

Bilan de carbone du déboisement lié à l'installation du projet de parc photovoltaïque HORIZEO de Saucats.

Rapport final (version 5)

5 décembre 2024

D. Loustau (1), C. Chipeaux (1), P. Trichet (1), B. Gardiner (2)

(1) UMR ISPA, INRAE, Centre de Bordeaux Nouvelle Aquitaine.

(2) Institut Européen de la Forêt Cultivée, Bordeaux.

Table des matières

Table des matières.....	3
1 Préambule.....	4
2 Remerciements.....	4
3 Approche et méthodologie.....	5
3.1 Modèle GO+ version 3.1	5
3.2 Adaptation du modèle GO+ au parc photovoltaïque du projet <i>Horizeo</i>	6
3.3 Hypothèses retenues	8
3.3.1 Etat initial du périmètre du projet.....	8
3.3.2 Installation de du projet <i>Horizeo</i>	8
3.3.3 Végétation et sol	10
3.3.4 Émissions de carbone fossile liées aux opération sylvicoles.....	10
3.3.5 Sylviculture et gestion de la végétation sous panneaux.....	11
3.3.6 Scénarios climatiques.....	11
3.4 Mesures de rayonnement transmis sous panneaux solaires.....	12
3.5 Mesures de biomasse herbacée dans les parcs solaires existants	14
4 Résultats.....	14
4.1 Revue bibliographique	14
4.1.1 La dynamique récente de la végétation des Landes de Gascogne.	14
4.1.2 L'impact de panneaux solaires sur la végétation : données tirées d'étude sur l'agrivoltaïsme.....	19
4.2 Mesures de rayonnement transmis au sol sous parc photovoltaïque	25
4.3 Biomasse de la végétation des parcs Solaires de St Germain et Salaunes.	26
4.4 Simulation du parc photovoltaïque de Saucats avec le modèle GO+.....	27
4.4.1 Dynamique de la végétation spontanée sous panneaux solaires.....	27
4.4.2 Bilan d'énergie du parc de panneaux solaires	30
4.4.3 Hydrologie.....	31
4.5 Bilan de carbone du projet de parc de Saucats	32
4.5.1 Carbone de la biomasse.....	36
4.5.2 Matière organique du sol.....	37
4.5.3 Production et exportation des récoltes	40
4.5.4 Émissions fossiles	41
4.6 Bilan global et conclusion	42
5 Références	45
6 Annexes.....	50

1 Préambule.

Ce rapport décrit les résultats obtenus par l'INRAE et l'unité ISPA sur l'estimation du bilan de carbone du déboisement lié au projet *Horizeo* sur la commune de Saucats mis en œuvre par les sociétés ENGIE, et NEOEN. Conformément au contrat de recherche signé le 8 juillet 2020 entre l'INRAE, ENGIE et NEOEN (article 2.1.1), il concerne le bilan en carbone d'origine biogénique (biomasse, sol et produits récoltés) des terrains concernés par le projet. Cette version en constitue le livrable 2.2. Elle comprend une brève revue bibliographique de la dynamique de la végétation forestière en Lande humide de la forêt des Landes de Gascogne et la modélisation du bilan de carbone d'origine biogénique du parc solaire en projet qui est comparé avec celui des peuplements actuellement présentes sur le site, essentiellement de pins maritimes et accessoirement de chênes pédonculés. Cette version inclut également le compte rendu des mesures effectuées sous deux parcs solaires qui ont été commandées par ENGIE à l'INRAE (n°4500031700). Cette étude n'inclut pas le cycle de vie des installations prévues (panneaux, centrale batterie, data center, serre, zones agricoles, bâtiments) réalisé par *Gingko 21*.

L'approche adoptée, dite « net-net », conduit à comparer les stocks et flux de carbone biogéniques¹ 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 ci-après « Projet ».
- Maintien de l'état boisé et conduite des peuplements de pins et chênes existants selon une sylviculture en futaie à courte rotation (30 ans) ou tendancielle « semi-dédiée » (coupe à 45 ans) pour les pins maritimes et en taillis pour la chênaie, appelée ci-après « Forêt ».

Notre 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.

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. Cette version présente également les résultats de la campagne de mesure de biomasse qui a été réalisée par l'INRAE sur parc solaire et en forêt au cours de l'été 2021.

2 Remerciements.

Nous remercions Nicolas Fanin, Laurence Denaix et Laurent Augusto qui ont effectué une revue critique de ce rapport. Les mesures de rayonnement sur les parcs de Salaunes et de Langelé ont été réalisées par Christophe Chipeaux, Alain Kruzewski et Jérémie Depuydt. L'échantillonnage de la biomasse des parcs de St Germain d'Esteuil et de Salaunes ainsi que du site de Bilos² (commune de Salles) ont été effectués par

¹ Inclut ici la biomasse sur pied, les produits récoltés et le carbone de la matière organique du sol.

² La station Bilos appartient à l'infrastructure européenne éponyme ; 150 variables micrométéorologiques permettant entre autres le calcul des flux de chaleur, vapeur d'eau et CO₂ sont monitorées sur cette forêt de pins

l'Unité expérimentale de l'Hermitage, sous la direction de P. Trichet (UMR ISPA). Nous remercions également les partenaires de cette étude, notamment Lisa Cantet, Mathieu Le Grelle (ENGIE) et Lionel Debril (NEOEN) et les expert(e)s consulté(e)s dont Claire Rebourg et Marie de Saxe (Gingko 21) avec qui les discussions et échanges auront permis de préciser, compléter et approfondir différents aspects de l'étude.

3 Approche et méthodologie

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. GO+ inclut les processus biophysiques et biogéochimiques impliqués dans les transferts radiatifs et turbulents, le bilan d'énergie, l'hydrologie et le cycle du carbone en forêt. Le cycle du carbone dans le sol est directement dérivé du modèle Roth-C (Coleman et Jenkinson 1996). Le modèle permet de prendre en compte toutes les options de sylvicultures possibles pour les peuplements équiennes monospécifiques de Pin maritime et pour un taillis de Chêne pédonculé ainsi que les opérations sylvicoles concernées : préparation du sol, gestion de la végétation du sous-étage, plantation, éclaircies et dépressages³, coupes. 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.

3.1 Modèle GO+ version 3.1

On trouvera une description en français du modèle GO+ sur le portail web du projet Forêts-21 (<https://forets21.inra.fr/pelican3.1/GOplus.html>). La figure A1 en annexe 1 compare les séries temporelles de données de croissance, indice foliaire,⁴ surface terrière⁵ et hydrologie simulées par le modèle GO+ v3.1 avec les observations réalisées sur le site du Bray distant de 14 km à l'Ouest du périmètre du projet. Cette figure montre que le modèle restitue de façon très fidèle, et sans biais notable, la trajectoire de croissance et de fonctionnement de peuplements de Pin maritime en lande humide. La figure 13 de la publication de Moreaux et al. (2020) décrivant ce modèle confirme que ce modèle décrit les échanges de CO₂ de forêts tempérées sans biais significatif sur le long terme.

La version utilisée est la version 3.1 qui diffère de la version précédente 3.0 sur plusieurs points. Le transfert radiatif de la v3.1 a été révisé et comparé aux mesures de rayonnement effectuées sur le site de la station de Bilos (commune de Salles, Gironde) qui est une station du réseau ICOS (classe 2) dont les mesures sont conformes aux standards et instructions de l'infrastructure internationale ICOS (<https://www.icos-cp.eu/>). La figure A2 en annexe donne les résultats de cette comparaison et est complétée d'une note de version (annexe 2). Elle indique que ce schéma de transfert du rayonnement simule sans biais et avec une erreur inférieure à ±5% les composantes du bilan radiatif d'une canopée forestière de Pin maritime pendant la saison de croissance.

depuis 2002. La station est aux normes ICOS depuis 2017 (<https://xylofront.pierroton.inra.fr/Salles2.html> et <https://www.icos-cp.eu/data-services>

³ Un dépressage est une éclaircie non commerciale des arbres au stade juvénile

⁴ Surface des feuilles ou aiguilles par unité de surface de sol

⁵ Projection au sol de la surface de la section horizontale des troncs prise à une hauteur de 1.3m.

3.2 Adaptation du modèle GO+ au parc photovoltaïque du projet *Horizeo*

La version 3.1 du modèle GO+ a aussi été adaptée ici pour inclure une option « parc solaire ». Dans cette option, la strate arborée est remplacée par les panneaux solaires mais les autres composantes, la végétation du sous-étage et le sol sont simulées comme dans l'option forêt, avec une fauche annuelle dans le cas du parc *Horizeo*.

Rayonnement solaire diffus.

La transmission de rayonnement solaire diffus et du rayonnement atmosphérique est calculée en supposant une distribution uniforme du rayonnement diffus dans la voûte céleste. La fraction de ciel vue par chaque point au sol est calculée en tenant compte de l'obstruction par les panneaux voisins. L'intégration est faite le long d'un transect Sud-Nord représentant une unité rang + inter-rang, à raison d'un point tous les 0.1 m environ soient 63 à 67 points, la longueur d'une unité panneau + inter rang étant de 6.34 et 6.72m à Salaunes et Saucats respectivement (Tableau 1). On a utilisé pour cela les modèles courants d'obstruction du ciel vu depuis un plan incliné (Monteith and Unsworth, 2008). L'intégration sur 67 points donne un coefficient d'obstruction moyen estimé à 0.556 et 0.693 (équivalent à un coefficient de transmission de 0.444 et 0.307) à Salaunes et à Saucats respectivement (fig.1). La différence entre les deux parcs est due à une disposition géométrique des panneaux légèrement différente (cf. Tableau 1).

