

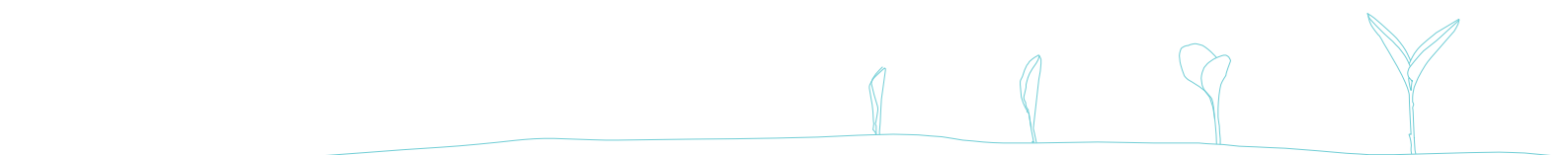


NEOEN



Synthèse Empreinte carbone du projet HORIZEO

Janvier 2026



Claire REBOURG
claire.rebourg@gingko21.com

Table des matières

Table des matières.....	2
1 Contexte.....	3
2 Hypothèses et méthodes.....	3
2.1 Volet 1 - Empreinte carbone de la construction et de l'exploitation du projet	3
2.2 Volet 2 - Empreinte carbone du défrichement.....	7
3 Résultats et interprétations.....	10
3.1 Volet 1 - Empreinte carbone de la construction et de l'exploitation du projet	10
3.2 Volet 2 - Empreinte carbone du défrichement.....	13
4 Conclusions des travaux (volet 1 et volet 2)	17



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.

ENGIE et NEOEN ont engagé une étude de l'impact d'HORIZEO sur le changement climatique dès son lancement en 2020. L'étude comprend 2 volets :

- **Volet 1 : L'analyse de l'empreinte carbone de la construction et de l'exploitation du projet** (de la fabrication des composants au démantèlement d'HORIZEO), réalisé par Gingko 21, cabinet de conseil en éco-conception, bureau d'études indépendant. 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 volet a fait l'objet d'une revue critique par un panel d'experts indépendants.
- **Volet 2 : L'analyse de l'empreinte carbone du défrichement**, réalisé par l'INRAE, Institut National de la Recherche Agronomique. Ce deuxième volet comptabilise principalement le carbone biogénique de la biomasse et du sol. Une comparaison est également réalisée avec les boisements compensateurs.

Ce document présente la synthèse des deux études (celle de Gingko 21 et celle de l'INRAE). L'ensemble des hypothèses, méthodes et résultats des travaux sont détaillés dans les rapports :

- **Volet 1** : « *Empreinte carbone du projet HORIZEO* »
- **Volet 2** : « *Bilan de carbone du déboisement lié à l'installation du projet de parc photovoltaïque HORIZEO de Saucats* ».

2 Hypothèses et méthodes

2.1 Volet 1 – Empreinte carbone de la construction et de l'exploitation du projet

Ce volet a été réalisé par Gingko 21 en suivant la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) des normes ISO 14040 et ISO 14044 centrée sur un unique indicateur environnemental : le changement climatique.

La modélisation a été réalisée avec le logiciel Simapro 9.1.1. Les calculs ont été fait à partir de la méthode Global Warming Potential (GWP) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2021 100 years et les résultats sont exprimés en kg CO₂ eq.



L'étude a comparé les impacts du projet HORIZEO à ceux d'un scénario de référence (avec plusieurs variantes).

Description des scénarios

Le scénario HORIZEO est constitué de différentes composantes :

- Un parc photovoltaïque de 818,2 MWc de puissance de panneaux solaires (puissance crête) délivrant **35 491 GWh d'électricité** sur le réseau sur les 37 ans d'exploitation
- 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. Ce pôle devrait produire **3253 t de fruits et légumes** et de **57 GWh d'électricité** sur le réseau sur les 37 ans d'exploitation sur une superficie de 5 ha de cultures.
- Les parcelles non aménagées et conservées en exploitation sylvicole.
- Les parcelles non aménagées et gérées uniquement pour la biodiversité. Ces parcelles ne seront plus exploitées pour la production de bois. Certaines seront défrichées dans le but de recréer des milieux ouverts et semi-ouverts, tandis que d'autres resteront boisées mais non exploitées jusqu'au démantèlement du parc photovoltaïque.

Le **scénario de référence** a été établi de façon à être représentatif du marché moyen en France. Il est dimensionné pour fournir les mêmes services que le projet HORIZEO. Il correspond au scénario 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 soit :
 - o une production agricole par le mix moyen de consommation français actuel modélisé par les mixes de consommation d'Agribalyse 3.0
 - o une production d'électricité par un mix électrique de référence. 4 mix électriques ont été étudiés donnant lieu à 4 variantes du scénario de référence. Ces variantes permettent de couvrir les évolutions présumées du mix électrique français. Soit :
 1. le **mix électrique moyen français actuel** modélisé par la donnée « Électricité/2022 – mix moyen/consommation » de la Base Empreinte de l'ADEME à 52 gCO₂eq / kWh.
 2. un **mix électrique prospectif à horizon 2030** correspondant à l'atteinte des objectifs de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) dans le cadre de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). Les prévisions anticipent le non-recours au fioul et au charbon dans la production d'énergie électrique.



3. un **mix électrique prospectif à horizon 2050** correspondant au scénario N1 (parmi les 6 scénarios prospectifs proposés par RTE¹). 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'État au moment de la rédaction du présent rapport (3 à 4 paires d'EPR2).
4. et un **mix électrique 100 % fossile** : 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.

Le tableau suivant présente la composition des mix électriques modélisés pour les variantes du scénario de référence. La donnée d'électricité Base Empreinte utilisée pour modéliser le mix électrique moyen actuel (variante 1) ne précise pas sa composition. La composition du mix électrique RTE 2019 en est proche.

