dizaine de pourcents amenant aux résultats suivants :

- 15,1 gCO₂eq / kWh produit par le parc HORIZEO
- bilan total de 535 millions de kg CO₂ éq. sur les 37 ans d'exploitation du parc HORIZEO

Le graphe ci-dessous intègre le résultat d'impact sur le changement climatique par kWh d'électricité produite du scénario HORIZEO avec des panneaux photovoltaïques français aux résultats précédents.

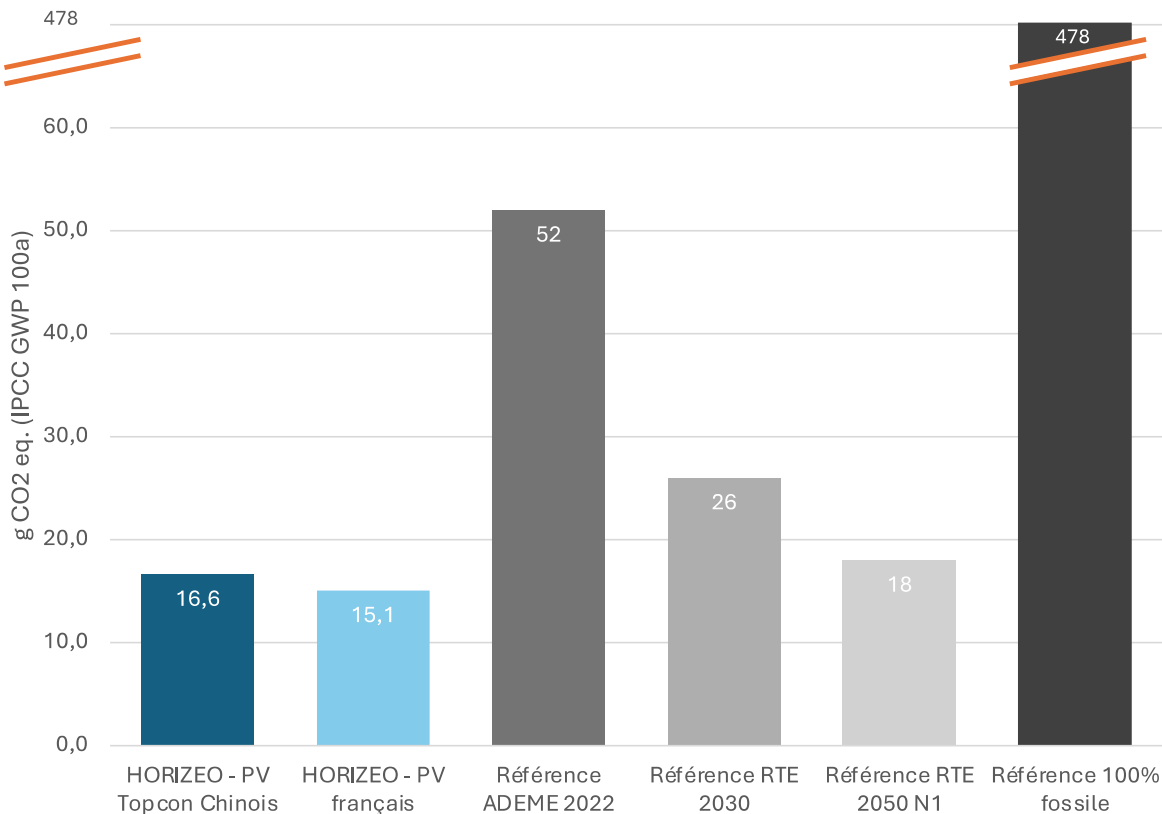


Figure 13 : Empreinte carbone d'1 kWh produit selon les scénarios HORIZEO et Références

4.3.2 Sensibilité sur l'intégration d'un système de stockage

Contrairement aux énergies fossiles facilement pilotables, la production d'énergie solaire est dépendante de l'ensoleillement. La présente analyse de sensibilité a pour objet de tenir compte de la nécessité d'installation de systèmes de stockage dans le réseau électrique lié à l'augmentation de la part des énergies renouvelables non pilotables dans le mix énergétique.

Comme nous pouvons le constater dans les différents scénarios RTE du mix de production électrique en 2050, réalisés en 2021, l'installation de systèmes de stockage sera plus ou moins

nécessaire en fonction du scénario choisi. Afin de simplifier l'étude, les systèmes de stockage étudiés ici seront limités aux batteries, dont la puissance prévisionnelle à installer selon les scénarios va de 1 GW à 26 GW.