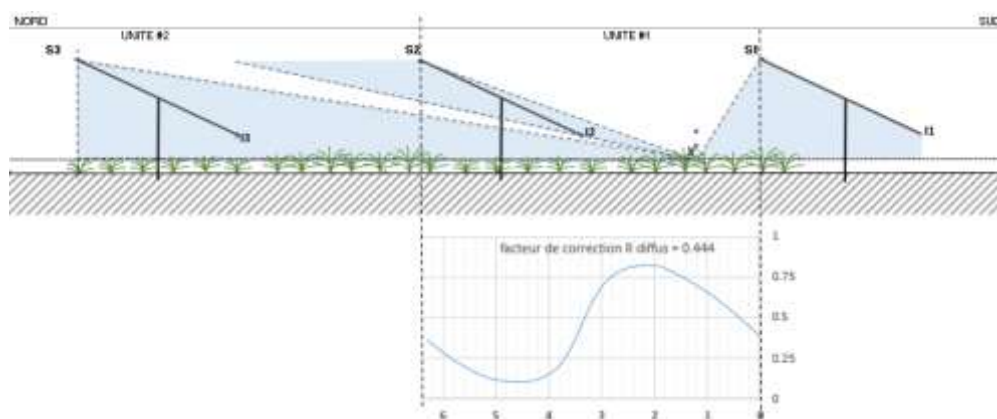


Figure 1. Principe de calcul de la transmission du rayonnement diffus sous une unité de panneau solaire Sud- Nord (paramètres du parc photovoltaïque de Salaunes). A chaque point X du transect, la fraction d'angle du ciel vue est donnée par $= 180 - S3 \times O - S2 \times I2 - S1 \times O$. La fraction obstruée est figurée en bleu. L'intégration est ensuite faite sur 67 valeurs de x, de 0.1 à 6.7 m (diagramme inférieur).

Rayonnement solaire direct.

Le rayonnement direct transmis sous les panneaux est calculé par application de règles trigonométriques simples (Demain et al. 2013) avec un schéma d'intégration identique au précédent. Un méta modèle décrivant la fraction de rayonnement direct obstruée par les panneaux est ensuite construit et donne la fraction de rayonnement direct reçue sous les panneaux en fonction du jour de l'année et de l'heure dans la journée (fig. 2).

Fraction de rayonnement direct transmise

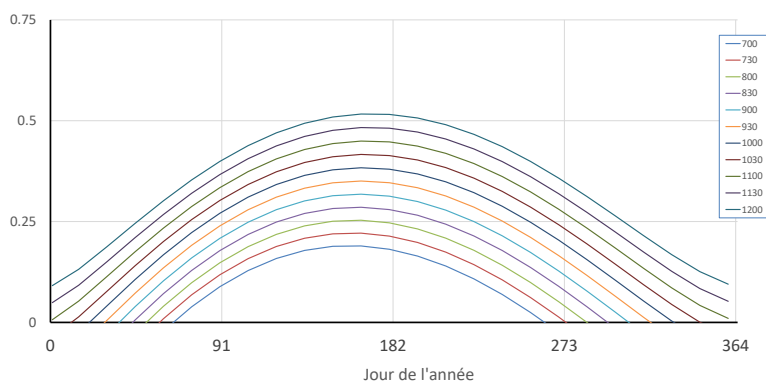


Figure 2. Métamodèle de la fraction de rayonnement direct vue depuis le sol en fonction du jour de l'année et de l'heure de la journée (paramétrage ferme de Salaunes). Chacune des courbes donne l'évolution annuelle de la probabilité de transmission du rayonnement solaire direct sous les panneaux, autrement dit de la fraction de surface du sol recevant du rayonnement direct, pour chaque heure de la matinée (et par symétrie de la journée entière). La légende indique l'heure de la journée.

Rayonnement atmosphérique.

L'interception du rayonnement de grande longueur d'onde ($> 3000\text{nm}$) atmosphérique et terrestre est traitée comme le rayonnement solaire diffus mais en différenciant les faces supérieure et inférieure des panneaux. Le rayonnement de grande longueur d'onde reçu au centre des faces supérieure et inférieure du panneau est calculé comme la somme des fractions reçues depuis le ciel, le sol et les faces supérieures et inférieures des panneaux voisins.

Les caractéristiques sont résumées dans le tableau 1, tirées de la littérature. L'émission par les panneaux est différenciée entre la face supérieure (émissivité de 0.85 et la face inférieure (émissivité de 0.91) (Heusinger et al. 2020).

Transfert aérodynamique

La résistance aérodynamique totale est décomposée entre une résistance aérodynamique, r_{aM} , et une résistance de couche limite, r_b . Pour la végétation, le premier terme, r_{aM} , tient compte de la déformation de couronnes d'arbres en fonction du vent. Elle a été calculée selon Raupach (1994). Pour les panneaux solaires elle prend en compte leur disposition (longueur, largeur, hauteur, inclinaison) et un coefficient de traînée moyen fixe tiré de Jubayer et al. (2014) et fixé à une valeur de 0.5. Elle représente la résistance au transport de chaleur, vent et vapeur d'eau entre le niveau supérieur des panneaux et le niveau $z = 10\text{m}$. La résistance de couche limite⁶ est calculée d'après Monteith and Unsworth (2008) avec les paramètres proposés par Thom (1975) pour les feuilles planes (ex Chênes), Wesely et Hicks (1977) pour les aiguilles de Pin et Chamberlain et al. (1984) pour les structures rigides (panneau solaire).

Ceci constitue une façon simplifiée de représenter le transport de chaleur entre les rangées de panneaux et l'atmosphère ; elle ne tient pas compte des variations spatiales intra et inter panneaux ni de l'angle d'incidence du vent qui jouent ici un rôle important. Cette simplification permet toutefois de donner une approximation des flux de chaleur et température de surface des panneaux grossièrement cohérente avec le bilan d'énergie du parc.

⁶ Fine couche d'air enveloppant la surface et où le transport s'opère par diffusion moléculaire.

Bilan d'énergie

Ce bilan inclut les composantes radiatives de courte (SW) et grande (LW) longueur d'onde ainsi que les flux de chaleur sensible (H) et latente (LE) et le stockage d'énergie dans la biomasse (C_w), les panneaux solaires (C_{PV}) et le sol (G) ainsi que le flux absorbé par la photosynthèse C_m suivant l'équation :

$$R_n = SW \uparrow\downarrow + LW \uparrow\downarrow = H + LE + C_w + C_{PV} + C_m + G$$

Le bilan radiatif de courte et grande longueur d'onde qui détermine le rayonnement net absorbé, R_n , est calculé comme décrit ci-dessus. Le stockage d'énergie dans le sol, la végétation, par le métabolisme des végétaux (photosynthèse et respiration) et les panneaux solaires sont calculés suivant les approches de Moderow et al. (2009) pour la végétation, les données de Heusinger et al. (2020) pour un panneau multicouche verre/EVA/verre, et Arya (1988) pour le sol. Cette simplification s'explique par l'absence de données spécifiques concernant les caractéristiques thermiques et radiatives (émissivité) des panneaux utilisés pour le projet HORIZEO ainsi que de données mesurées *in situ*. L'énergie transformée en électricité par les panneaux solaires est un terme résiduel de cette équation.

3.3 Hypothèses retenues

Le bilan en carbone des terrains déboisés et équipés de panneaux solaires a été calculé sous les hypothèses suivantes.

3.3.1 Etat initial du périmètre du projet.

Les peuplements en place sont décrits d'après les données transmises par ENGIE (Horizeo) et élaborées par le Groupement Forestier du Murat, propriétaire et gestionnaire de ces peuplements (plan simple de gestion, cartographie des âges ; tableau de synthèse des données des peuplements). Ces données donnent l'état des peuplements inventoriés sur le périmètre en 2020. Elles ont été synthétisées pour représenter l'ensemble du périmètre du projet en 2020 par 11 classes d'âge de peuplements de pin maritime et 3 classes d'âge de taillis de chênes pédonculés. La superficie du site étudié est de 1958 ha, sur lesquels on décompte des surfaces boisées occupées par le Pin maritime pour l'essentiel (1765.2 ha) et des taillis de Chêne pédonculé (5.8 ha). Le reste est constitué de terrains non boisés dont l'affectation n'est pas modifiée par le projet (pistes forestières, bâtiments et pourtours non cultivés, lagunes) et qui ne seront donc pas pris en compte. La matrice de transition des superficies occupées entre l'état en 2020 et l'état après installation du parc photovoltaïque est donnée en annexe 4.

Le sol est considéré comme homogène sur l'ensemble du périmètre avec une profondeur moyenne de 0.80 m. L'épaisseur de sol équivalente prospecté par les racines est fixée à 0.50 m. Le réseau de drainage forestier préexistant est conservé après l'installation du parc. La vidange de la nappe phréatique a donc été paramétrée comme pour la forêt de Pin maritime du site du Bray qui est également une Lande humide très similaire au site de Saucats. L'INRAE a étudié le site du Bray sur le plan hydrologique en particulier, de 1987 à 2008 (El Hadj Moussa 1989, Loustau et al.1990, 1991, Granier et Loustau ,1994 ; Diawara et al. 1991 ; Chossat et Champagne 1998 ; Vernier et al. 2003).

3.3.2 Installation du projet *Horizeo*

La construction du projet *Horizeo* est envisagée en 2024. Les peuplements sont coupés et la partie récoltable est exportée hors parcelle et exploitée suivant la dimension (diamètre) des parties récoltées. Cette récolte est comptabilisée dans le bilan comparatif global. La fraction non récoltée retourne au sol. Le devenir des parties récoltées est comme suit :

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 Biganos</i>) 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).	En fait, ce cas ne se produit jamais dans les projections réalisées, la circonférence des arbres étant inférieure au seuil : les souches des arbres coupés sont broyées et enfouies sur place.
<ul style="list-style-type: none"> • Destination du bois coupé : <ul style="list-style-type: none"> ○ 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. Le carbone stocké dans le bois récolté et exporté est considéré comme ne retournant jamais à l'atmosphère, ce qui maximise le stockage du carbone de la composante « sylviculture ».
Le taillis de chênes (23 ans en 2020) est exploité à l'âge de 80 ans en bois énergie.	La donnée du groupement forestier est prise en compte telle quelle dans la 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.

Dans ce rapport, les préconisations suivantes ont été utilisées. Les panneaux solaires (3 m x 4 m) du parc *Horizeo* à Saucats seraient installés sur des pieux en acier de 10 cm de section enfoncés dans le sol et inclinés à 27° du plan horizontal avec une orientation Sud. Ils sont alignés en rang à raison de 16 rangées par hectare soient 400 panneaux à l'hectare. Les rangées de panneaux sont espacées de 3m. Les simulations qui suivent sont calculées avec le paramétrage décrit dans le tableau 1. Ce tableau donne également les caractéristiques des parcs de Salaunes et de Langelé qui ont été utilisés pour une campagne de mesure de rayonnement transmis sous les panneaux et une campagne de mesure de biomasse.

Tableau 1. Paramètres utilisés pour caractériser les panneaux solaires installés (d'après les données observées sur les parcs de Salaunes, décembre 2020, et de Langelé (avril 2021) et communiquées par ENGIE , 18-02-2021, Saucats).