Tableau 1 : Mix énergétiques des scénarios de référence pour la production d'électricité

	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

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

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.

Pour représenter ces scénarios, la modélisation est basée sur des données collectées auprès d'ENGIE et de NEOEN ainsi que sur les inventaires des bases de données ecoinvent 3.9.1 cut-off (et Agribalyse 3.0.1). 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.

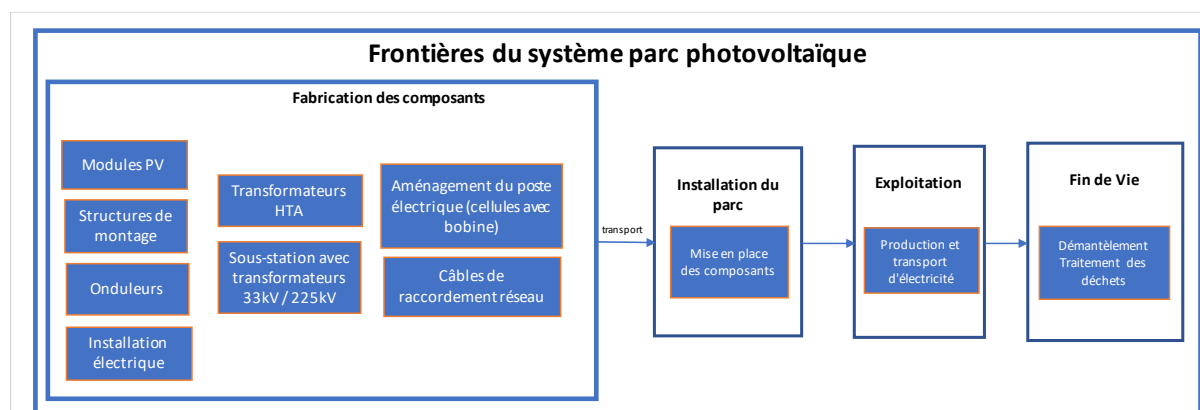
¹ <https://rte-futursenergetiques2050.com/scenarios/n1>

Principales hypothèses sur le parc photovoltaïque HORIZEO

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.



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

Les fournisseurs de panneaux photovoltaïques ne sont pas encore définis. Cependant, ENGIE et NEOEN visent des panneaux types correspondants aux caractéristiques suivantes présentes aujourd'hui sur le marché :

- 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 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 eq. / kWc**. Cette donnée a été certifiée par Certisolis. La méthode de calcul suivie est la méthode PPE2 avec ACV.

Pour le calcul de l'empreinte carbone, les structures et les câbles ont été considérés comme provenant d'Europe. Les panneaux photovoltaïques, onduleurs et transformateurs ont quant à eux, de façon conservatrice, été considérés comme provenant de Chine.

L'option de s'approvisionner également auprès de fabricants de modules européens est envisagée. 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 disponible au jour de la rédaction du rapport et transmise par NEOEN : **360 kgCO₂eq / kWc**.

2.2 Volet 2 – Empreinte carbone du défrichement

Ce volet a été réalisé par l'INRAE en se basant sur un modèle représentant le cycle du carbone en forêt et qui a été adapté pour représenter un parc photovoltaïque enherbé.

Principales hypothèses sur le défrichement

Le périmètre concerné par le déboisement concerne 1062 ha pour un total de 1945 ha, le reste est constitué de :

- terrains boisés conservés en l'état,
- corridors boisés ou non,
- zones ouvertes couvertes de Molinie
- et de zones diverses² : lagune, lac, ball-trap. Le réseau de drainage forestier actuel est considéré conservé en l'état après l'installation du parc.

² Certaines de ces zones, bien que non boisées ou qui resteront boisées dans les faits, sont néanmoins comprises dans l'autorisation de défrichement conformément à la réglementation

Données du Groupement forestier	Hypothèses retenues pour la modélisation
Dessouchage (au maximum 1 an après la coupe rase). Valorisation énergétique des souches par Dalkia (site <i>Smurfit</i> Biganos) pour les arbres dont la circonférence au pied de l'arbre est supérieure à 1.0 m sur écorce (soit un diamètre de 0.30 à 0.35 m sous écorce).	Les souches des arbres coupés sont broyées et enfouies sur place.
Destination du bois coupé : – Trituration 10 à 20% – Petit sciage : 10 à 20% - caisse palette – Le reste : sciage / déroulage	Le travail de valorisation du bois coupé et la durée de vie des produits ne sont pas considérés dans cette modélisation.
Les parties non exportées (aiguilles et branches de moins de 7 cm de diamètre) sont laissées sur place, broyées et enfouies. Le sol est nivelé par passage d'un rouleau lourd.	La donnée du groupement forestier est prise en compte telle quelle dans la modélisation.

L'occupation des sols du périmètre est supposée la suivante :

- La surface défrichée est de 1178,7 ha comportant :
 - 45 ha de corridors
 - 263 ha dédiés à l'installation d'une prairie de graminées (lande à molinie) fauchée tous les trois ans.
 - 64,7 ha conservés ras par des fauches bisannuelles
 - 682 ha dotés de panneaux solaires, avec une fauche annuelle.
 - 117 ha de pistes et 6,8 ha couverts de diverses occupations non végétalisées
- L'aménagement de la zone non défrichée (766 ha) résultera en l'occupation suivante :
 - 71 ha de corridors boisés
 - 637,8 ha de peuplements de pins conduits en sylviculture intensive dont 105,5 ha seront débroussaillés tous les 5 ans, le reste, 532 ha, à chaque coupe ou éclaircie soit aux âges de 5, 15, 20 et 28 ans, cette dernière intervention ayant lieu avant la coupe finale.
 - 53,5 ha de pistes
 - 3,5 ha laissés en airial

L'approche adoptée, dite « net-net », conduit à comparer les stocks et flux de carbone biogéniques de 2020 à 2100 entre les deux alternatives suivantes :

- Construction et fonctionnement de HORIZEO de 2024 à 2100, période théorique retenue pour ce calcul, appelée « Projet ».
- Maintien de l'état boisé et conduite des peuplements de pins existants selon une sylviculture en futaie à courte rotation (30 ans).