LES SCÉNARIOS DE MIX DE PRODUCTION À L'HORIZON 2050

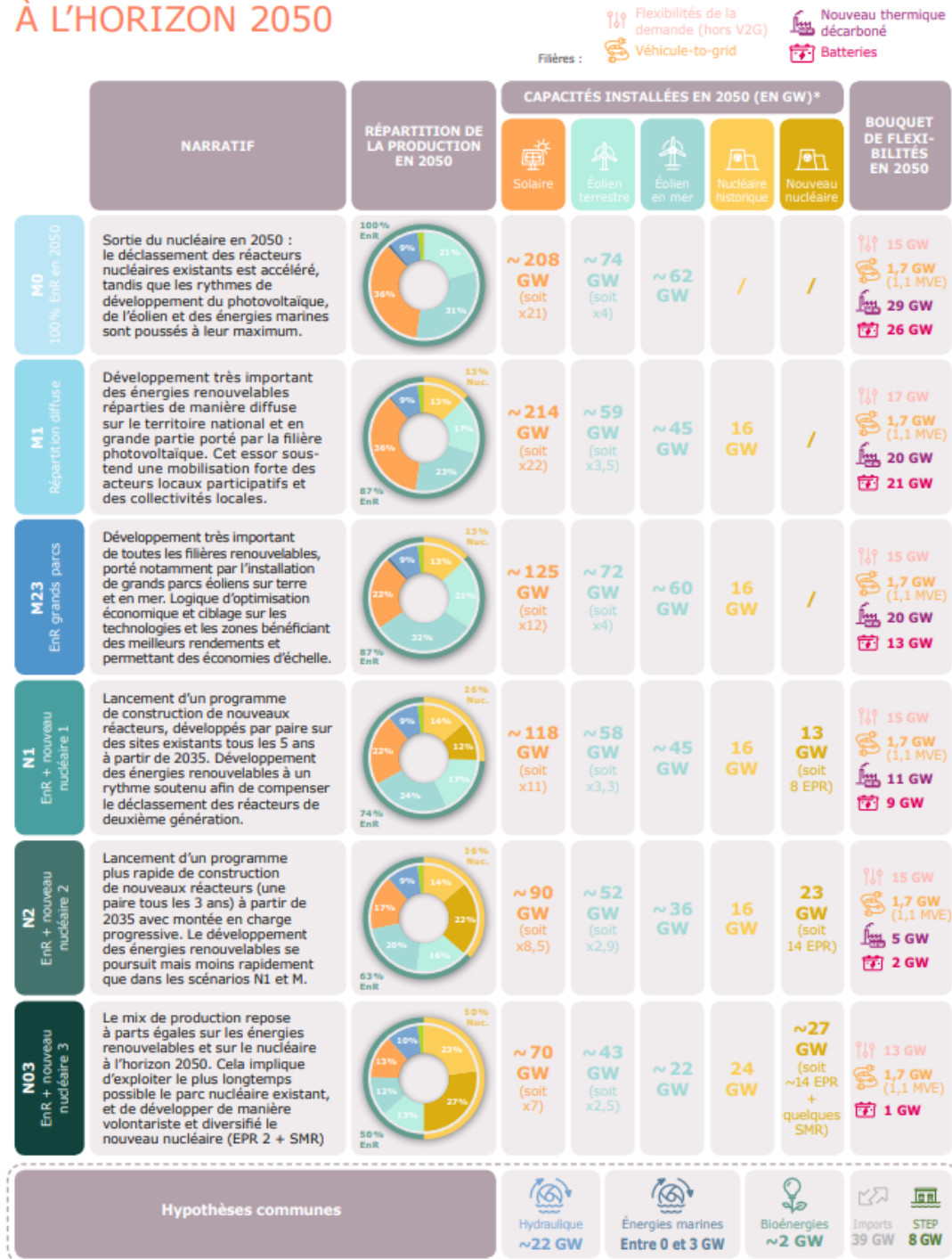


Figure 14 : 6 scénarios prospectifs de mix électriques français à horizon 2050 (RTE, 2022)

Ce chapitre présente un calcul simple pour identifier l'ordre de grandeur de la part de batterie qui serait alors à attribuer au projet HORIZEO en fonction du scénario choisi et de la part

qu'occuperait le projet HORIZEO au sein des énergies renouvelables non pilotables installées en 2050 (limitées ici volontairement au solaire, éolien terrestre et éolien en mer).

Pour effectuer ce calcul, nous avons retenu les hypothèses simplifiées suivantes :

- D'après le scénario prospectif N1 de RTE, utilisé dans la présente étude comme scénario de référence à horizon 2050, 9 GW de batteries seraient à déployer ;
- Le rapport RTE ne précise pas de valeur sur la capacité en kWh des batteries. En prenant l'hypothèse que les batteries ont une capacité d'1 heure (très plausible au moment de la rédaction du rapport RTE en 2021), cela revient à la nécessité de déployer une capacité en France de 9 GWh de batteries sur le réseau électrique français ;
- Le scénario N1 indique une production annuelle électrique par l'énergie solaire et éolienne de 421 TWh ;
- Ainsi, le scénario N1, au regard des hypothèses précédemment citées, impliquerait de déployer :

$$\frac{9 \text{ GWh}}{421 \text{ TWh}} = 2,138 \cdot 10^{-5} \text{ kWh de batterie / kWh d'électricité renouvelable produite}$$

La production d'électricité à partir d'énergie solaire du projet HORIZEO (parc photovoltaïque + pôle de production maraîchère et agrivoltaïque) sur l'ensemble des 37 années d'exploitation est estimée à $35\,491 + 57 = 35\,548$ GWh, soit une moyenne annuelle de 961 GWh.

La capacité de batterie pouvant être théoriquement associée à la production du projet HORIZEO en suivant la règle de trois est donc :

$$961 \text{ GWh} * 2,138 \cdot 10^{-5} \text{ kWh de batterie} = 20,5 \text{ MWh de batterie}$$

A la première version de l'empreinte carbone réalisée dans le cadre du débat public du projet HORIZEO, plusieurs composantes du projet, aujourd'hui abandonnées (centre de données, électrolyseur, batteries) avaient été étudiées. Nous avons ainsi repris dans cette analyse de sensibilité la modélisation de la batterie LFP de 32 MWh (en stockage utile) proposée par NEOEN au moment du débat public d'HORIZEO. L'ensemble des hypothèses et résultats sont rappelées en Annexe B – Modélisation de la batterie LFP.

En reprenant les résultats présentés au débat public en 2021, l'impact des batteries LFP sur la durée d'exploitation du projet HORIZEO (sans compter l'impact de l'énergie qui transiterait dans les batteries) est de 24,8 millions kg CO₂ éq. (voir détail des résultats en Annexe B).

En appliquant une règle de 3, pour ramener ce résultat aux 20,5 MWh de capacité utile :

$$24,8 \text{ millions kgCO}_2 \text{ éq.} * \frac{20,5 \text{ MWh}}{32 \text{ MWh}} = 15,9 \text{ millions kgCO}_2 \text{ éq.}$$

On estime ainsi l'empreinte carbone des batteries nécessaire au pilotage de l'électricité produite par le parc HORIZEO à environ 16 millions kg CO₂ éq. Ce résultat représente moins 3 % de l'empreinte carbone du projet HORIZEO. Cela ne change pas les conclusions : les scénarios de référence 1, 2 et 4 restent plus élevés et le scénario 3 équivalent (sans avoir même alloué également à ces scénarios de référence l'impact d'installation de batteries du fait de la présence d'énergie solaire et éolienne dans les mix électriques de référence).

Ce calcul prend en compte la production annuelle du projet HORIZEO, c'est-à-dire une production moyennée à l'année, en considérant la puissance des modules (et donc aussi la perte de puissance des modules au fil des ans) et l'ensoleillement local moyen. Dans la réalité, la quantité d'électricité produite varie chaque jour, chaque mois, selon les conditions climatiques. Elle n'est donc pas pilotée selon les besoins en consommation saisonniers (plus forte consommation en hiver – 60 à 70 GW par semaine entre novembre et mars – par rapport à l'été – de l'ordre de 45 GW de consommation hebdomadaire). L'équilibre offre-demande est assurée par le gestionnaire de transport (Rte).

Le pilotage de la production d'électricité est réalisé, en France, dans le cadre d'un mix énergétique global, qui prend en compte l'ensemble des systèmes de production notamment : l'éolien, le solaire, l'hydraulique, le nucléaire (et, dans le futur, les autres énergies à venir comme l'hydrogène), ainsi que les énergies fossiles. Ce mix énergétique est dimensionné en puissance et la flexibilité de chaque composante (y compris les moyens de stockage) est également appréciée pour assurer un équilibre offre-demande de l'électricité à tout instant. La régulation de la consommation et de la production d'électricité vise à adapter les règles de marché et à sécuriser le fonctionnement du système électrique (par exemple, la réforme des heures creuses et pleines en 2025³).