Paramètre	Salaunes (parc solaire existant, panneaux fixes)	Horizeo (projet, panneaux fixes)	Langelé (parc solaire existant, trackers)	unités
Largeur x longueur, hauteur du bord supérieur	4x 3.28, 1.90,	4x 4.5, 2.35,	1.04 x 1.56 x 1.80	m
Réflectance 400-700nm (face supérieure)	0.1	0.1	0.1	-
Réflectance 300-2500 nm (face supérieure)	0.2	0.2	0.2	-
Réflectance 400-700nm (face inférieure)	0.1	0.1	0.1	-
Réflectance 300-2500 nm (face inférieure)	0.2	0.2	0.2	-
Emissivité face inf/sup	0.91/0.85	0.91/0.85	0.91/0.85	-
Rétention de la surface en eau	0.02	0.02	0.02	kg H2O m ²
Angle d'inclinaison / horizontal	20	20	variable	Degrés
Exposition	180	180	80	Degrés N
Espace vide entre les rangées de panneaux	3.4	2.5	2.35	m
Diamètre des pieux	0.1	0.1	0.1	m
Densité par hectare	400	400		ha-1
Capacité thermique des panneaux	Non utilisée	580	Non utilisée	J kg ⁻¹ K ⁻¹

Les simulations qui suivent sont calculées avec le paramétrage décrit dans le tableau 1. Ce tableau donne également les caractéristiques des parcs de Salaunes et de Langelé qui ont été utilisés pour une campagne de mesure de rayonnement transmis sous les panneaux et une campagne de mesure de biomasse. Pour les parcs de Salaunes et Horizeo, les panneaux ont été modélisés en unité de panneaux de 4m de longueur, la largeur indiquée correspond à la largeur de la rangée non projetée au sol."

3.3.3 Végétation et sol

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. Après la coupe, la récolte et le nivellement des terrains concernés, on a considéré que la végétation se régénérerait spontanément à partir des propagules subsistantes (rhizome, graines) dont le stock est estimé à 20 kg de matière sèche par ha. Dans notre modèle, la croissance en biomasse est simulée comme le minimum entre la croissance potentielle du tapis végétal et la quantité de carbone disponible, elle-même calculée à partir des processus impliqués : transferts radiatifs, photosynthèse, respiration. Ce module de sous-étage du modèle GO+ v3.1 a été utilisé comme tel avec les caractéristiques et paramètres décrits tirés pour la plupart des travaux de Cochard (1988), Loustau et Cochard (1991), Delzon (2000) et Stahl (2006).

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. Cette adaptation consiste à accélérer les vitesses d'humification et de minéralisation du carbone du sol à la suite des travaux du sol. Le stock initial de carbone en 2020 est calculé d'après les mesures effectuées sur le site du Bray à quelques km de distance, par l'INRAE (Guillet et al. 2020). Le modèle décrit le carbone du sol comme un ensemble de 5 compartiments : la matière organique facilement décomposable (DPM) et la matière organique difficilement décomposable (RPM), dans lesquels sont inclus litières et résidus de récolte, la microflore du sol (BIO), la partie humifiée (HUM) et un compartiment de matière organique inerte (IOM). Cette conception de la matière organique du sol en cinq grands pools, pour simple qu'elle soit, permet notamment de mieux de rendre compte de la sensibilité différente des pools de carbone du sol à la température (Davidson et Janssens, 2006). Le carbone du sol est alimenté par les apports de matière organique morte ou litière de la végétation (feuilles, tiges, racines) provoquée soit par sénescence naturelle ou par les coupes annuelles. Au moment de l'installation du parc photovoltaïque, les rémanents de coupes forestières sont inclus dans le compartiment du sol.

3.3.4 Émissions de carbone fossile liées aux opérations sylvicoles et à l'entretien de la végétation du parc photovoltaïque.

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.

L'estimation des émissions ainsi produites suppose de connaître la durée associée à chaque opération et la quantité de fuel et autres consommables (lubrifiants) utilisés. La méthodologie adoptée dans ce rapport se base sur les données de González-García *et al.* (2014) qui concernent les différentes opérations impliquées dans la sylviculture du Pin et que nous avons utilisé aussi pour les Chênes. La consommation en fuel est calculée par m³ de bois exporté. Ces données sont les plus récentes concernant la sylviculture du Pin maritime dans les Landes de Gascogne. Les informations sur le coût en carbone fossile du transport des produits récoltés jusqu'aux unités de transformation primaire sont basées sur Lijewski *et al.* (2017).

On a supposé une distance moyenne de transport de 35 km qui correspond par exemple à la distance du parc à la scierie PGS BEYNEL de la commune de Salles ou à l'usine SMURFIT de Facture.

Les opérations associées aux différents itinéraires techniques sylvicoles de chacune des trois options de sylviculture envisagées : charrue, rouleau landais, éclaircie, coupe rase, transport (annexe 5) ont été calculées d'après l'annexe 5 pour un cycle sylvicole complet de la plantation à la coupe. Leur coût unitaire en fuel ou essence a été ramené au m³ de bois produit en tenant compte de la production cumulée sur le cycle sylvicole en entier. Ce coût est ensuite converti en émissions de CO₂ avec un facteur de conversion de 2.689 kg CO₂ eq l⁻¹ (IPCC, 2006).

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

3.3.5 Sylviculture et gestion de la végétation sous panneaux

Le détail des opérations effectuées au cours du cycle sylvicole et implémentées avec le modèle GO+ est donné en annexe 5. Deux options sylvicoles appliquées aux peuplements de Pin maritime sont prises en compte.

- Une version intensive, 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 souches et les troncs sont récoltés. La croissance initiale est supposée très rapide (variété biomasse, fertilisation).
- Une version « semi-dédiée » avec une coupe à 45 ans proposée par l'ONF dans le *Guide de sylviculture du Pin maritime* (Sardin, 2003), et où seuls les troncs sont récoltés.

Le taillis de chênes de 23 ans en 2020 mentionné dans l'inventaire du périmètre du parc et occupant environ 5.8 ha est atypique avec une densité annoncée de 250 tiges ha⁻¹. Il a été appliqué une conduite en taillis avec une rotation de 80 ans et un arrachage des souches après deux recépées soit pour un âge de souche de 240 ans.

La végétation herbacée sous les panneaux solaires est fauchée chaque année à une date fixée au 15 octobre avec une faucheuse mécanique⁷. 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.

3.3.6 Scénarios climatiques

Les données utilisées sont mises à disposition par le portail [DRIAS](#) de Météo-France. Elles proviennent de l'expérience CNRM2014 qui simule des données météorologiques journalières à une maille de 8x8 km sur la France entière. La méthode de régionalisation est la méthode ADAMONT avec les projections du modèle de régionalisation du CNRM ALADIN (ALADIN-Climat v4) dont les simulations sont disponibles pour trois scénarios climatiques RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5. En juillet 2020, Météo-France a mis à disposition cet ensemble de données simulées (Température, vent horizontal à 10m, Précipitations, humidité de l'air) selon une méthode plus précise de régionalisation. Ces données sont devenues utilisables dans le cadre de ce projet en mars 2021, après que les données de rayonnement aient été mises à disposition. Cette nouvelle version est utilisée ici. Les données originales fournies par DRIAS ont été déconvoluées au pas de temps horaire à partir d'un algorithme de l'INRAE développé par l'UMR ISPA. Il est cohérent avec la hauteur solaire horaire. Les précipitations sont distribuées aléatoirement dans la

⁷ Des simulations ont aussi été faites avec une date de fauche au 28 avril, à titre comparatif. Cette fauche précoce pénalise la croissance initiale des graminées et leur production végétale. Elles ne sont pas présentées ici.

journée. Le rayonnement global est distribué en fractions directe et diffuse en tenant compte des périodes de précipitations.

Trois scénarios ont été appliqués sur la France à partir des scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5, scénarios utilisés lors du 5^e 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 et le scénario RCP 2.6 est le plus optimiste, les [cartographies proposées](#) sur le portail DRIAS donnent un aperçu des climats correspondants.

Tableau 2. Caractéristiques des scénarios RCP utilisés (extrait du portail DRIAS <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/175>)

Nom	Forçage radiatif	Concentration (ppm)	Trajectoire
RCP 8.5	>8,5W.m-2 en 2100	>1370 eq-CO ₂ en 2100	croissante
RCP 4.5	~4,5W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP2.6	Pic à ~3W.m-2 avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Le forçage radiatif correspond à l'impact qu'aurait un scénario en termes de rayonnement énergétique sortant de l'atmosphère en réponse à un changement du climat : dans le scénario RCP 8.5, tout se passe comme si l'atmosphère recevait un gain d'énergie équivalent à 8.5 W m⁻² en 2100.

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. La figure A2 en annexe 3 montre l'évolution de 2020 à 2100 de la température moyenne annuelle, des précipitations annuelles, et de la concentration en CO₂ simulées pour le point de grille 7500 qui se situe sur le périmètre du projet.

3.4 Mesures de rayonnement transmis sous panneaux solaires

Compte tenu des simplifications proposées pour le calcul du rayonnement intercepté par la végétation sous les panneaux avec le modèle GO+, deux séries de mesures ont été effectuées *in situ* afin de comparer les données simulées par le modèle avec des valeurs observées.

Les mesures ont été effectuées à l'aide de capteurs *Apogee* (bande spectrale 410 to 655 nm) préalablement intercomparés durant 10 journées sur le banc de test de l'UMR ISPA en comparaison avec un pyranomètre CMP22 *Kipp & Zonen*. Un capteur de type BF5 de *Delta-T Devices* (bande spectrale 400 to 700 nm) a également été utilisé pour mesure les composantes directe et diffuse du rayonnement visible. Les mesures *in situ* ont été réalisées par un ensemble de 12 capteurs ont été disposés à 0.2m au-dessus du sol selon un transect Nord-Sud ouvrant une unité [panneau+ interbande] (Fig. 3). Un capteur additionnel et un capteur de rayonnement solaire BF5 (Delta-T) séparant les composantes diffuse et directe du rayonnement visible (400-700nm) étaient disposés au-dessus des panneaux à une hauteur z=2.5m pour déterminer le rayonnement incident. Tous les capteurs étaient disposés horizontalement et donnaient donc une mesure de la densité de flux vertical descendant du rayonnement solaire dans la bande spectrale 400-700 nm correspondant au spectre visible absorbé par les pigments photosynthétiques de la végétation.