L'étude repose sur l'expertise acquise par l'INRAE sur le cycle du carbone des écosystèmes forestiers, les forêts de Pin maritime notamment, et sur la projection sur la période 2020 à 2100 des flux et stocks de carbone d'origine biogénique du projet. Cette projection a été effectuée avec un modèle informatique qui intègre les connaissances disponibles sur le cycle

du carbone en forêt, dans la biomasse et le sol et en utilisant des données climatiques scénarisées sur cette période.

Scénarios climatiques

Trois scénarios ont été appliqués sur la France à partir des scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5, scénarios utilisés lors du 5e rapport du GIEC paru en 2014 (Moss et al. 2010). Ce sont les trois scénarios disponibles à une résolution suffisante. Ils constituent des scénarios de référence de l'évolution du climat sur la période 2006–2100 (Tableau 2). Le RCP 8.5 est le plus pessimiste (réchauffement global moyen d'environ +4°C à 5°C) et le scénario RCP 2.6 est le plus optimiste (réchauffement global moyen d'environ +1,5°C à 2°C), les cartographies proposées sur le portail DRIAS donnent un aperçu des climats correspondants.

Dans le cadre de ce projet seuls les scénarios RCP 4.5 et 8.5 ont été utilisés, le scénario 2.6 paraissant peu réaliste dans le contexte géopolitique actuel.

Les simulations effectuées sont basées sur la régionalisation par Arpege–Aladin des scénarios climatiques sélectionnés, les RCP 4.5 et 8.5. basée sur la régionalisation ADAMONT des scénarios climatiques.

Le scénario RCP 8.5 paraît être la tendance la plus vraisemblable. Pour cette synthèse, seuls les résultats du scénario climatique RCP 8.5 sont présentés.

Précisions sur les hypothèses

Pour simuler l'évolution des peuplements forestiers du périmètre du projet, le modèle INRAE « GO+ » (Moreaux et al. 2011, 2020) a été utilisé. Il décrit la forêt de Pin maritime selon une approche à trois compartiments, les arbres, la végétation du sous-étage et le sol. Ce modèle a été utilisé notamment pour la simulation des effets sur la forêt française métropolitaine de différents scénarios climatiques et sylvicoles (Roux et al. 2020), le calcul du bilan de carbone d'autres installations photovoltaïques en Gironde et Lot-et-Garonne ou la modélisation de l'impact d'aménagements hydrauliques sur les peuplements de Pin maritime du Médoc.

La végétation sous les panneaux est considérée comme spontanée, formée d'un peuplement dominé typiquement par des graminées de Lande humide comme la Molinie (*Molinia coerulea* Moench.) qui correspond bien à la végétation présente sur le site.

L'évolution du stock de carbone du sol est simulée par le modèle GO+ avec le modèle de sol Roth-C et son adaptation aux sols forestiers.

Les opérations sylvicoles comme la préparation du sol, les débroussaillages, les récoltes, le débardage et le transport aux unités de transformation primaire (scierie, usine papetière) s'accompagnent de consommation de fuel et d'émissions de carbone fossile. Pour compléter le bilan en carbone d'origine biogénique effectué dans notre étude, nous avons pris en compte ces émissions de carbone fossile inhérentes à la gestion des peuplements considérés.

Les émissions liées à la machinerie utilisée pour la fauche de la végétation sous panneaux ont été également prises en compte.

S'agissant de la sylviculture, une version intensive a été retenue, basée sur les modalités de gestion des boisements sur le groupement forestier du Murat avec une durée de rotation de



30 ans, deux dépressages, une seule éclaircie à 18 ans. Les branches et les troncs sont récoltés. La croissance initiale est supposée très rapide (variété biomasse, fertilisation).

La végétation herbacée sous les panneaux solaires est fauchée chaque année à une date fixée au 15 octobre avec une faucheuse mécanique. Cette opération n'est pas supposée affecter le sol lui-même et la biomasse fauchée est laissée sur place. Il n'est pas apporté de fertilisation et le réseau de drainage du périmètre reste inchangé. Le paramétrage de la vidange et de la recharge de la nappe tel que calé sur les données du site du Bray (1987–2008) situé sur la commune voisine de Cestas a été appliqué tel quel.

3 Résultats et interprétations

3.1 Volet 1 – Empreinte carbone de la construction et de l'exploitation du projet

L'empreinte carbone de la construction à la fin de l'exploitation du projet (volet 1) résulte de la concaténation des résultats d'impact du parc photovoltaïque et du pôle de production maraîchère et agrivoltaïque.

Le tableau ci-dessous présente le résultat du volet 1 (soit 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 (selon les 4 variantes du mix électrique).

Tableau 2 : Empreintes carbone du cycle de vie d'HORIZEO et des références en million de kg de CO₂ éq.