Dans son bilan prévisionnel publié en 2023 (Futurs énergétiques 2050 2023–2035 : première étape vers la neutralité carbone), RTE qualifie le développement de la flexibilité de la demande d'axe prioritaire pour optimiser le fonctionnement du système électrique. Il s'agit de faire correspondre au mieux consommation et production d'électricité décarbonée. Pour que les flexibilités de la demande deviennent une composante du mix électrique à part entière, leur déploiement doit s'appuyer sur un plan de passage à l'échelle dédié, dont le déploiement et l'effet sur la courbe de charge doivent être pilotés. Les batteries et les flexibilités de la demande fournissent un service similaire : déplacer de l'énergie à l'échelle de quelques heures.

Il faut aussi rappeler que le marché de l'électricité dépasse les frontières françaises, et que la solution pourrait être aussi à rechercher dans ces interconnexions avec les pays voisins.

Il est important de noter que le projet HORIZEO verra sa production vendue auprès de consommateurs privés dans une logique dite « as produced », cela signifie que les consommateurs achèteront la production du parc avec sa variabilité journalière et saisonnière, et complèteront leur besoin d'électricité par d'autres achats pour soutenir leur profil de consommation, également variable.

Pour conclure, la gestion des différentiels de consommations sera très probablement assurée par différentes solutions. Nous avons estimé que la prise en compte de batteries comme moyen de stockage pour des durées courtes implique une augmentation de moins de 3 % de l'empreinte carbone du projet HORIZEO. Si la prise en compte d'autres moyens de stockage pour des durées de plusieurs mois s'avéraient nécessaire, ceux-ci impliqueraient un impact supplémentaire. Selon le(s) moyen(s) de stockage utilisé(s), cet impact sera plus ou moins important. Dans le cas du recours à une solution unique de stockage d'hydrogène par

³ <https://www.expertise-energie.fr/actualites-reforme-des-heures-creuses-et-pleines-en-2025/>

exemple, en l'état actuel des techniques de production de ce gaz, l'impact serait significatif. Cependant, il n'est pas aisé de poser des hypothèses robustes et facilement modélisables, raison pour laquelle l'analyse de sensibilité dans le cadre de cette étude a été simplifiée.



5 Conclusion et limitations de l'étude

Les principales limitations identifiées sur cette étude sont les suivantes :

- Le projet HORIZEO s'étendrait des années 2020 aux années 2060. Les technologies représentatives du marché devraient évoluer sur cette période, la représentativité temporelle de l'étude est incertaine sur la durée du projet, notamment sur les scénarios de référence prospectifs. La prise en compte dans cette étude de mix électriques plus ou moins prospectifs ont permis d'assurer une analyse et une comparaison fiable entre le projet HORIZEO et des scénarios de référence sur les prochaines années.
- L'usage de l'électricité produite par le projet HORIZEO est hors du périmètre de l'étude. Selon l'usage de cette électricité, le scénario de référence pourrait varier. La prise en compte de différents points de comparaisons permet de couvrir un éventail assez large d'usage.
- Le périmètre du projet HORIZEO a exclu les systèmes de stockage d'énergie. Une analyse de sensibilité a permis de poser un premier calcul sur la prise en compte de batteries pour viabiliser le déploiement de l'usage de l'énergie solaire. Les résultats indiquent que le potentiel impact d'un système de stockage n'est pas au premier ordre pour cette étude et ne change pas les conclusions.
- Cette étude est mono-critère, seul l'impact sur le changement climatique est étudié. Dans le cadre du développement du projet, d'autres études environnementales sont menées afin d'identifier les impacts du projet sur son environnement, et de définir des mesures. Ces éléments sont présentés dans l'évaluation environnementale du projet.
- Cette étude ne prend pas en compte les flux de carbone biogénique qui sont calculé dans le rapport de l'INRAE.

L'objectif de l'étude est de répondre aux questionnements suivants :

Le parc HORIZEO permet-il de réduire l'impact carbone de la production d'électricité française ?

La réponse est oui : le parc photovoltaïque HORIZEO permet une production d'électricité dont l'empreinte carbone est plus basse que les différents mix énergétiques étudiés. Le parc HORIZEO permet de mettre à disposition sur le réseau français une électricité à **16,6 g CO₂ éq. / kWh**, soit 3 fois moins que le mix électrique actuel et un tiers de moins que le mix électrique à horizon 2030. En élargissant à horizon 2050, si la France suit le scénario N1 proposé par RTE, la production d'électricité française pourrait alors enfin tendre vers une empreinte carbone par kWh équivalente à la production du parc HORIZEO, mais qui arrivera plus de 20 ans après la date estimée de mise en service du projet HORIZEO.

La production d'aliments et d'électricité sur le pôle de production maraîchère et agrivoltaïque permettent-elles de réduire l'impact carbone de la consommation moyenne d'aliments en Gironde et d'électricité en France ?

La réponse est oui : les scénarios de référence ont une empreinte carbone plus élevée que le pôle de production maraîchère et agrivoltaïque HORIZEO.

Les principaux leviers de réduction d'impact identifiés pour le projet HORIZEO sont les suivants :

- Presque 60 % de l'empreinte carbone du projet HORIZEO est due aux modules photovoltaïques. L'achat de modules photovoltaïques à empreinte carbone plus faible, comme les potentiels futurs panneaux photovoltaïques français, est le levier au plus grand potentiel de réduction. Les premières estimations des panneaux français indiquent une baisse d'environ 10 % de l'empreinte carbone du projet HORIZEO.
- Les cadres des panneaux photovoltaïques représentent quant à eux environ 13 % de l'empreinte carbone totale. Ils sont aujourd'hui en aluminium, l'usage d'un autre métal pourrait permettre de réduire son impact. L'allègement du cadre en aluminium est également une piste de réduction.
- Toutes actions d'optimisation du rendement du parc (réduction des pertes, rendement des panneaux etc.) seraient également des leviers intéressants.