Les mesures sur le parc photovoltaïque de Salaunes, à panneaux fixes, ont été réalisées du 23 au 31 mars 2021. Celles du parc de Langelé (sur la commune de Rion-des-Landes), équipé de panneaux mobiles pivotant autour d'un axe horizontal Nord-Sud, se sont déroulées du 31 mars au 21 avril 2021. La figure 3 donne un aperçu du dispositif de mesures.

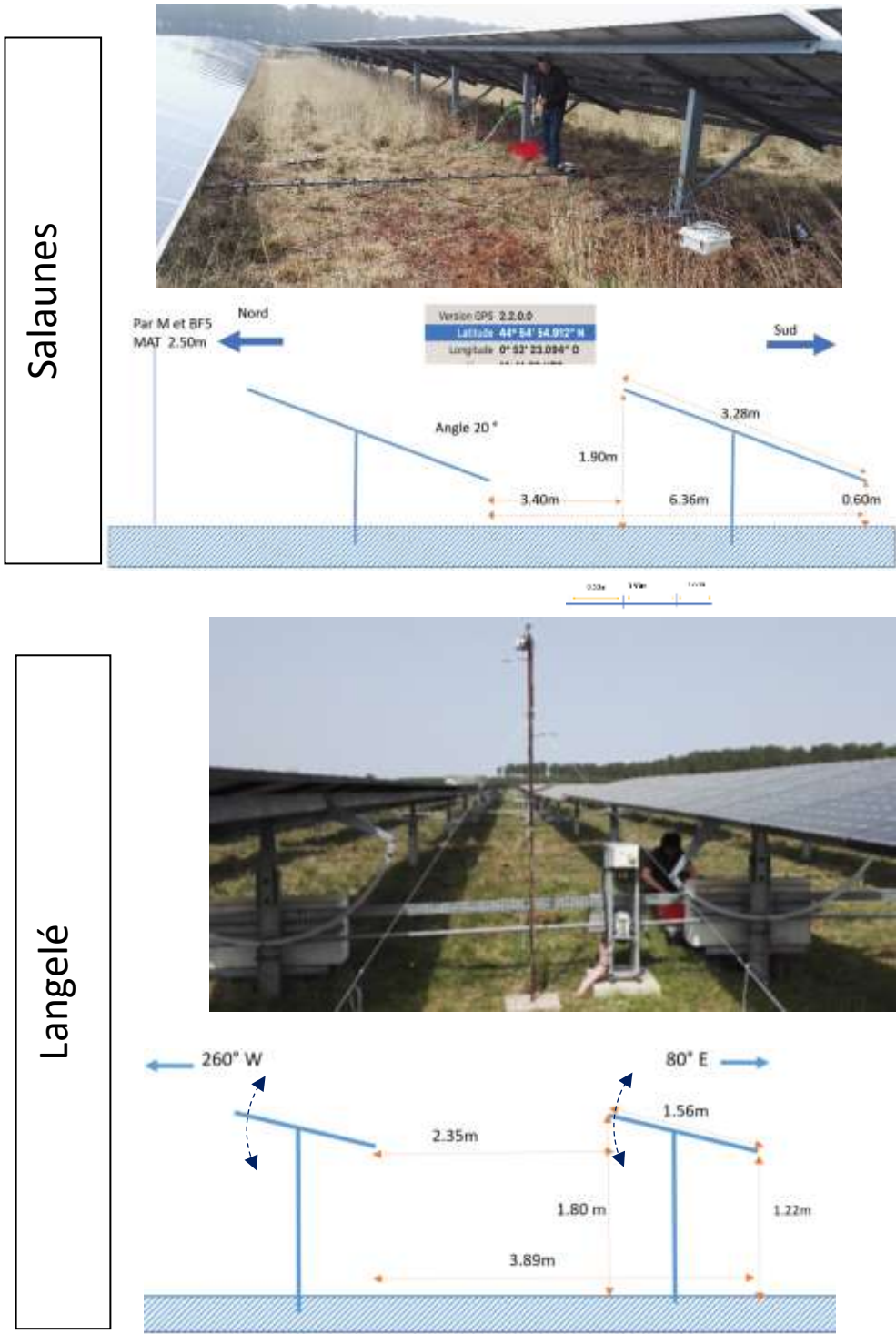


Figure 3. Photographies et schéma du dispositif de mesure du rayonnement solaire transmis installé sous les panneaux solaires de la ferme de Salaunes (panneaux fixes) 24 mars au 31 mars 2021 (schéma supérieur) et de Langelé (Rion des Landes) du 31 mars au 21 avril 2021 (Solar trackers pivotant autour d'un axe S-N) (schéma inférieur).

3.5 Mesures de biomasse herbacée dans les parcs solaires existants

Dans deux parcs photovoltaïques mis à disposition pour ce projet, à Salaunes et Saint-Germain-d'Esteuil, la biomasse aérienne (kg mat sèche m⁻²) de la végétation du parc solaire a été mesurée sur un échantillon de 21 placeaux de 1m² stratifié selon leur position en trois strates : sous panneaux, entre les panneaux, et dans la zone intermédiaire à l'aplomb du bord supérieur des panneaux. Un total de sept transects de 3 prélèvements a ainsi été réalisé dans autant de rangées de panneaux. Les échantillons ont été triés par groupe d'espèces et entre parties verte et non verte, séchés à 65°C et pesés. Pour les espèces dont cette donnée est connue, les biomasses ont été converties en indice foliaire en multipliant la biomasse foliaire verte par sa surface massique⁸.

4 Résultats

4.1 Revue bibliographique

La revue bibliographique a concerné les trois aspects développés ci-après, la dynamique récente de la végétation, l'écophysiologie des espèces dominantes et la dynamique de la végétation sous panneaux solaires. L'impact microclimatique de parcs photovoltaïques a également été revu. Elle s'est basée d'une part sur des requêtes effectuées sur WOS et d'autre part sur l'expertise développée à l'INRAE depuis 1976 et sur l'écologie de la végétation des Landes de Gascogne.

4.1.1 La dynamique récente de la végétation des Landes de Gascogne.

La végétation de la forêt des Landes de Gascogne est bien étudiée et a été caractérisée dans différentes études botaniques visant à en comprendre l'évolution, notamment de déterminer l'impact de la sylviculture du Pin maritime. L'enrésinement des Landes de Gascogne au XIXe siècle a provoqué la disparition, ou du moins la raréfaction d'un certain nombre de biotopes (Timbal et Maizeret, 1998). Ces auteurs expliquent que « *L'ensemencement en pins de parcelles de landes et les travaux sylvicoles qui suivent réduisent la diversité floristique de ces landes en éliminant les espèces à faible pouvoir disséminateur et en favorisant, au contraire, les espèces sociales à multiplication végétative et/ou à fort pouvoir de dissémination de semences* (Molinie, Avoine de Thore, Callune, Ajoncs, Bruyère à balais, Bruyère cendrée...) ». Les biotopes qui ont le plus souffert de ces boisements étaient au départ les moins fréquents, à savoir les zones les plus sèches d'une part et les landes les plus humides, voire tourbeuses. Timbal (2008) a notamment montré par des relevés comparatifs que l'association floristique originelle des milieux humides des Landes ne subsiste plus que dans les milieux non soumis à sylviculture. Elle a été remplacée ailleurs, comme c'est probablement le cas du périmètre du projet de Saucats, par un groupement végétal de moindre richesse floristique dominé par la Molinie et la Fougère aigle. Timbal et Maizeret (1998) montrent aussi que le travail du sol qui s'est généralisé dans le massif des Landes favorise les espèces sociales qui se multiplient de manière végétative : fragmentation des rhizomes de Fougère aigle, éclatement des touffes de Molinie et d'Avoine de Thore en multiples "éclats"... Il favorise également les espèces pionnières (et parmi elles beaucoup d'annuelles : *Senecio*, *Pseudognaphalium*, *Aira*,...) et les autres géophytes qui pourront alors se développer tant que l'éclaircissement sera suffisant. de Bazelaire (1997) a montré que trois ans après le passage de la charrue rotative, si la Molinie et la Bourdaine étaient défavorisées par rapport aux témoins, ce travail du sol favorisait en revanche l'Ajonc nain, la Ronce et surtout les Éricacées (Bruyères, Callune). Cet avantage aux Éricacées est temporaire, cette même étude montrant que la Molinie « reprend le dessus » au bout de 8 à 10 ans. De plus, il apparaît bien que ce travail

⁸ Rapport entre la surface et la masse sèche d'une feuille ou d'une aiguille.

du sol à la charrue rotative provoque, trois ans après, une légère augmentation du nombre total des espèces, sans doute en favorisant la germination de certaines d'entre elles. Mais là aussi, ce léger gain de biodiversité végétale, correspondant à une reprise de la dynamique végétale, est sans doute fugace. Timbal et Maizeret (1998) soulignent aussi que le débroussaillage mécanique et régulier des parcelles provoque des modifications floristiques analogues, la période de l'année au cours de laquelle ces engins sont passés et la périodicité de ces passages pouvant favoriser telle ou telle espèce suivant son cycle phénologique. Ils constatent qu'en lande humide à Molinie et Avoine de Thore, le débroussaillage régulier avec le girobroyeur favorisait l'avoine de Thore aux dépens de la Molinie ce qu'ils attribuent au décalage phénologique existant entre ces deux espèces. Trichet et Gelpe (1992) ont montré que la fertilisation du sol par l'apport de phosphates, une pratique largement répandue en sylviculture du pin maritime, favorise le développement de la Fougère au détriment de la Molinie.

La dynamique de végétation en sous étage des peuplements de Pin maritime avait fait l'objet d'une série d'études visant à la valorisation économique de la végétation, notamment en Lande « humide » caractérisée par une profondeur de nappe allant de la surface en période de crue (novembre à mai) et 1.5 à 2.0m en période d'étiage (juillet - août - septembre). La productivité aérienne du tapis végétal sous forêts est limitée et varie entre 0.7 et 2.0 tonnes de matière sèche $ha^{-1} an^{-1}$ en fonction de l'ouverture du couvert et de l'apport éventuel de fertilisants (fig. 4, Lemoine et al. 1983). Le régime de coupe, influe également sur la production en matière sèche : la production de l'année n est favorisée par une coupe tardive durant l'année $n-1$ mais pénalisée en cas de coupes successives. Le potentiel fourrager de la végétation sous forêt est modeste (Bergeret, 1980). Le stock de biomasse de la végétation du sous-étage atteint 6.8% et 27.4% des stocks aérien et souterrain de l'écosystème respectivement (Gonzalez et al. 2013). Les racines fines peuvent aller jusqu'à constituer près de 70% de l'ensemble. La Molinie est une des espèces les plus dynamiques en sous-bois et peut représenter un indice foliaire dépassant $4 m^2 m^{-2}$ et atteindre un indice racinaire de $70.6 m^2 m^{-2}$ (Bakker et al. 2006, Gonzalez et al. 2013).