	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

L'empreinte carbone du projet d'HORIZEO (volet 1) 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-après 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 :

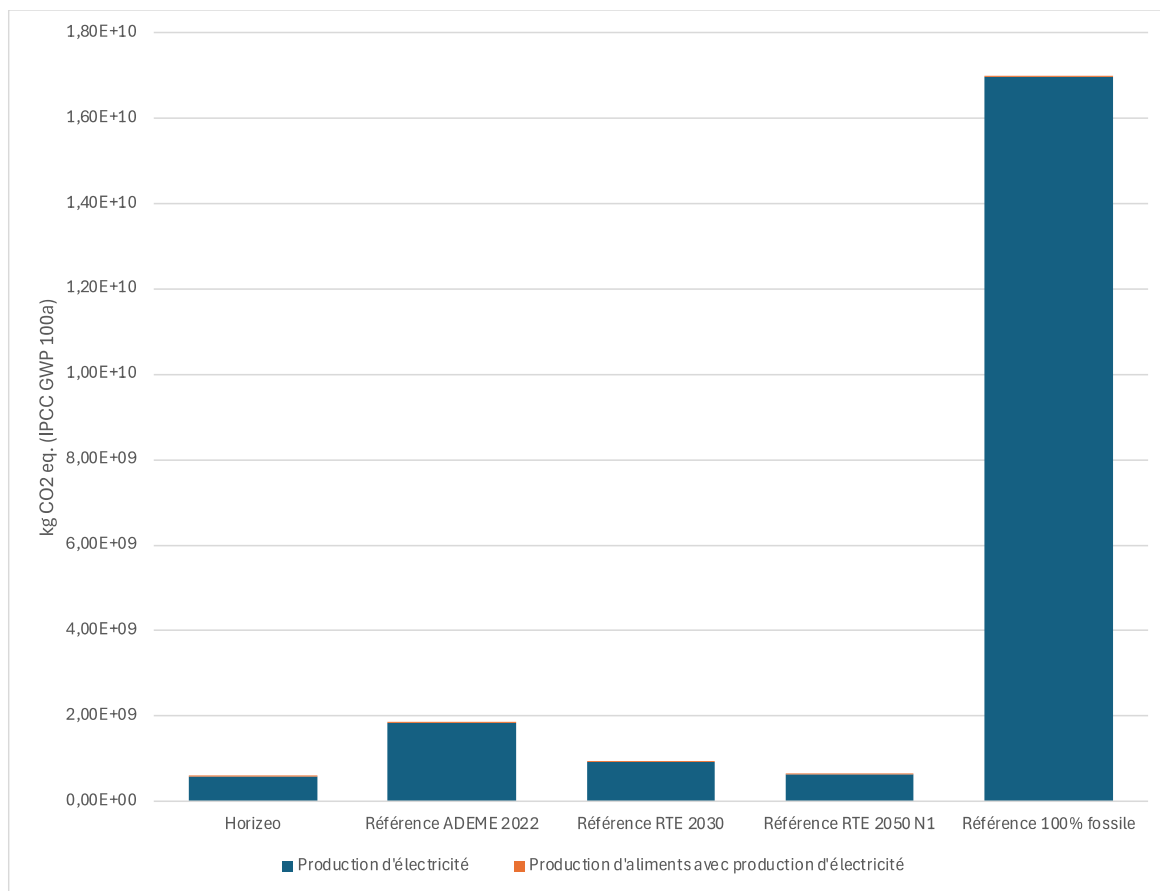


Figure 1 : Contributions à l'empreinte carbone pour HORIZEO et les scénarios de référence sur 37 ans d'exploitation (volet 1)