Références

- ADEME (2020).** Les émissions évitées, de quoi parle-t-on ? Disponible à : <https://librairie.ademe.fr/cadic/406/fiche-technique-emissions-evitees-2020-02.pdf?modal=false/>
- ADEME (2021).** Bilan GES : Centre de ressources sur les bilans de gaz à effet de serre. Base Carbone® mise à jour le 02/07/2021. Consulter la documentation : <https://www.bilans-ges.ademe.fr/>
- Broom (2020).** Corporate Power Purchase Agreements – The Preferred Route for Corporates to Secure Renewable Energy Supplies in a Decarbonized World. Disponible à : <https://www.ceelegalblog.com/2020/02/corporate-power-purchase-agreements-the-preferred-route-for-corporates-to-secure-renewable-energy-supplies-in-a-decarbonized-world/>
- Certisolis (2024).** Evaluation Carbone simplifiée ECS PPE2 N°029-2023_002
- CRE (2019).** Appels d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Cahier des charges. Disponibles à : <https://www.cre.fr/Documents/Appels-d-offres/appels-d-offres-portant-sur-la-realisation-et-l-exploitation-d-installations-de-production-d-electricite-a-partir-de-l-energie-solaire-et-situees-d/>
- Ecoinvent. (2023).** ecoinvent database v3.6 et v.3.9.1 Les inventaires et rapports sont disponibles dans le logiciel ACV SimaPro 9.1.1. Seulement les inventaires cut-off ont été utilisés. Disponible à : <http://www.ecoinvent.ch/>
- Jinko Solar.** Fiche Technique du module 66HL4M-BDV 600-625 W. Disponible à : <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/2024/2/9o3vx734yf1nj5no/209045400665d1b07e55b35.pdf>
- Le Quéré, C. et al. (2012).** The global carbon budget 1959e2011. Earth Syst. Sci. Data Discuss. 5, 1107-1157
- Miquel C. (2009).** Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental. Disponible à : https://www.photovoltaique.info/media/filer_public/36/fe/36fe92bb-d625-4712-abb4-47470c864208/pv_fab_envt_final_26082009.pdf
- Open Data (2020).** Production régionale mensuelle par filière (2014 à 2020) — Open Data Réseaux Énergies (ODRE) (reseaux-energies.fr). Disponible à : <https://opendata.reseaux-energies.fr/explore/embed/dataset/production-regionale-mensuelle-filiere/table/?disjunctive.region&sort=mois&location=5,46.76997,12.89795&basemap=jawg.light>
- RTE (2021).** Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France. Disponible à : https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/rapport_perspectives%20electriques_2021-2030.pdf
- RTE (2022)** Futurs énergétique 2050 – rapport complet. Disponible à : <https://rte-futursenergetiques2050.com/documents>



Annexe A – Empreinte carbone de la fabrication des panneaux

NEOEN a partagé le certificat ECS PPE2 N°029–2023_002 de l’empreinte carbone de panneau TOPCON de l’entreprise Jinko Solar. Le certificat a été édité par Certisolis en octobre 2023.

Pour les panneaux JKMxxxN–66HL4M–BDV, le certificat annonce une empreinte carbone de 427,402 kg éq CO₂/kWc pour un panneau de 615 Wc. Les caractéristiques du panneau sont présentées dans le tableau ci-dessous, issu du certificat :

Paramètre	Unité	Valeur
MG-Si	kg	0,65
Polysilicium	kg	0,65
Lingots	kg	0,65
Briques	kg	0,65
Plaquettes	m ²	2,52
Cellules	m ²	2,52
Modules	m ²	2,68
Verre	kg	26,80
Trempé	kg	26,80
Encapsulant	kg	5,16

Tableau 16 : Caractéristiques du module monocristallin de 615 Wc

67 % du polysilicium est vierge dont 37 % provient de Leshan en Chine et 30 % de Yulin en Chine, 33 % est recyclé et provient également de Leshan Chine. Les étapes de production sont également réalisées en Chine.

Le calcul suit la méthodologie du cahier des charges des appels d’offres PPE2 avec ACV.

Les coefficients G_i sont répertoriés ci-dessous :

Matière ou composant	G _i (kg CO ₂ éq. / kWc)
MG-Si	39,939
Polysilicium	106,993
Lingots	45,442
Briques	0,817
Plaquettes	12,541
Cellules	103,358
Modules	38,611
Verre	45,758
Verre trempé	7,408
Encapsulant	26,534

Tableau 17 : Coefficients G_i (kg CO₂ éq. / kWc) du module monocristallin de 615 Wc

La somme de ces coefficients G_i donne la valeur de 427,402 kg éq. CO₂/kWc utilisée pour l’empreinte carbone du projet HORIZEO.

Nota : la fabrication des boîtes de jonction et du cadre des panneaux n’est pas pris en compte dans cette valeur.

Annexe B – Modélisation de la batterie LFP

Pour l'analyse de sensibilité présentée au chapitre 4.3.2, la modélisation de la batterie LFP proposée par NEOEN au moment de débat public a été reprise. Cette annexe rappelle les hypothèses posées en 2021 et 2022 et les résultats.

Hypothèses sur les batteries

Le système de stockage batteries est caractérisé par :

- une capacité de stockage réel de 32 MWh (40 MWh avec 20 % d'énergie non utilisée, la décharge complète d'une batterie entraînerait en effet un risque d'usure prématurée de cette dernière)
- une puissance de 40 MW
- une durée d'exploitation de 2 x 15 ans (renouvellement des bloc-batteries à 15 ans)

L'hypothèse conservatrice prise pour la durée de vie des batteries est celle garantie par les fournisseurs : 15 ans (x 2). Cependant, les batteries pourraient être utilisées quelques années de plus avec une performance dégradée afin d'avoir une durée d'exploitation maximale sur le bail soit 37 ans (avec 2 x 18,5 ans) au lieu de 30 ans.

Le choix de conception n'étant pas encore finalisé, deux technologies de batteries sont étudiées :

- LFP pour Lithium Fer Phosphate à 0,12 MWh/tonne
- NMC pour Nickel Manganèse Cobalt à 0,20 MWh/tonne

Les différents composants du système batteries sont :

- les blocs-batteries de 40 MWh,
- 14 containers de 40 ft,
- 56 onduleurs de 1000 kW (4 par container),
- 14 transformateurs de 5150 kg (1 par container),
- 112 m de raccordement électrique entre les transformateurs et le Poste De Livraison (PDL),
- 21 m³ de béton pour le soubassement des transformateurs

Les frontières du système des batteries sont présentées dans la figure ci-dessous sur les 30 ans d'exploitation – avec un renouvellement total des blocs-batteries après 15 ans d'exploitation et sans renouvellement des autres composants du système :

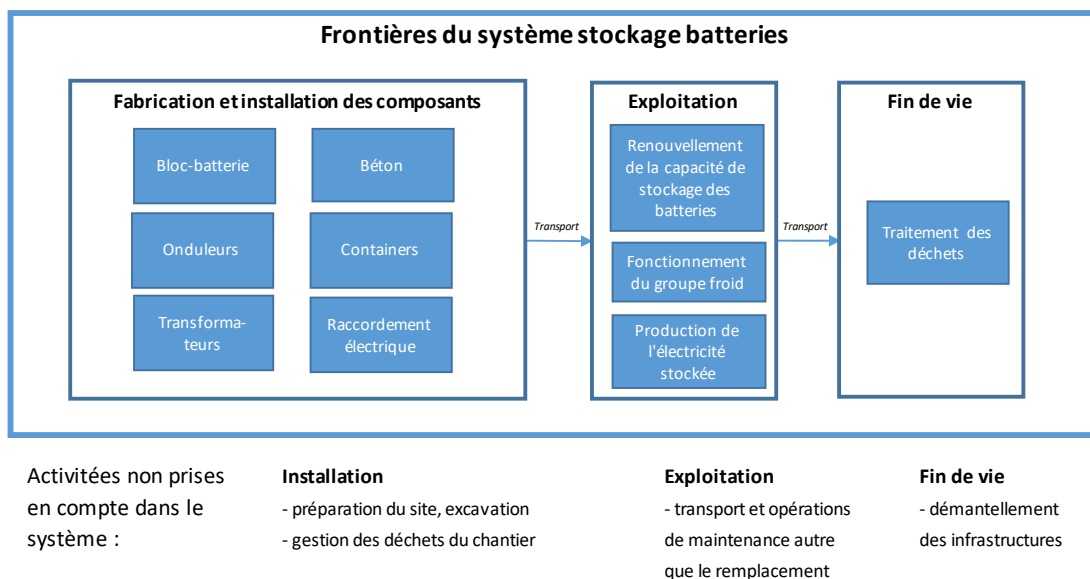


Figure 15 : Frontières du système des batteries

Les principales données relatives à la conception et à l'exploitation des batteries sont fournies par NEOEN à l'exception de l'empreinte carbone de la production des batteries. Ces valeurs sont issues d'une revue bibliographique (Peters, 2018) en moyennant l'impact de différentes batteries LFP et NMC tirées d'autres publications (Bauer, 2010 ; Majeau-Bettez, 2011 ; Zackrisson, 2010 ; Ellingsen, 2014).