La végétation typique de la Lande humide aujourd'hui est donc fortement liée aux activités sylvicoles avec un ensemble dominé par des graminées sociales hygrophiles, dont la Molinie et l'Avoine de Thore.

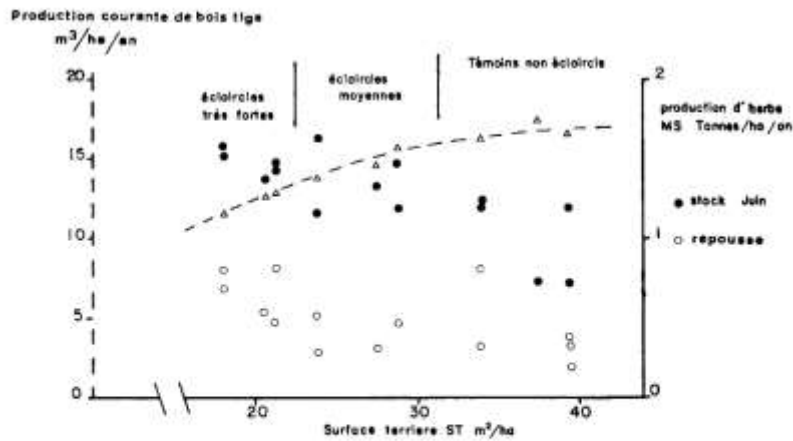


FIG. 3 bis.

Production de bois et d'herbe en fonction de la densité du peuplement forestier (surface terrière par hectare).
Dispositif d'éclaircie de L'Hermitage (30 ans), 1977 et 1978.
Date de la dernière éclaircie : hiver 1975.

Figure 4. (tirée de Lemoine et al. 1983). Relation entre la productivité de la Molinie sous couvert de pins maritimes selon la densité et la surface terrière⁹ du peuplement de pins.

Tableau 3. Biomasse aérienne et souterraine moyenne (moyenne \pm écart-type en g m⁻²) des principales espèces herbacées en sous étage de 5 peuplements de Pin maritime âgés de 15 à 97 ans (tiré de Gonzalez et al. 2013)

Biomass	Species	<i>P. pinaster</i> (n = 24)	<i>M. caerulea</i> (n = 5)	<i>P. aquilinum</i> (n = 5)	<i>C. vulgaris</i> (n = 5)	<i>E. cinerea</i> (n = 5)	<i>C. scoparius</i> (n = 5)
Above	Foliage	503 \pm 63	183 \pm 25 ^a	162 \pm 24 ^a	27 \pm 7 ^a	16 \pm 1 ^a	292 \pm 89
	Branches	962 \pm 153					
	Stems	5440 \pm 1051		69 \pm 11	712 \pm 87 ^a	441 \pm 32 ^a	479 \pm 182
	Total	6866 \pm 1105	183	231	739	457	771
Below	Coarse ^b	1974 \pm 338		802 \pm 115	265 \pm 37	284 \pm 31	366 \pm 140
	Fine	499 \pm 41	1541 \pm 201	609 \pm 80	1214 \pm 152	977 \pm 85	43 \pm 9
	Total	3151	1541	1411	1479	1261	409
Total		12,456	1724	1642	2218	1718	1180

^a For *E. cinerea* and *C. vulgaris*, foliage = annual growth; and stems = old growth.

^b Coarse roots (*P. pinaster*, *E. cinerea*, *C. vulgaris*) and rhizomes (for *P. aquilinum*).

La Molinie (*Molinia caerulea* (L.) Moench) est une graminée pérenne à feuilles caduques de la famille des Poacées (Poaceae), composée d'un rhizome à croissance sympodiale à entrenœuds courts, d'une longue tige fructifère raide à nœud unique caché par des feuilles basilaires et d'une inflorescence en panicule. Elle présente des stomates sur les 2 faces des feuilles mais avec une densité 4 fois plus élevée

⁹ La surface terrière est la projection horizontale de la surface de la section du tronc des arbres à 1.3m de hauteur pour un hectare de surface. Elle s'exprime en m² de surface de tronc par hectare.

sur la face adaxiale, (210 stomates par mm²) que sur la face abaxiale (50 stomates par mm²) (Cochard, 1988). C'est une espèce à large amplitude écologique : caractéristique des prairies et landes humides, on la trouve aussi bien en station ensoleillée, calcaire, presque sèche, qu'en tourbière acide ou en sous-bois ombragé comme c'est le cas dans la forêt des Landes de Gascogne. Le premier stade de son développement phénologique commence en mars dans les Landes (Bergeret, 1980 ; Cochard, 1988). Taylor et al. (2001) ont distingué les quatre premiers stades formés par les premières feuilles, le stade suivant est la montaison (entre mai et juin) et enfin une dernière série de trois feuilles au-dessus de l'entrenœud (entre juin et juillet). Après la floraison (fin juillet début août) on note une augmentation du nombre de feuilles sénescentes, jusqu'en novembre où toutes les feuilles sont mortes, (Taylor et al., 2001).

L'Avoine de Thore (*Pseudoarrhenaterum longifolium* (Thore) Rouy) est une espèce qui se localise principalement sur la côte de l'Océan Atlantique. C'est une graminée cespiteuse considérée comme proche de l'Avoine d'hiver (*Triticum aestivum* L.) étudiée par Haun (1973). Il a défini 13 stades phénologiques : de 1 à 10, formés par les feuilles, ensuite le gonflement de la tige, l'émergence de l'épi et l'élongation du chaume. Cette espèce est aussi plus précoce que la Molinie et développe ses premières feuilles dès le mois de décembre.

La Fougère aigle (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn) est considérée comme une espèce à grande amplitude écologique. Elle pousse dans une grande variété de types de sol. Elle est très peu sensible aux perturbations liées à l'herbivorie, le piétinement et le feu (McDonald et al., 2003 ; Oikawa et al., 2004). Des phénomènes d'allélopathie lui ont été attribués (Dolling, 1996 ; Dolling, 1999; McDonald et al., 2003) lui permettant d'entrer en compétition avec les autres espèces herbacées.

Écophysiologie des espèces sociales de la Lande humide.

L'écophysiologie de la Molinie a fait l'objet de différentes études portant sur sa transpiration et sa phénologie (Guinochet et Lemée, 1950 ; Loustau et Cochard, 2008 ; Stahl, 2008 ; Delzon, 2000, Misson et al. 2007, Gobin et al. 2015) et sa photosynthèse (Delzon 2000).

En sous-bois des peuplements de Pin maritime de la lande dite "humide", la Molinie forme un tapis dense continu et monospécifique composé de touffes formées des tiges issues d'un même méristème apical primaire. La phénologie, la biomasse et l'indice foliaire du sous-bois de Molinie ont été étudiées par Bergeret (1977), par Cochard (1988), El Habchi (1989), Martinie (1992) et Vaugeois (1994). La biomasse aérienne est quasiment nulle pendant tout le mois de mars et atteint son maximum à 0.15 Kg m⁻² (soit 1.5t ha⁻¹ ou 0.75tC ha⁻¹) au mois de juillet. L'indice foliaire suit sensiblement la même évolution, 0.98 m² de feuille par m² de sol en mai, 1.46 en juin et 2 au mois de juillet. La transpiration de la Molinie en sous-bois représente 30 à 50% de la transpiration totale du peuplement et est moins affectée par la sécheresse de l'air ou du sol que celle des arbres (Loustau et Cochard, 1991, Berbigier et al. 1991).

Les stomates des feuilles de la Molinie sont sensibles à l'ensemble des facteurs testés in vitro, particulièrement dans la gamme de valeurs rencontrées en sous-bois ou sous panneaux solaires pendant la saison de croissance: densité de flux de rayonnement 400-700 nm de 0 à 2000 μmol photons m⁻² s⁻¹, VPD de 0.5 à 2.5 kPa et température de 15-25°C. Cette sensibilité n'avait pas été observée chez Guinochet et Lemée (1950) mais elle n'est pas surprenante pour une plante hygrophile et héliophile. Elle s'exprime de façon atténuée dans les données de terrain où la conductance stomatique paraît peu variable (Cochard, 1988; Loustau et Cochard, 1991, Berbigier et al 1991). Cette apparente perte de sensibilité en conditions de sous-bois s'explique par le long temps de réponse des stomates à des variations d'éclairement --il atteint 40mn -- et au microclimat lumineux et à ses variations rapides observées sous la canopée des arbres (Delzon 2000).

La Molinie présente aussi la faculté de réduire ses pertes en eau par enroulement de ses feuilles. L'enroulement des feuilles observé pour cette espèce peut contribuer aussi à réduire sa transpiration d'un facteur 3 (Renard et Demessemacker, 1983). La face supérieure des feuilles de Molinie présente une densité stomatique de 200-250 stomates/mm² contre 40-50 pour la face inférieure. L'efficacité de l'enroulement des feuilles pour réduire la transpiration est donc potentiellement importante. Guinochet et Lemée (1950) soulignent les effets limités du contrôle stomatique sur la transpiration de cette espèce, qu'ils attribuent à l'existence d'une transpiration cuticulaire élevée.

En réponse à l'ouverture du couvert par un défrichage ou une coupe, Stahl (2006) a étudié la réponse de la Molinie de l'Avoine de Thore et de la Fougère Aigle en termes de phénologie et de croissance. La Molinie présente un retard de 10 à 15 jours par rapport à en lisière et sous-bois en début de saison mais « rattrape » ce retard ensuite et montre même une avance en fin de saison de croissance. Ce retard d'émergence des feuilles a aussi été observé par Delzon (2000) pour les feuilles de Molinie situées en zone ouverte par un chablis par rapport à celles situées en sous-bois, sans toutefois de différence de vitesse de croissance. Ce retard s'explique assez bien par l'effet d'un défrichage (1) sur le régime thermique du sol, plus froid en zone ouverte, ce qui retarde le développement de bourgeons caulinaires situés au niveau du sol et (2) sur la température de l'air (plus élevée en zone ouverte) ce qui favorise le développement des feuilles. Cet effet est encore plus marqué pour l'Avoine de Thore, plus précoce et dont le développement est avancé de trois semaines en zone ouverte, en concordance avec la synthèse de McMaster (2005).