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

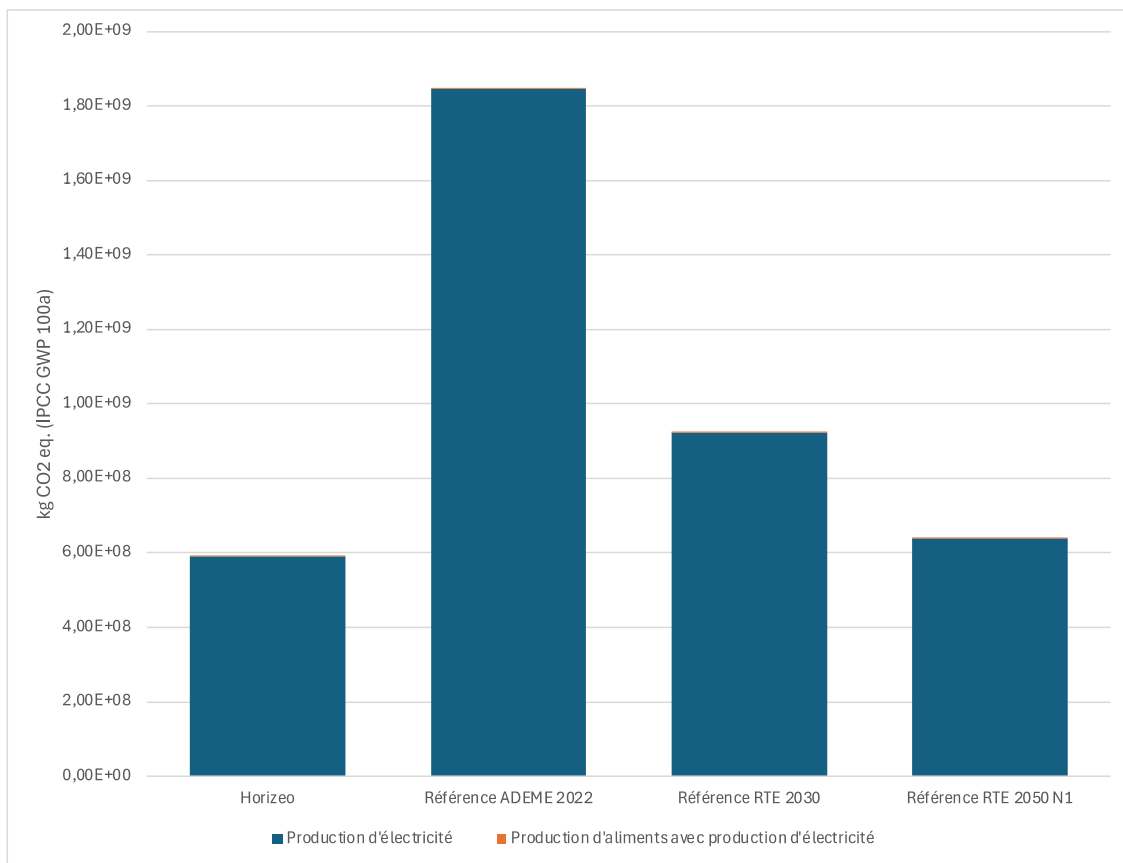


Figure 2 : Zoom des contributions à l'empreinte carbone pour HORIZEO et les scénarios de référence sur 37 ans d'exploitation (volet 1)

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.

Sur le parc photovoltaïque, plus de 70% de l'impact sur le changement climatique (volet 1) est dû à la production des modules photovoltaïque avec le cadre en aluminium. Plus spécifiquement, la part d'impact des modules photovoltaïques (sans le cadre en aluminium) est de 59 % soit environ 350 mille tonnes de CO_2 . La fabrication des cadres en aluminium des panneaux représente 14 % de l'impact.

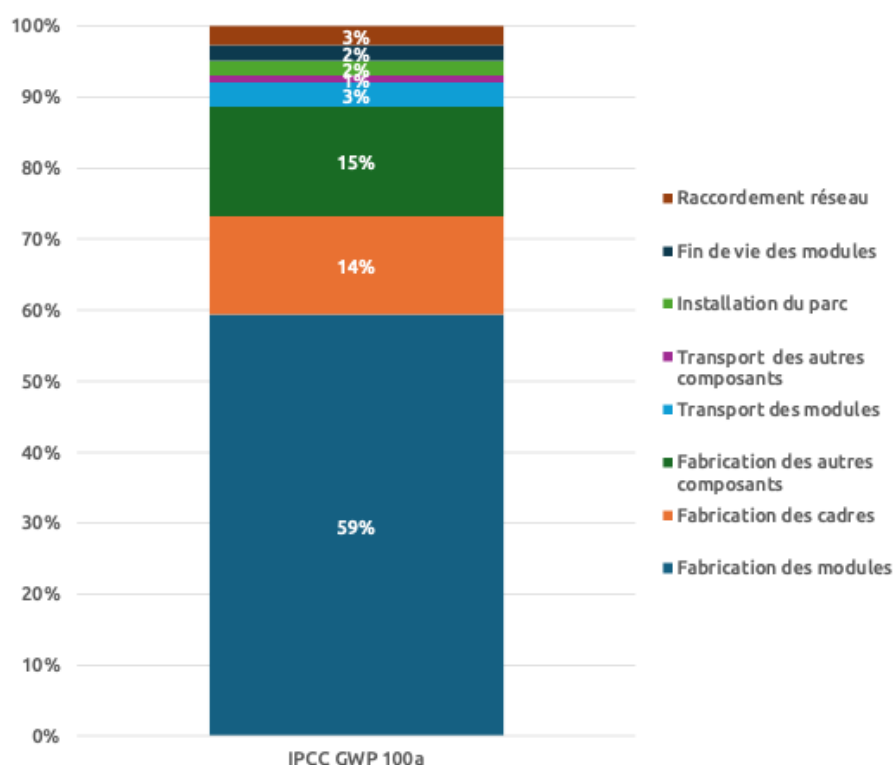


Figure 3 : Contributions à l'empreinte carbone du parc photovoltaïque HORIZEO

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.

3.2 Volet 2 – Empreinte carbone du défrichement

Nous avons calculé les stocks de carbone de la biomasse et de la matière organique dans trois composantes :

- la biomasse sur pied (arbres, sous-étage, végétation sous panneaux) ;
- le carbone du sol qui inclut la matière organique de la litière, des résidus de récolte, de l'humus et du sol jusqu'à une profondeur de 0,8m et inclut donc l'horizon d'« alios » ;
- le stock de carbone dans les produits récoltés et exportés (troncs et branches selon l'ITS appliqué).

Tableau 3 : Stocks de carbone dans le périmètre intégral du projet HORIZEO et de la forêt de référence pour quatre périodes d'amortissement et sous le scénario climatique RCP8.5. Les valeurs de stocks sont en tonnes de carbone pour l'ensemble du périmètre. Le déficit annuel calculé est exprimé par hectare.

RCP 8.5						
Stock de carbone (tC)						
		2026	2036	2046	2056	2066
Horizeo	Biomasse	64 664	56 547	45 182	55 379	59 379
	Sol	177 831	159 094	147 148	142 191	128 911
	Récolte	20 356	29 875	58 869	71 317	88 261
Forêt de Référence	Biomasse	64 664	104 063	137 508	145 250	120 236
	Sol	177 831	170 388	179 602	177 288	175 135
	Récolte	-	43 383	106 251	159 258	242 337
Différence brute (tC)						
	Biomasse	-	47 516	92 326	89 871	60 857
	Sol	-	11 294	32 454	35 097	46 224
	Récolte	- 20 356	13 508	47 381	87 941	154 077
Déficit (tC ha ⁻¹ an ⁻¹)						
	Biomasse	-	2.44	2.37	1.54	0.78
	Sol	-	0.58	0.83	0.60	0.59
	Total		3.02	3.21	2.14	1.38
	Récolte		0.7	1.2	1.5	2.0

Concernant le bilan du carbone du sol, celui-ci s'explique par le fait que le couvert forestier apporte au sol une masse annuelle de matière organique composée d'aiguilles, feuilles et racines mortes, bourgeons, branches mortes, ainsi que des troncs d'arbres morts et des souches et racines grossières des arbres coupés lors des éclaircies et coupes finales. Cet apport représente au total entre 7 et 9 tC.ha⁻¹an⁻¹ suivant le mode de gestion et les composantes de la biomasse laissées sur place : aiguilles, branches, souches. Après installation du parc photovoltaïque, l'apport de carbone organique au sol est réduit à la litière de la végétation herbacée et aux rémanents laissés au sol après chaque fauche, soit en moyenne 2.5 à 3.5 tC ha⁻¹an⁻¹. Enfin, l'intensification de la gestion sylvicole entraîne elle-aussi un déficit du carbone du sol, via notamment le raccourcissement des révolutions sylvicoles et l'exportation des souches.