Les inventaires de production des composants du système sont présentés dans les tableaux ci-après :

Inventaire pour les bloc-batteries	Unité	Quantité pour LFP	Quantité pour NMC	Inventaire - ecoinvent v3.6 cut-off	Commentaire
Flux de référence					
Batteries de 40 MWh x 2	t	667	400		Source : Neoen. Batterie de 40 MWh x 2 (renouvellement à 15 ans) à 0,12 MWh / t (LFP) et 0,2 MWh / t (NMC).
Intrants					
Emballage en carton	kg	2,38E+03	2,38E+03	Corrugated board box {RER} market for corrugated board box Cut-off, U	Calcul d'un emballage moyen (carton, plastique et palette) pour une batterie type Powerback (Tesla) extrapolé à la capacité de stockage.
Emballage en plastique	kg	8,34E+02	8,34E+02	Polyethylene, linear low density, granulate {GLO} market for Cut-off, U	
Mise en forme du plastique en doufine	kg	4,16E+02	4,16E+02	Polystyrene foam slab {GLO} market for Cut-off, U	
Palette en bois	p	7,99E+02	7,99E+02	EUR-flat pallet {GLO} market for Cut-off, U	
Transport amont des batteries en bateau	tkm	1,47E+07	8,99E+06	Transport, freight, sea, container ship {GLO} market for transport, freight, sea, container ship Cut-off, U	
Transport amont des batteries en camion	tkm	9,28E+04	5,68E+04	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Provenance des batteries LFP : Chine (source : Neoen). Distance en bateau : Bailianjing Poet (China) - Port Bordeaux-Verdon = 11540 nautiques (1 nautique = 1,852 km) Distance en camion : Port Bordeaux-Verdon - Saucats = 135 km
Sortants					
Emissions de CO2eq à la fabrication des batteries	kg	1,55E+07	9,12E+06	Carbon dioxide, fossil	Source : Peters, 2018. Emissions moyennes pour la fabrication de batteries par capacité de stockage : 194 kgCO2eq / kWh (LFP) et 114 kgCO2eq / kWh (NMC).

Tableau 18 : Inventaire de fabrication des batteries LFP et NMC (avec renouvellement au bout de 15 ans)

Inventaire pour la fabrication des autres composants	Unité	Quantité	Inventaire - ecoinvent v3.6 cut-off	Commentaire
Flux de référence				
Fabrication des autres composants d'une installation de stockage batterie de 40 MWh	p	1		14 containers, 56 onduleurs, 14 transformateurs, 112 m de câbles et 21 m3 de béton.
Intrants				
Containers	p	1,40E+01	Intermodal shipping container, 40-foot {GLO} market for Cut-off, U	Source : Neoen. Masse unitaire : 2300 kg.
Transport amont des containers en camion	tkm	1,61E+04	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Provenance des containers : France (source : Neoen). Distance moyenne en camion : France - Saucats = 500 km
Onduleurs de 500 kW	p	5,60E+01	Inverter, 500kW {GLO} market for Cut-off, U	Donnée de la base ecoinvent v3.6 cut-off la plus proche en terme de puissance. D'après Neoen, la donnée utilisée correspond a une technologie plus ancienne, des meilleures performances sont aujourd'hui accessibles à iso-masse. Les masses étant équivalentes (3 t pour les onduleurs Neoen et pour les onduleurs 500 kW d'ecoinvent) la donnée est supposée représentative d'un onduleur de 1000 kW de Neoen. 4 onduleurs par container (source : Neoen). Nb total d'onduleurs = 4 onduleurs x 14 containers
Transport amont des onduleurs en camion	tkm	2,18E+05	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Provenance des onduleurs : Vicenza, Italie (source : Neoen). Distance en camion : Vicenza - Saucats = 1300 km
Transformateurs	kg	2,18E+05	Transformer, high voltage use {GLO} production Cut-off, U	Source : Neoen. 1 transformateur de 5150 kg par container. Masse totale transformateurs = 5150 kg x 14 containers
Transport amont des transformateurs en camion	tkm	2,18E+05	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Provenance des transformateurs : Redon, France (source : Neoen). Distance en camion : Redon - Saucats = 500 km
Huile pour les transformateurs	kg	2,18E+05	Lubricating oil {RER} production Cut-off, U	Source : Neoen. 2 t d'huile dans les containers. Masse totale d'huile : 2 t x 14 containers
Câbles	m	2,18E+05	Cable, three-conductor cable {GLO} market for Cut-off, U	Source : Neoen. 8 m de câblage par transformateur raccordé aux PDL.
Béton	m3	2,18E+05	Concrete, 40MPa {RoW} market for concrete, 40MPa Cut-off, U	Source : Neoen. 2,7 m x 1,4 m x 0,40 m de béton par soubassement de transformateur (14).
Transport amont du béton en camion	tkm	2,18E+05	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Provenance du béton : France (source : Neoen). Distance moyenne en camion : France - Saucats = 500 km

Tableau 19 : Inventaire de fabrication des autres composants du système batterie

Pour l'exploitation de la batterie, sont considérés :

- 1,4 cycles de charge / décharge de 32 MWh par jour sur les batteries,
- 17 % de pertes d'énergie entre le stockage et la mise sur le réseau,
- un taux de dégradation linéaire entre l'année 1 et l'année 15 : jusqu'à -30 % pour le LFP et -20 % pour le NMC,
- une recharge de 25% de la capacité des batteries LFP en année 8 (et pas de recharge pour les NMC)
- un renouvellement total des bloc-batteries à 15 ans pour un fonctionnement de 15 ans supplémentaires

La quantité totale d'énergie délivrée est calculée à partir de la formule ci-dessous :

$$Energie_{tot} = \sum_{i=1}^{30} 32 \text{ MWh} \times 1,4 \times 365 \text{ jours} \times efficacit\acute{e}_i$$

Avec le paramètre $efficacit\acute{e}_i$ de la batterie à l'année i suivant les hypothèses énoncées ci-dessus.