L'Avoine et la Molinie montrent une adaptation morphologique à l'ouverture du couvert, avec une augmentation du rapport surface sur masse foliaire en zone d'ombrage (Schlichting, 1986 ; Rothstein & Zak, 2001 ; White & Scott, 2006). En revanche on n'observe pas de modification significative de leur appareil photosynthétique ou de leur nutrition foliaire en azote ou phosphore. Ces espèces communes dans les Landes de Gascogne semblent donc bien supporter un changement de régime lumineux (fig. 5).

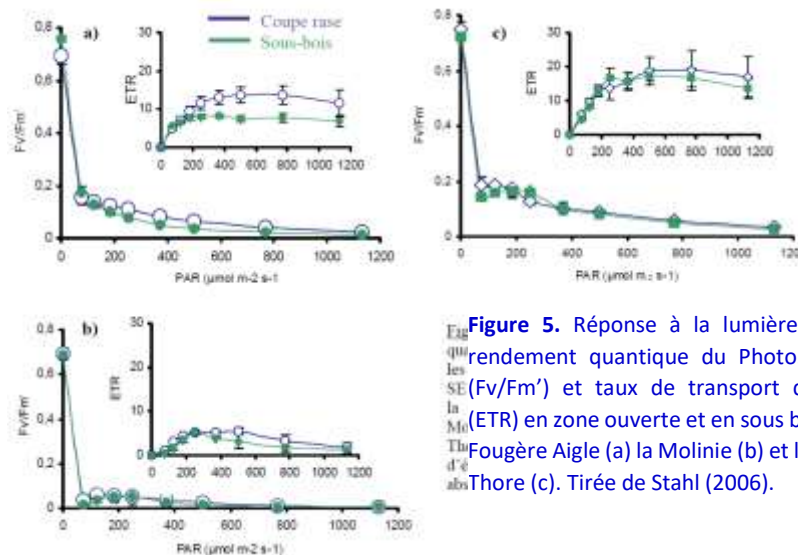


Figure 5. Réponse à la lumière (PAR) du rendement quantique du Photosystème II (Fv/Fm') et taux de transport d'électrons (ETR) en zone ouverte et en sous bois pour la Fougère Aigle (a) la Molinie (b) et l'Avoine de Thore (c). Tirée de Stahl (2006).

Dans une expérience d'ombrage contrôlé, Delzon (2000) montre toutefois que le taux maximal de photosynthèse observé diffère entre les deux traitements d'ombrage, et cela d'autant plus que le stade est tardif. Au stade 3^{ème} feuille, le taux d'assimilation des plantes de soleil est deux fois supérieur à celui des plantes ombrées (fig. 6). Par ailleurs, l'assimilation diminue avec le stade foliaire et cette diminution

paraît plus importante pour les plantes d'ombre que pour celles de soleil : ceci peut s'expliquer par une acclimatation plus importante de la plante à un certain régime lumineux, au fur et à mesure de la saison de croissance. Les trois paramètres, vitesse maximale de carboxylation, flux maximal de transport d'électron et efficacité quantique, sont inférieurs d'environ 60% chez les plantes élevées sous ombrage. En sous-bois de Pin maritime, l'assimilation photosynthétique de la Molinie se caractérise par une capacité de photosynthèse faible sans doute liée à la pauvreté en phosphore de ce milieu.

La Molinie fait preuve d'une certaine capacité à s'adapter à l'ombrage à travers une réduction de la croissance foliaire et une augmentation de la surface massique. Il sera intéressant et utile de suivre l'évolution de cette espèce dans les parcs de panneaux solaires installés après défrichage. Les caractéristiques de notre revue, ainsi que les observations sur le parc de Salaunes, laissent penser que cette espèce devrait facilement s'adapter au microclimat sous panneau. De surcroît, la remontée du niveau de la nappe dans le périmètre sous panneaux solaires, telle que prédite par nos simulations, serait un facteur plutôt favorable à cette espèce qui supporte bien une hydromorphie temporaire (Lemoine et al. 1983). La Molinie réagit assez bien à la fertilisation sous réserve d'un apport complet en nutriments (NPK) qui peut aller jusqu'à doubler la production en matière sèche de certaines de ses provenances géographiques (Franzaring et al., 2008).

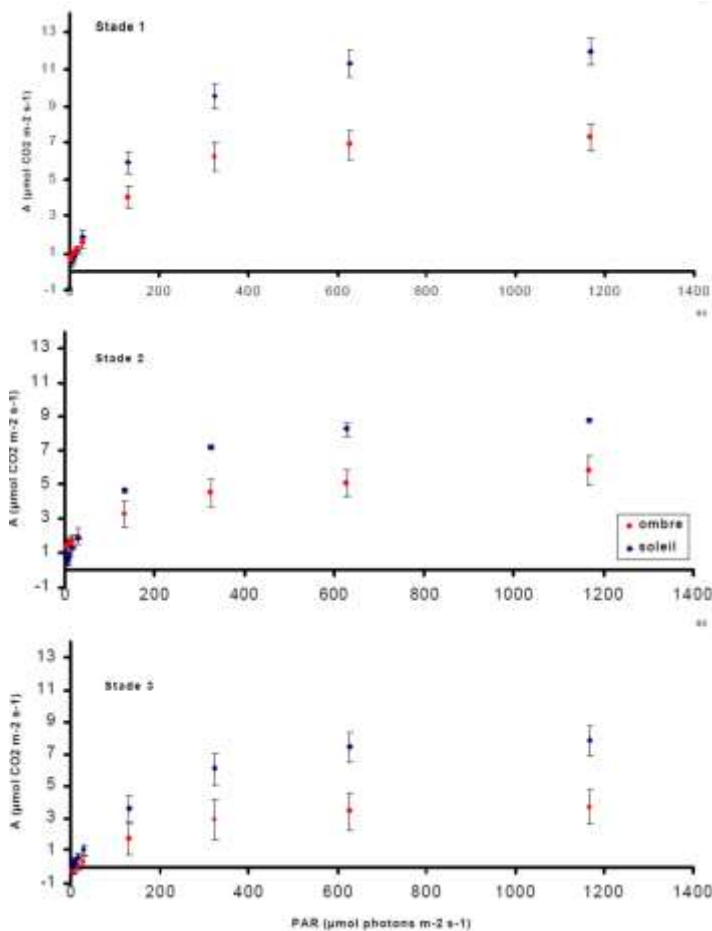


Figure 6. Courbes de réponse à la lumière (PAR) de l'assimilation photosynthétique nette du CO₂ (A) par des feuilles de Molinie élevées sous ombrage (rouge) et témoin (bleu). (Delzon, 2000).

4.1.2 L'impact de panneaux solaires sur la végétation : données tirées d'étude sur l'agrivoltaïsme.

Ce point a fait l'objet de plusieurs études relativement récentes qui ont analysé et comparé le microclimat de parcs photovoltaïques avec celui des terres environnantes qui sont soit des déserts soit des revêtements artificiels (asphalte). Certaines abordent cette question au niveau global (Hu et al. 2016) et d'autres concernent la méso-échelle (Masson et al. 2014).

La dynamique de la végétation sous panneau solaire a été étudiée notamment dans le contexte agrivoltaïque. Les premiers projets agrivoltaïques en France sont proposés par Christian Dupraz (INRAE Montpellier, 2010). Marrou et al. (2013) ont mesuré la croissance et la productivité de plantation de variétés de laitue sous deux densités de rangs de panneaux solaires occultant respectivement 33% et 20% de la surface de sol. La réduction de production en biomasse sous panneau était de 42 et 19% de celle atteinte chez le témoin non occulté pour la première année d'observation (plantation effectuée le 22/07) et de 21 et 0% l'année suivante (plantation effectuée le 22/03). Cette étude pionnière montrait des différences de réponse selon les variétés cultivées et selon la période de croissance. Elle a confirmé la faisabilité économique d'un modèle de production agrivoltaïque qui a depuis été confirmé par différents travaux agronomiques et socio-économiques. L'intérêt de l'option agrivoltaïque en termes d'optimisation des terres disponibles a été souligné depuis par plusieurs études à différentes échelles et pour différents climats, e.g. Tromsdorff et al. (2021), rotations céréales-légumes ou grandes cultures (Adeh et al. 2019), élevage de lapins (Lytle (2021), vigne en Inde (Malu et al. 2017), vaches laitières (Maia et al. 2020, Sharpe et al. 2021) ou Agave (Ravi et al. 2020) ainsi que les freins à son adoption par les agriculteurs (Pascaris et al. 2020). Il existe un potentiel important pour optimiser la production agricole sous panneau sans forte réduction de la production électrique. Parmi les options disponibles les plus prometteuses concernent les propriétés optiques des panneaux (Osterthun et al. 2021), la géométrie du parc, saisonnalité de l'occultation (Miskin et al. 2020).

Bilan de carbone d'origine biogénique

Il existe encore très peu d'études détaillant l'impact de l'implantation d'un parc photovoltaïque sur le bilan de carbone biogénique du périmètre concerné. Dans le cas d'une implantation sur une ancienne prairie sèche et sous climat méditerranéen, le stock de carbone du sol sous ferme solaire est appauvri de -33% comparativement au témoin et cela même après 7 années de revégétation du sol (Choï et al. 2020, Fig. 7).

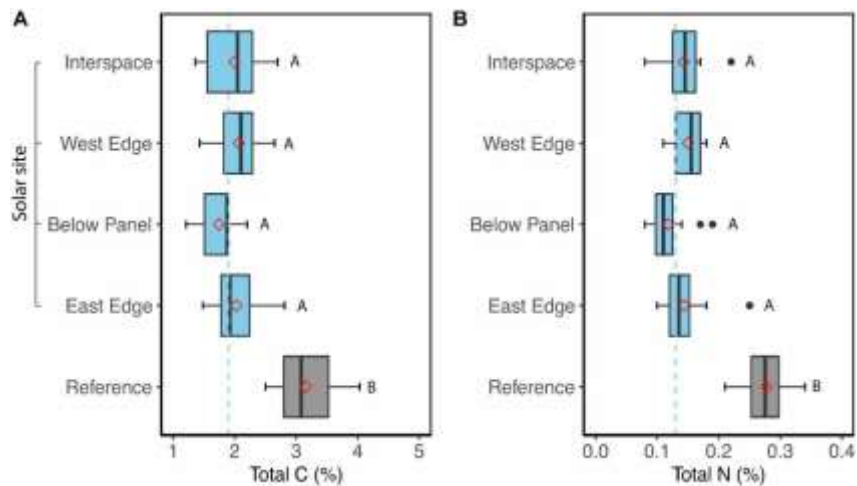


Figure 7. Profils des teneurs moyennes en carbone(A) et azote (B) du sol témoin (grisé) et à différentes positions dans un parc photovoltaïque sous climat sec ($P=373$ mm annuels) dans le Colorado, 7 années après l’installation du parc (tiré de Choi et al. 2020).