Les valeurs de déficit calculé peuvent être mises en regard de la séquestration de carbone annuel de plantations forestières qui pourraient être développées à titre compensatoire en Gironde, et notamment en lieu et place de parcelles de vignoble abandonnées (Entre-deux-mers). Nous avons calculé le bilan de carbone des compartiments biomasse, sol et produits récoltés pour des peuplements forestiers proposés en compensation des pertes en carbone des défrichements occasionnés par le projet HORIZEO. Ces peuplements seraient installés en Gironde soit sur d'anciennes parcelles forestières déboisées après tempête et non replantées ou en impasse sylvicole, soit sur des terrains viticoles reconvertis en boisements. Le tableau suivant présente la composition des boisements compensateurs.

Tableau 4 : Composition du mix compensateur proposé et correspondance avec les simulations du projet Forêts-21 utilisées.

Emplacement et superficie	Usage antérieur	Essence	Type de sol et réserve utile (mm)	Conduite sylvicole	Simulations <i>Forêts-21</i> sélectionnées
Sud Gironde 1080 ha	Forêt de pins	Pin maritime	Sol humique (podzol), RU = 75 mm	Itinéraire tendanciel (4 éclaircies et coupe à DBH=40 cm)	PM - ITS tendanciel # 7580
Sud Gironde 120 ha (en bordure des pins).	Forêt de pins	Chênes pédonculé et tauzin	Sol humique (podzol), RU=80mm	Plantations	Chênes - ITS plantation # 7580
Entre-deux-mers 450 ha	Vignes	Pin maritime	Sol brun, RU=80mm	Itinéraire tendanciel (4 éclaircies et coupe à DBH = 40 cm)	PM - ITS tendanciel #7588
Entre-deux-mers 450 ha	Vignes	Chênes pédonculé et tauzin	Sol calcaire RU 40mm	Plantations 1400 ha ⁻¹	Chênes – plantation #7588
Entre-deux-mers 185 ha	Vignes	Feuillus à croissance rapide	Sol calcaire RU 120mm	Plantations 800 ha ⁻¹	Chênes RDI 0.3 #7588
Entre-deux-mers 400 ha	Vignes	Robinier	Sol calcaire RU 80mm	Taillis	Chênes, taillis. #7588
Entre-deux-mers 315 ha	Vignes	Conifère	RU 25mm	Rotation longue - coupe à DBH = 50cm)	PM – ITS long – #7588

Les résultats obtenus sont résumés dans la figure suivante. Elle représente l'évolution des stocks de carbone dans la biomasse sur pied et le sol pour le mix compensateur proposé par le commanditaire, pour une superficie totale de 3000 ha.

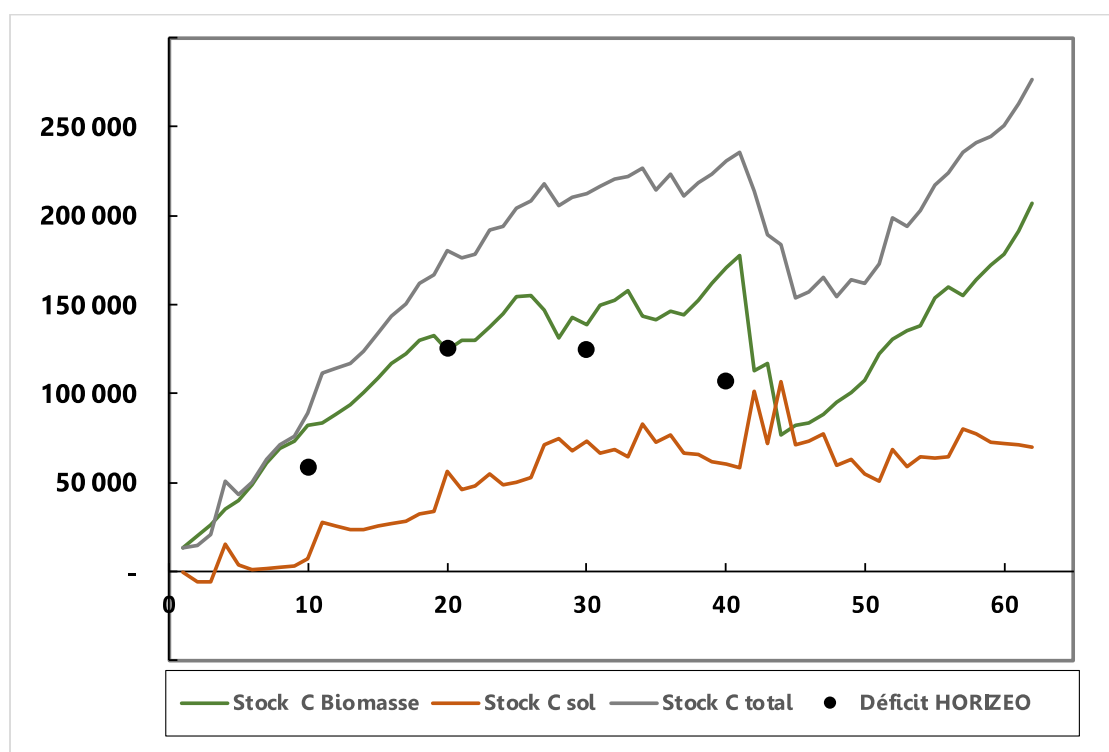


Figure 4 : Évolution des stocks de carbone (en tC) dans la biomasse sur pied et le sol du mix compensateur (3000 ha) en fonction de la durée d'amortissement et sous le scénario climatique RCP8.5. Le déficit en carbone lié au défrichement pour l'aménagement du projet HORIZEO calculé comme la somme des différences brutes « Biomasse » et « Sol » en tonnes de carbone est également indiqué (symboles noirs).