L'énergie délivrée sur le réseau sur 30 ans ainsi calculée est 405 GWh pour la technologie LFP et 366 GWh pour la technologie NMC.

Les autres composants du système sont supposés avoir une durée de vie non limitante sur la durée de l'exploitation.

Inventaire pour l'exploitation des batteries	Unité	Quantité pour LFP	Quantité pour NMC	Inventaire - ecoinvent v3.6 cut-off	Commentaire
Flux de référence					
Exploitation des batteries sur 30 ans	p	1	1		
Intrants					
Production de l'énergie stockée	kWh	4,88E+08	4,42E+08	Electricity, medium voltage {FR} market for Cut-off, U	
Electricité consommée par le groupe froid	kWh	4,35E+07	4,35E+07	Electricity, medium voltage {FR} market for Cut-off, U	Source : Neoen Puissance nominale de soutirage de 72 W par groupe batterie de 3MW. Hypothèse de fonctionnement : 8h par jour, sur 6 mois, sur 15 ans x 2.
Fluide réfrigérant consommé	kg	2,12E+02	8,12E+01	Refrigerant R134a {RER} production Cut-off, U	Source : Ecoinvent Valeur de 7,67E-08 kg de réfrigérant utilisé pour 1 kg.jour dans la donnée "operation, reefer, cooling, 40-foot, high-cube, R134a as refrigerant" multiplié par la masse des batteries, onduleurs et transformateurs.
Sortants					
Emissions de CO2eq à la recharge de la capacité de stockage à mi-vie	kg	7,76E+06		Carbon dioxide, fossil	Source : Neoen. Pour les batteries LFP seulement : représente 25% des émissions carbone à la fabrication de la batterie. Pas de recharge à mi-vie pour les batteries NMC.

Tableau 20 : Inventaire de l'exploitation du système batterie

Aujourd'hui, les batteries doivent respecter un taux de recyclage minimum de 50 % de la masse. Pour être conservateur, ce taux de recyclage a été retenu pour la modélisation, les 50 % restants étant considérés traités comme suit :48 % incinéré et 2 % enfoui.

Les procédés utilisés pour la modélisation de la fin de vie des composants du système et les sources de chaque donnée sont explicités dans le tableau ci-après :

Inventaire pour la fin de vie des batteries	Unité	Quantité pour LFP	Quantité pour NMC	Inventaire - ecoinvent v3.6 cut-off	Commentaire
Flux de référence					
Recyclage des batteries	p	1	1		
Intrants					
Transport des différents composants jusqu'à l'usine de recyclage	tkm	4,32E+05	2,72E+05	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 Cut-off, U	Pour les batteries : société de recyclage SNAM dans l'isère à 600 km de Saucats (source : Neoen). Pour les autres composants : hypothèse de traitement des déchets à 50 km de Saucats. (source : rapport ADEME - Évaluation environnementale du recyclage en France).
Incinération de 48 % de la masse des batteries	kg	3,20E+02	1,92E+02	Municipal solid waste {FR} treatment of, incineration Cut-off, U	Source : Neoen Hypothèse de recyclage à 50 % des batteries (taux de valorisation minimum imposé), 48 % d'incinération et 2 % enterré en centre d'enfouissement spécialisé.
Enfouissement de 2 % de la masse des batteries	kg	1,33E+01	8,00E+00	Municipal solid waste {CH} treatment of, sanitary landfill Cut-off, U	

Tableau 21 : Inventaire de fin de vie du système batterie

Résultats de l’empreinte carbone des batteries

Les empreintes carbone du stockage et de la mise à disposition de l’énergie sur les batteries LFP et NMC ainsi que la production d’énergie du scénario de référence (hypothèse du mix électrique de la réserve d’énergie primaire à 50 % de nucléaire et 50 % de gaz naturel) sont données dans le tableau suivant.

Quantité d’énergie mise sur le réseau national français	Catégorie d’impact	Unité	Stockage sur les batteries LFP (cas #2 HORIZEO)	Stockage sur les batteries NMC (cas #1 HORIZEO)	Production d’énergie 50 % nucléaire 50 % gaz naturel
Pour 1 kWh					
1 kWh	IPCC GWP 100a	kg CO2 eq	1,68E-01	1,43E-01	4,78E-01
Sur l’ensemble du bail (30 ans d’utilisation)					
405 000 kWh	IPCC GWP 100a	kg CO2 eq	6,82E+07		1,94E+08
366 400 kWh	IPCC GWP 100a	kg CO2 eq		5,23E+07	1,75E+08

Tableau 22 : Empreintes carbone de l’utilisation des batteries et du scénario de référence

Analyse de contribution et comparaison des technologies NMC et LFP

Sur les 30 ans d’utilisation, pour la même quantité d’énergie envoyée sur le réseau national français, la technologie NMC permet de stocker l’énergie avec une empreinte 15 % plus faible que la technologie LFP.

La figure ci-dessous montre la contribution, sur l’ensemble du cycle de vie, des phases des différents composants du système batterie, d’une part pour la technologie NMC à gauche et d’autre part pour la technologie LFP à droite.

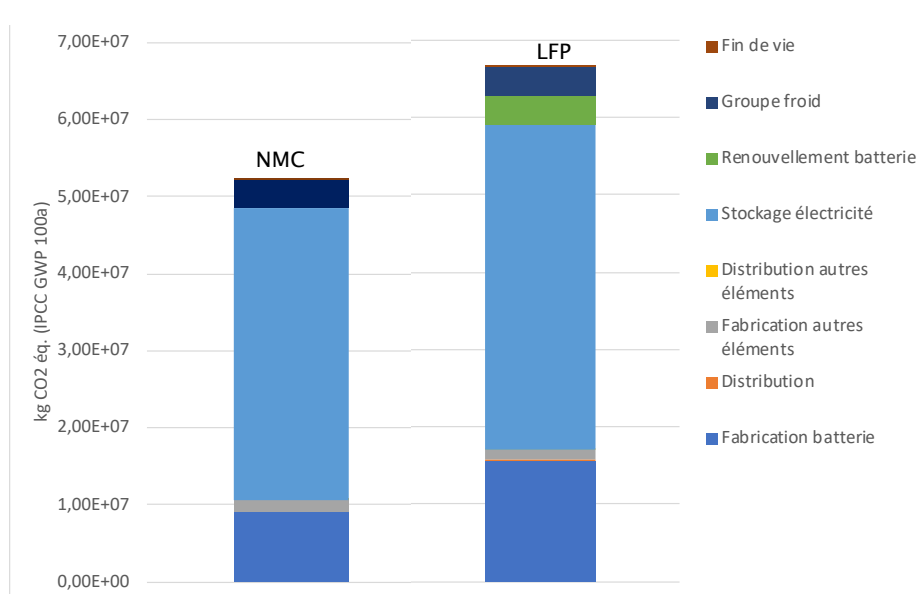


Figure 16 : Contributions à l’empreinte carbone des batteries NMC et LFP

Dans les deux cas, le contributeur principal, en bleu clair, est la production d’électricité stockée dans les batteries (plusieurs centaines de GWh sur 30 ans). Elle représente 60 à 70 % de l’empreinte carbone du système batterie sur l’ensemble de son cycle de vie, soit environ 38 000 à 42 000 tCO₂. Cette électricité provient du mix électrique français, modélisé par la

donnée d'ecoinvent v3.6 cut-off. Cet impact est amené à évoluer avec l'empreinte carbone du mix électrique français.