Cet effet est attribué à l’exportation des couches organiques superficielles lors de l’implantation du parc, le sol ayant été décapé à l’installation du parc. Il n’existe pas à notre connaissance d’étude sur l’impact de l’implantation d’un parc solaire sur le stock de carbone d’un sol forestier. Cette évolution dépend de facteurs climatiques, édaphiques et microbiens et du changement des apports de carbone organique au sol et demeure donc difficile à prédire (Armstrong, et al. 2014). En prairie tempérée et sous panneaux à large espacement (largeur des allées de 11.4m pour 4.4m de panneaux), les observations de Armstrong et al. (2020) montrent une baisse de photosynthèse, rayonnement utile et de température (-5.4°C) accompagnée d’une diminution de la biodiversité de la prairie. Ils observent aussi une baisse de la demande évaporative sous panneau venant à la fois de la diminution d’énergie disponible ou rayonnement net, R_n , et d’une baisse du déficit de pression de vapeur saturante.

Microclimat et hydrologie

L’impact d’un parc photovoltaïque sur le contenu en eau du sol et le microclimat a été analysé par différents auteurs, avec des conclusions dépendant étroitement du contexte climatique et agronomique. Marrou et al. (2013) ont proposé qu’un parc solaire pourrait améliorer l’efficacité de l’eau de cultures irriguées sous panneaux en climat méditerranéen pour des cultures couvrantes à croissance rapide. Elle montre aussi que l’évapotranspiration potentielle est réduite par la présence de panneaux ce qui réduit les pertes en eau de 14 à 29% par rapport à une culture à découvert (fig. 8).

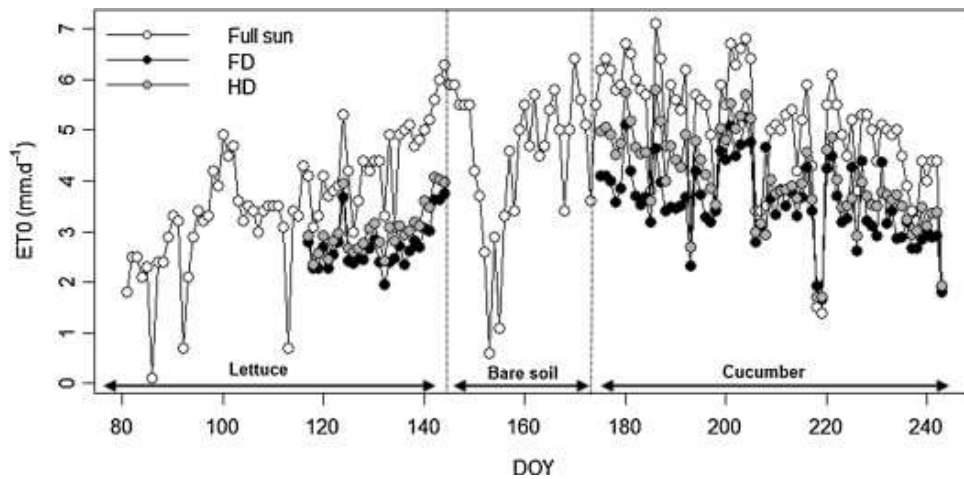


Figure 8. Evapotranspiration potentielle pour un couvert de laitues du jour 81 au jour 144 et un couvert de concombre du jour 175 au jour 244. Full sun : témoin à découvert, FD : panneaux solaires à forte densité ; HD panneaux solaires à faible densité. Tirée de Marrou et al. (2013).

Une réduction de l'évapotranspiration par un parc photovoltaïque sur prairie aride broutée (ovins) est aussi observée par Hassanpour Adeg et al. (2018). Ces auteurs attribuent la forte augmentation (+91%) de la productivité sous panneau dans ces conditions et au printemps à une plus forte disponibilité en eau sous panneau. Ils observent une augmentation importante (+328%) de l'efficacité de l'eau des plantes sous panneau solaire (fig.9).

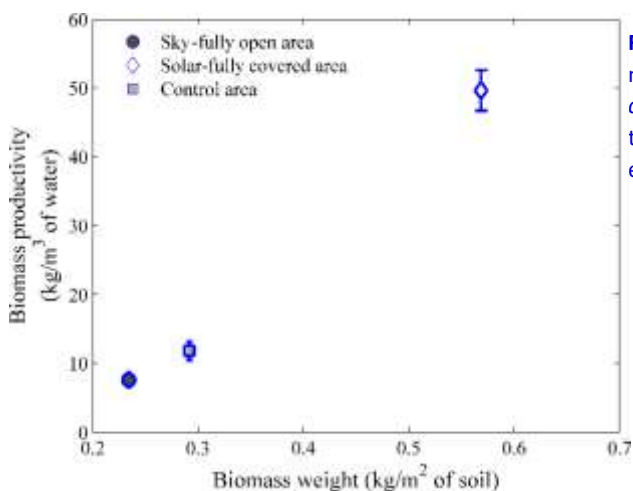


Figure 9. Efficacité de l'eau en relation avec la production en matière sèche entre (sky fully open area) et sous (solar fully covered area) les rangs de panneaux solaires, et comparée au témoin à découvert (Control area). Tirée de Hassanpour Adeg et al. (2018).

Sous climat méditerranéen, la redistribution inhomogène de la pluie au sol dans un parc photovoltaïque pourrait être utilisée dans une stratégie de végétalisation sous panneau solaire (Choi et al. 2020), en veillant par exemple à privilégier les semis dans les zones concentrant la pluie efficace.

Microclimat

L'impact d'un parc photovoltaïque sur le microclimat est lui aussi fortement dépendant des contextes climatiques et du type de végétation à laquelle il est comparé. Il varie entre les saisons et au cours du cycle nyctémère. Dans l'expérience de l'équipe de C. Dupraz, où la superficie des parcs photovoltaïques testés était limitée (860 m²) et les effets d'advection sans doute importants, la température et l'humidité

de l'air n'étaient pas modifiées. La température du sol était en revanche diminuée sous les panneaux de -1.9°C en moyenne à une profondeur de -5 cm durant l'ensemble du cycle de végétation ce qui pourrait retarder et allonger le cycle de développement des plantes présentes (Marrou et al. 2019). La température de surface des plantes était augmentée de +2°C la nuit et réduite de -3°C le jour. Les travaux de Barron-Gafford et al. (2016) en zone aride, qui estiment qu'un effet d'îlot de chaleur serait provoqué par les installations photovoltaïques de grande envergure ont récemment provoqué une controverse intéressante. Ces auteurs ont en effet observé un échauffement local de l'air pouvant atteindre +4°C dans un contexte de désert ou d'environnement urbain et pour une installation de parc solaire sur sol non végétalisé. Ces données contredisent les prévisions de la plupart des modèles sur l'effet de panneaux disposés sur les toits en zone urbaine (Taha 2013, Masson et al. 2014). Cet échauffement est surtout attribué à la quasi absence d'évaporation depuis le périmètre du parc. Les mesures micrométéorologiques *in situ* réalisées par Broadbent et al. (2019, photo ci-dessous) confirment qu'un parc photovoltaïque modifie le bilan d'énergie local par les facteurs suivants:

- Une réduction des émissions dans l'infra-rouge lointain (émissivité de 0.83 face supérieure et 0.97 face inférieure), contre 0.95-0.98 pour le sol et la végétation ;
- Une diminution du stockage de chaleur (faible capacité thermique) ;
- Un albédo plus faible que le site de référence (0.2 vs 0.3). Pour information, l'albédo d'un couvert de pins maritimes est de 0.06-0.08 ;
- Une rugosité et un indice de surface importants qui facilitent la dissipation de chaleur sensible.



- **Figure 10.** Dispositifs expérimentaux de l'expérience de Broadbent et al. (2019) (1 et 2) et de Armstrong et al. (2016) (3 à 6).

Un refroidissement par un parc photovoltaïque est aussi observé par Zhang et Xhu (2020) en termes de température moyenne annuelle avec une approche basée sur la mesure par télédétection de la température de surface de 23 parcs photovoltaïques de 5 à 92 km², avec un effet moyen de -0.81°C dans la journée et de -0.24°C la nuit. Une étude micrométéorologique de Chang et al. (2018) conclut à un effet moyen global refroidissant sur l'ensemble d'un parc en zone aride. Cependant, la température de surface des panneaux présente un écart à la température de l'air pouvant atteindre au maximum +11.5°C, cet écart étant au contraire négatif la nuit. Cet échauffement de la surface des panneaux explique le flux de chaleur sensible accru du parc photovoltaïque relativement au périmètre hors parc. Dans cette étude comparative, le flux de chaleur sensible, H , est accru de 104.5 Wm⁻² en moyenne. La température de l'air à 1.5m est augmentée de +1.3°C dans la journée et inchangée la nuit. De telles modifications confirment les observations de Barron-Gafford. Elles restent toutefois limitées au contexte désertique, où un parc est comparé à un sol nu (fig. 10) et où le flux de chaleur latente, LE , (ou évaporation) est pratiquement absent. Elles ne peuvent donc être étendues au cas d'une forêt et d'un parc comportant une couche de végétation au sol en climat tempéré. Le rôle des caractéristiques géométriques du parc, des propriétés radiatives et

thermiques des matériaux utilisés et du mode de conduite de la végétation sous panneau jouent un rôle déterminant pour l'impact microclimatique d'un parc comme le soulignent dans leurs conclusions Broadbent et al. (2019) et Chang et al. (2018).

Sur prairie et en climat tempéré, Armstrong et al (2016) ont mesuré une diminution significative de température dans un parc solaire. En été, un refroidissement de $-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ainsi qu'une baisse d'humidité de l'air et du déficit de pression de vapeur saturante sont observés sous les panneaux. En hiver, la baisse de température est de $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les fluctuations temporelles de température et humidité sont réduites sous parc.