Sous les hypothèses sous tendant les simulations utilisées, le déficit en carbone lié au défrichement pour l'aménagement du projet HORIZEO pourrait être compensé par la séquestration de carbone du mix « compensateur » dès la 10^{ème} année après installation. A 20, et 30 ans le déficit en carbone est entièrement compensé, la quantité totale de carbone séquestré étant près du double du déficit du carbone du parc. Le mix « compensateur » séquestre le carbone pour environ un tiers dans le sol et pour les deux tiers dans le compartiment biomasse.

On note que le carbone séquestré dans le compartiment biomasse fait l'objet d'une récolte régulière au-delà des périodes d'amortissement considérées : un pic de récolte intervient après 40 ans et provoque une chute du stock biomasse tandis que l'apport au sol des rémanents, souches, branches et éléments de tronc inférieur à 7 cm de diamètre, augmente temporairement le stock du compartiment sol. Le stockage de carbone total réalisé dans la biomasse et le sol du boisement après 40 ans compense encore assez largement le déficit du bilan de carbone HORIZEO.

La prise en compte du bilan des émissions fossiles sylvicoles modifie quant à elle le bilan du projet au deuxième ordre, la valeur du déficit associé atteignant -0.02 à -0.03 tC ha⁻¹ an⁻¹ avec très peu de différences entre les options prises en compte. Cette valeur négative montre

que les émissions sylvicoles sont plus importantes en forêt que dans le parc où seule une fauche annuelle de la végétation est effectuée.

4 Conclusions des travaux (volet 1 et volet 2)

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.

L'objectif des travaux est de répondre à la question suivante : ***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** (en considérant des panneaux dont le bilan carbone est de 427 kg CO₂ éq./kWc), soit 3 fois moins que le mix électrique actuel et un tiers de moins que le mix électrique à horizon 2030.

Cette valeur est 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. / kWh³ pour l'électricité produite par des parcs photovoltaïque en France.

³ variation de l'empreinte carbone selon l'origine de la production des panneaux photovoltaïque



L'usage de panneaux photovoltaïques proposant un bilan carbone plus performant et qui pourraient être produits en France (360 kg CO₂ éq./kWc) 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-après 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.

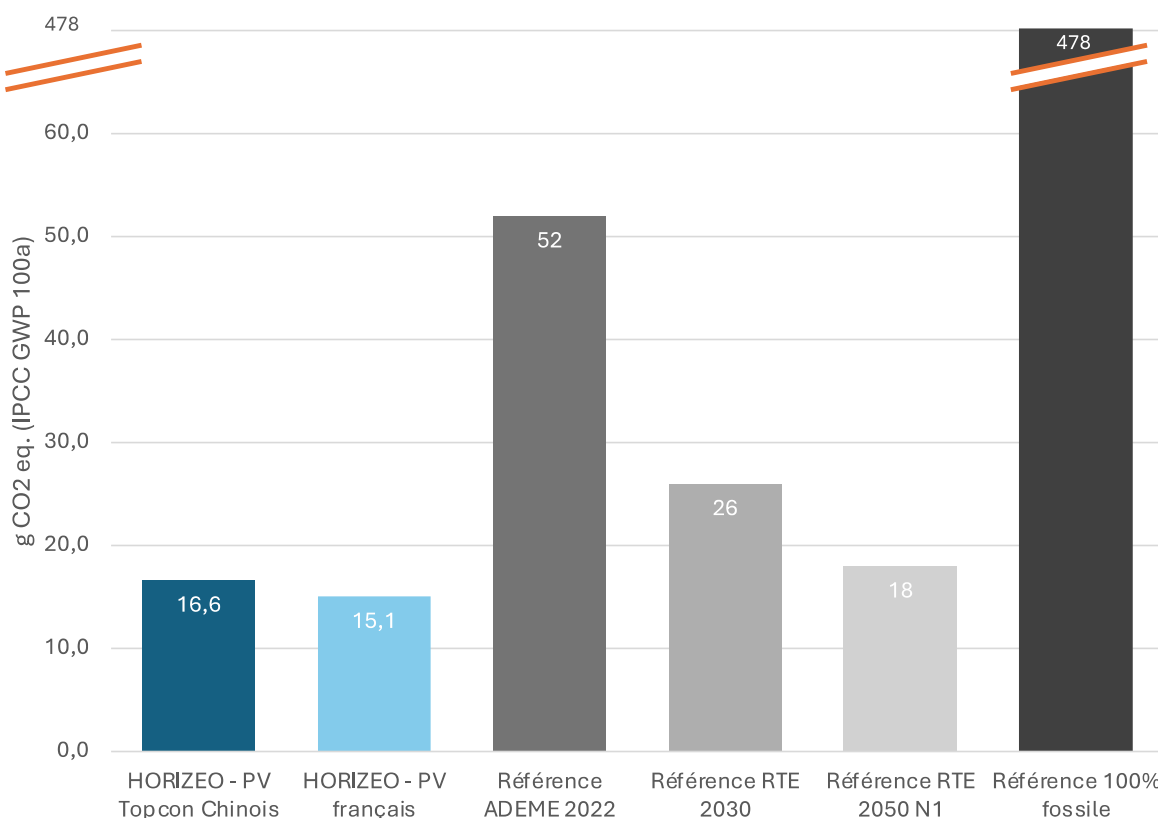


Figure 5 : Empreinte carbone d'1 kWh produit selon les scénarios HORIZEO et Références, pour des raisons de lisibilité l'axe des ordonnées a été tronqué (pour le scénario de référence 100% fossile)

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.