Le deuxième contributeur majoritaire est la fabrication des batteries, en bleu foncé, qui représente environ 60 % de l'empreinte carbone du système batterie sans compter la production de l'électricité stockée, soit entre 9 000 et 16 000 t CO₂. Pour rappel, l'impact de la fabrication des batteries est issu d'une revue bibliographique (Peters, 2018) moyennant les impacts de batteries LFP et NMC établis dans d'autres publications.

Pour une même puissance – ici 40 MW – la production de la technologie LFP a une empreinte carbone plus forte que la production de la technologie NMC. De plus, la capacité de la technologie LFP est rechargée de 25 % à 8 ans et à 23 ans (en plus du renouvellement total des bloc-batteries à 15 ans), la contribution associée est indiquée en vert sur le graphique, environ 4 000 tCO₂. L'empreinte carbone de la fabrication et du renouvellement de la technologie LFP est plus de deux fois plus élevée que celle de la technologie NMC. Malgré un stockage plus important d'énergie par les batteries LFP, la technologie NMC a une empreinte carbone 15 % plus faible par kWh d'électricité mise à disposition sur le réseau national français comme explicité dans le Tableau 22.

Les deux derniers contributeurs majoritaires, à hauteur de moins de 10 % sur l'ensemble du cycle de vie, sont la fabrication des autres composants (onduleurs, transformateurs, containers, béton) pour 1 400 tCO₂ et l'utilisation de groupes froids à l'exploitation du système pour quasiment 3 800 tCO₂.

Pour la fabrication des autres composants, la fabrication des onduleurs est le principal contributeur, à hauteur de 800 tCO₂. Les onduleurs ont été modélisés à partir d'un inventaire d'onduleur de 500 kW de 3 tonnes (ecoinvent v3.6), la technologie des onduleurs ayant évolué, l'impact pourrait être réduit.

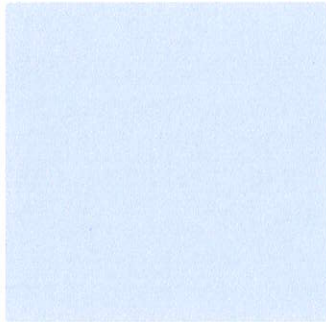
Pour l'utilisation des groupes froids, la consommation d'énergie contribue à la quasi-totalité de son empreinte. Les groupes froids ne fonctionnent que quand la température le nécessite en été. Afin d'être conservateur dans l'approche, la quantité d'énergie nécessaire a été majorée en comptant 8 h de fonctionnement par jour 6 mois par an sur 15 ans, à la puissance nominale des groupes.

Les étapes de distribution des composants et de fin de vie sont négligeables sur l'ensemble du cycle de vie, la somme des deux phases contribuant à moins de 1 % de l'empreinte carbone, environ 200 tCO₂.

Revue critique de l'étude

« Empreinte carbone du projet HORIZEO »

Rapport complet de revue critique



Auteurs

Bernard DE CAEVEL

Gisèle BOVO (Certisolis)

Document pour

NEOEN et Engie

Contact

+32 2 420 28 23

contact@rdcenvironment.be

Date

Février 2025

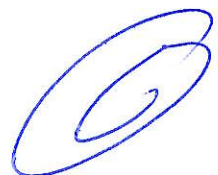


Table des matières

Table des matières	2
Introduction.....	3
1 Conformité aux normes ISO 14040-44	4
1.1 Evaluation générale	4
1.2 Evaluation du niveau de conformité à l'ISO.....	5
2 Historique des évaluations intermédiaires et modifications.....	7
3 Principales modifications apportées suite aux remarques du panel	8



Introduction

Gingko 21 a réalisé un bilan carbone (ACV réduite à la catégorie changement climatique) pour NEOEN et Engie sur un projet de parc photovoltaïque nommé HorizeO.


Les objectifs du travail de revue critique sont d'évaluer la conformité aux normes ISO 14040 :2006 et ISO 14044 :2006.

La vérification inclut :

- La description des objectifs et du public cible
- Les choix de modélisation et de données en accord avec les objectifs
- Les calculs (par sondage), le choix des résultats présentés, la complétude et la pertinence de l'analyse des résultats et de l'interprétation
- La pertinence des analyses de sensibilité et d'incertitude
- La pertinence des conclusions

Le rapport final de revue critique porte sur la version reçue le 8 janvier 2025 appelé « 2025-SAUCATS-GINGKO21-BilanCarbone-Rapport-janvier 2025 ».

Le travail de revue critique a été réalisé par Bernard DE CAEVEL (RDC Environnement) et Gisèle BOVO (Certisolis).



3

1 Conformité aux normes ISO 14040-44

1.1 Evaluation générale

Les normes ISO 14040 :2006 et ISO 14044 :2006 établissent les principes et exigences relatives à la réalisation d'une analyse du cycle de vie comprenant :

- a) la définition des objectifs et du champ de l'étude ACV ;*
- b) la phase d'inventaire du cycle de vie (ICV) ;*
- c) la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie (ACVI) ;*
- d) la phase d'interprétation du cycle de vie ;*
- e) la communication et la revue critique de l'ACV ;*
- f) les limitations de l'ACV ;*
- g) la relation entre les phases de l'ACV ; et*
- h) les conditions d'utilisation des choix de valeur et des éléments facultatifs. »*

Sur base de l'analyse effectuée, **le panel atteste que le rapport est conforme aux prescriptions des normes ISO 14040 :2006 et ISO 14044 :2006, étant entendu que cette déclaration de conformité tient compte de la restriction du champ de l'étude à une seule catégorie d'impact : le changement climatique.**

L'ISO 14044 dit (4.4.2.2.1) : « *La sélection des catégories d'impact, des indicateurs de catégorie et des modèles de caractérisation doit être justifiée et cohérente avec les objectifs et le champ de l' ACV. La sélection des catégories d'impact doit refléter un ensemble complet de problèmes environnementaux relatifs au système de produits étudié, en tenant compte des objectifs et du champ de l'étude.* »

Comme le champ de l'étude soumise à la revue critique se limite à la seule empreinte carbone du projet HORIZEO, l'ACV a été centrée sur la seule catégorie d'impact « changement climatique », ce qui est conforme au champ de l'étude.

Cela signifie que toute communication de l'étude doit porter sur l'empreinte carbone (ou « changement climatique ») et pas sur l'empreinte environnementale.