Le graphe suivant synthétise les résultats des 2 volets de l'empreinte carbone du projet HORIZEO. Ces résultats sont comparés au scénario de référence avec un mix électrique français actuel (Base Empreinte ADEME, 2022) et pour le scénario RCP 8.5 avec une projection à 2066. Dans ce graphe, 1 t de carbone biogénique est supposée équivalente à 1 t de carbone fossile.

Si l'on tient compte du défrichement (en orange), on voit que les émissions du projet HORIZEO restent inférieures au scénario de référence 1 (ADEME, 2022), sans même tenir compte du carbone qui sera séquestré dans les boisements compensateurs qui seront plantés dans le cadre du projet (en jaune sur le graphe).

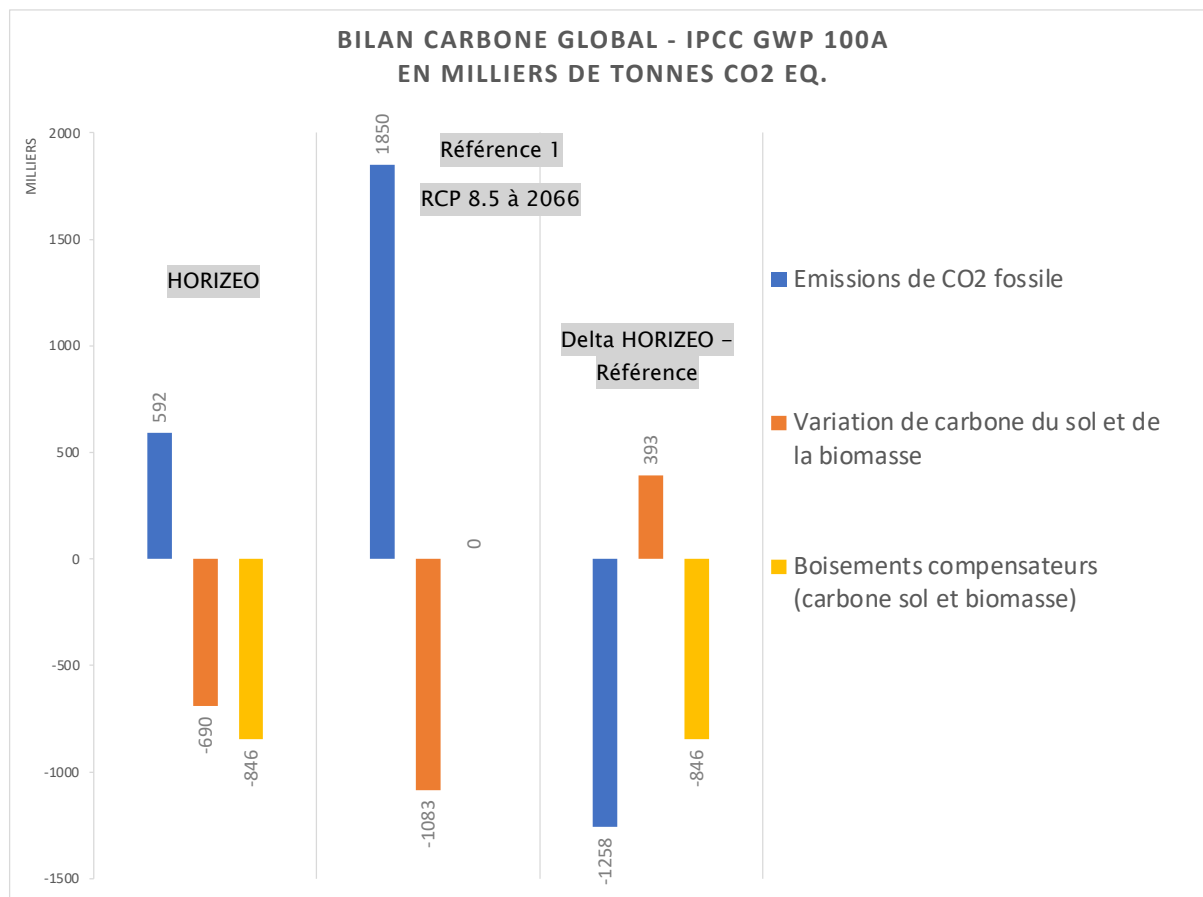


Figure 6 : Émissions de carbone en millions de tonnes de CO2 eq. liées au projet HORIZEO (à gauche), au scénario de référence (au milieu) et à la différence des deux scénarios, pour les volets 1 et 2

Dans le graphique ci-avant :

- « **Carbone sol + biomasse** » comprend le carbone du sol et le carbone de la biomasse non valorisées (herbes, buissons, résidus bois non récoltés)
- « **Boisements compensateurs** » correspond à la somme du carbone du sol, de la biomasse pour les boisements compensateurs. Sous les hypothèses sous tendant les simulations utilisées, le déficit en carbone lié au défrichement pour l'aménagement du projet HORIZEO pourrait être compensé par la séquestration de carbone du mix « compensateur » dès la 10^{ème} année après installation.