Cette revue critique de conformité à ces normes garantit :

- *« que les méthodes utilisées pour réaliser l'ACV sont cohérentes avec les normes,*
- *que les méthodes utilisées pour réaliser l'ACV sont valables d'un point de vue scientifique et technique,*
- *que les données utilisées sont appropriées et raisonnables par rapport aux objectifs de l'étude,*
- *que les interprétations reflètent les limitations identifiées et les objectifs de l'étude,*
- *que le rapport d'étude est transparent et cohérent »*

L'attention du lecteur est attirée sur le besoin de bien prendre en compte les nuances apportés dans les conclusions pour une bonne interprétation des résultats.

Pour le panel de revue critique
Bernard De Caevel

1.2 Evaluation du niveau de conformité à l'ISO

Le tableau suivant reprend les principaux points de la norme ISO 14 044 :2006.

Point méthodologique de la norme	Conformité à l'ISO ?
Objectif de l'étude (chap. 4.2.2)	
Stipule l'application envisagée	OUI Les applications envisagées sont précisées dans le rapport d'étude
Stipule les raisons conduisant à réaliser l'étude	OUI Les raisons qui ont conduit à réaliser l'outil sont précisées.
Stipule le public concerné	OUI
Stipule s'il est prévu que les résultats soient utilisés dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public	OUI
Définition du champ de l'étude (chap. 4.2.3)	
Décrit les systèmes étudiés : fonction, caractéristiques de performance	OUI
Décrit l'unité fonctionnelle	OUI
Décrit la frontière du système (inclusions et exclusions)	OUI
Décrit les règles d'affectation	Les étapes de cycle de vie prises en compte sont décrites dans le rapport. OUI Les règles d'affectation sont décrites
Décrit la méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impact (catégories d'impacts)	OUI Les catégories d'impacts sont décrites et leur choix est justifié.
Décrit les choix de valeurs et les éléments facultatifs (exemple : la modélisation de l'électricité, la comptabilité du carbone biogénique, la régionalisation des impacts)	OUI
Décrit les exigences de qualité des données	OUI
Décrit le type de revue critique, le cas échéant	OUI
Décrit les limites	OUI
Décrit le critère de coupure	OUI
Inventaire du cycle de vie (4.3)	
Recueil des données d'activité et leur source	OUI

Décrit les hypothèses et approximations	OUI
Décrit les données d'inventaire et leur source	OUI
Identifie les proxys utilisés	OUI
Tous les modes opératoires de calcul doivent être explicitement documentés et les hypothèses formulées doivent être clairement mentionnées et expliquées.	OUI
Evalue la qualité des données	OUI
Décrit des données de l'analyse de sensibilité	OUI
Evaluation de l'impact (4.4) et interprétation du cycle de vie (4.5)	
Comprend une sélection des catégories d'impact, des indicateurs de catégorie et des modèles de caractérisation	OUI
Comprend un calcul des résultats d'indicateurs de catégorie (caractérisation).	OUI
Comprend une identification des enjeux significatifs basée sur les résultats des phases de l'ICV et l'ACVI d'une ACV	OUI
Contient une analyse de sensibilité tenant compte des limitations identifiées lors de la phase d'inventaire	OUI
Contient une analyse d'incertitude pour les études utilisées dans les affirmations comparatives destinées à être divulguées au public.	OUI
Comprend des conclusions, limitations et recommandations	OUI



2 Historique des évaluations intermédiaires et modifications

Le travail de revue s'est déroulé en parallèle de l'étude. L'étude a été étendue sur une durée très longue en raison des modifications du projet qui ont entraîné un gel de l'étude pendant une longue durée. :

- Réception de la v5 le 26/08/2021
- Envoi des commentaires du panel le 20/09/2021



3640 Engie RC ACV
plateforme éner - v1

- Discussion des commentaires le 22/09/2021
- Réception de la v7 et de l'Excel avec les réponses aux commentaires le 20/10/2021
- Discussion téléphonique le 03/11/2021
- Réception du rapport « 20220106-SAUCATS-GINGKO21-BilanCarbone-Rapport-VF » le 07/01/2022
- Envoi des commentaires du panel sous forme d'email le 31/01/2022
- Réception du rapport « 20220221-SAUCATS-GINGKO21-BilanCarbone-Rapport-VF » le 21/02/2022
- Envoi des commentaires du panel sous forme d'email le 14/04/2022
- Échanges d'emails 24/11/2022 ; 03/02/2023

Projet en pause

- Réception du rapport « 2024-SAUCATS-GINGKO21-BilanCarbone-Rapport» le 30/04/2024
- Envoi des commentaires du panel sous forme d'email le 31/05/2024
- Envoi des commentaires du panel sous forme d'Excel le 18/06/2024



HorizeO - RC
2024-06-24.xlsx



Copie de HorizeO BC
- RC 2024-05-31.xlsx

- Discussion Teams le 19/06/2024
- Réception du rapport « 2024-SAUCATS-GINGKO21-BilanCarbone-Rapport-1-aout-2024» et de l'Excel avec les réponses aux commentaires le 18/17/2024 et une version amendée 01/08/2024 suite à des remarques par email (22/07/2024)
- Envoi des commentaires du panel sous forme d'Excel le 17/09/2024



Horizeo - RC
2024-07-31 - réponse

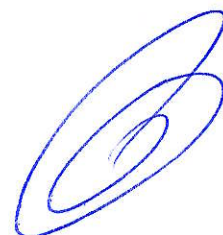
- Différents échanges d'emails
- Réception du rapport « 2025-SAUCATS-GINGKO21-BilanCarbone-Rapport-janvier 2025» le 08/01/2025

3 Principales modifications apportées suite aux remarques du panel

Les principales modifications apportées au cours de cette revue menée en parallèle de l'étude sont :

- Corrections de données de modélisation
- Adaptation de l'unité fonctionnelle
- Adaptation de la durée prise en compte (toute la durée de vie du projet au lieu de 1 an)
- Adaptation du mix électrique de référence
- Apport de nuances dans les conclusions pour tenir compte des incertitudes et des besoins additionnels de stockage d'énergie.

Note : le panel avait recommandé le découplage de l'évaluation des projets annexes (data center, production d'hydrogène...) de celle du projet principal (parc photovoltaïque). Mais ce dernier point n'a porté que sur le projet initial et n'est plus pertinent pour le projet final où le data center et la production d'hydrogène ont été abandonnés : il reste le parc photovoltaïque et les parcelles agri-photovoltaïques.





Research Development & Consulting Environment

EXPERTS ET SOLUTIONS EN DÉVELOPPEMENT DURABLE
rdcenvironment.be - contact@rdcenvironment.be

Adresse

Av. Gustave Demey, 57
1160 Bruxelles, Belgique

Téléphone

+32 2 420 28 23

Web Online

contact@rdcenvironment.be
www.rdcenvironment.be