Nous n'avons pas trouvé de références concernant l'impact potentiel du remplacement d'une végétation forestière par un parc photovoltaïque enherbé. Cette question demeure ouverte, car le bilan radiatif et les transferts d'énergie en forêt tempérée sont très différentes des zones arides, prairies ou cultures diverses évoquées ici. Le rayonnement net et les flux convectifs de chaleur depuis un couvert forestier sont en effet plus élevés que pour des couverts moins développés, de même que le stockage de chaleur par la biomasse.

Signalons qu'à l'échelle globale, Hu et al (2015) ont envisagé 3 hypothèses de développement d'installation photovoltaïque et montrent avec un modèle à grande échelle que l'impact global d'un développement à grande échelle de parcs photovoltaïques est un refroidissement par rapport à une situation de référence, même à faibles émissions fossiles (RCP 2.6). Cette conclusion rejoint l'analyse de Nemet (2009).

4.2 Mesures de rayonnement transmis au sol sous parc photovoltaïque

La figure 11 montre les résultats obtenus et compare la moyenne des 12 capteurs au sol au rayonnement incident au niveau $z=2.5\text{m}$ pour les deux sites de mesure. Sur l'ensemble des deux périodes de mesure, ne sont présentées que les journées où la totalité des capteurs a fonctionné, hors panne de batterie (Salaunes) ou dégâts liés aux animaux présents (Langelé).

On remarque la forte dispersion des valeurs de rayonnement transmis sous panneau pour les deux sites, figurée par l'aire bleue sur la figure 11. À Salaunes, certaines zones sous panneau sont laissées constamment à l'ombre ce qui n'est pas le cas à Langelé où le pivotement des panneaux ne laisse aucune zone ombrée en permanence. Le rayonnement transmis sous les panneaux et disponible pour la végétation au sol correspond en moyenne à 40.0% et 49.5% du rayonnement incident à Salaunes et Langelé respectivement. Le parc à traqueurs mobiles de Langelé, dont la surface de panneau ramenée au sol est moins importante, est moins performant pour intercepter le rayonnement 400-700nm que le parc de Salaunes. À Salaunes, on remarque le surcroît de rayonnement solaire apporté par la réflexion par les nuages du rayonnement direct au cours de deux journées du 26 et 27 mars où le rayonnement incident excède par intermittence le rayonnement mesuré par ciel clair les jours voisins.

Les données observées sur le site de Salaunes ont servi à recalibrer le modèle GO+v3.1. Cette version du modèle nécessite une calibration car elle ne prend pas en compte toutes les rediffusions et les propriétés optiques des panneaux ont été paramétrée avec des valeurs par défaut. La période de mesure a permis de déterminer la fraction de rayonnement transmis en condition de ciel diffus (journée du 25 mars) et de ciel clair (28 au 30 mars). La valeur instantanée (minute) du coefficient de transmission du rayonnement sous panneau, telle que mesurée ici, varie de 0.29 en condition de ciel couvert (matinée du 25 mars) à 0.60 en conditions de ciel clair (28-30 mars). À Langelé cette fourchette va de 0.19 à 0.71. La valeur observée sous ciel couvert à Salaunes (rayonnement diffus), 0.52, est supérieure à la valeur calculée par GO+ pour cette installation (coefficient moyen pour le diffus de 0.444). La valeur de ce coefficient dans le

modèle a donc été modifiée en conséquence d'un facteur 0.52/0.444. Les modélisations du bilan de carbone développées ci-après pour le parc de Saucats tiennent compte de cette correction.

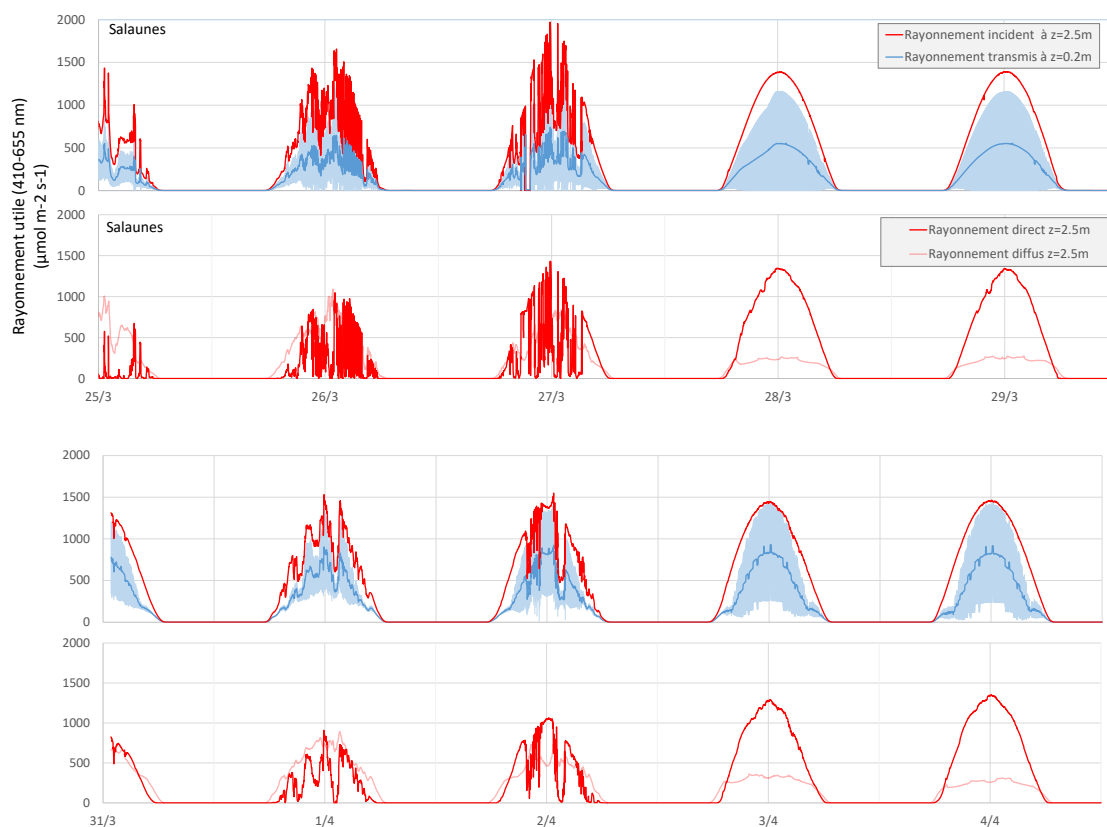


Figure 11. Séries temporelles des valeurs mesurées de rayonnement visible incident sur les sites de Salaunes (panneaux fixes) et de Langelé (trackers). Pour chaque site, le diagramme supérieur représente le rayonnement incident (rouge) et la moyenne du rayonnement transmis sous les panneaux au niveau $z=0.2\text{m}$ (bleu) \pm un écart-type (aire bleutée), mesures effectuées avec les capteurs de type *Apogee*. Le diagramme inférieur montre le rayonnement direct (rouge) et le rayonnement diffus incident (rose) mesuré avec le capteur BF5 5, Delta-T devices).

4.3 Biomasse de la végétation des parcs Solaires de St Germain et Salaunes.

Les valeurs moyennes de densité de biomasse de la végétation sous parc photovoltaïque sont dans le même ordre de grandeur que sous pinède pré adulte, avec une composition dominée par les herbacées annuelles non ligneuses, fougère et molinie, alors que le sous-bois de la pinède de Bilos est dominé par les ajoncs nains et d'Europe et les mousses. Elles correspondent à un stock de carbone de 1.22 et 2.25 tC ha⁻¹ pour les parcs de Salaunes et de Saint-Germain de Peyrissan (commune de Saint-Germain d'Esteuil) respectivement. On remarque également que la biomasse du parc de Saint-Germain d'Esteuil est la plus élevée. La fauche plus tardive sur ce site qu'à Salaunes pourrait être une explication.

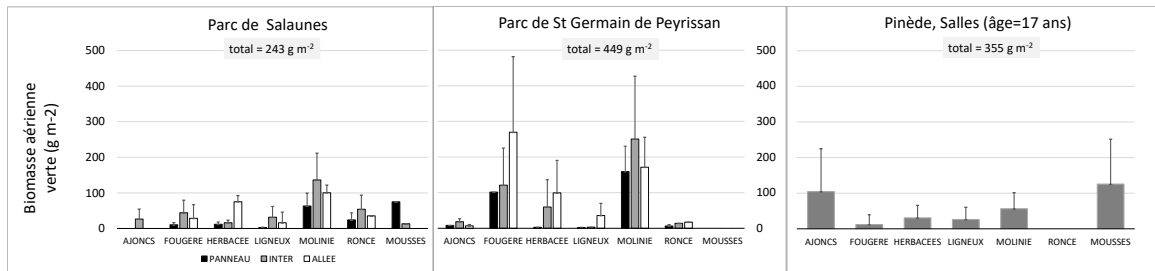


Figure 12. Biomasse sèche à 65°C des parties vertes de la végétation des parcs photovoltaïques de Salaunes et de St Germain de Peyrissan, comparée à la végétation accompagnatrice d'un peuplement de Pins de Lande Humide à Bilos (commune de Salles). Les barres donnent la valeur moyenne des prélèvements, les traits verticaux l'écart-type de la moyenne. La valeur encadrée est la densité moyenne en biomasse verte du site.

4.4 Simulation du parc photovoltaïque de Saucats avec le modèle GO+

4.4.1 Dynamique de la végétation spontanée sous panneaux solaires.

La croissance en biomasse de la végétation du sous étage est modélisée à partir des processus de phénologie, transferts radiatifs, transferts turbulents, photosynthèse et respiration qui ont été étudiés et paramétrés en condition forestière et pour un petit nombre d'espèces. Par ailleurs, la mise en réserve et la remobilisation des différents composés glucidiques et la valeur de la biomasse de la banque de semences et propagules dans le sol sont inconnues et paramétrés de façon empirique. Même si nous ne pensons pas que ces simplifications puissent modifier nos résultats et conclusions, nous ne savons pas dans quelle mesure ces approximations peuvent s'appliquer en conditions de parc photovoltaïque et les résultats ci-après, obtenus à partir d'un paramétrage déterminé sous pin maritime, doivent donc être considérés avec prudence.

Les diagrammes de la figure 13 illustrent la dynamique comparée de la végétation pour un peuplement de pins de 17 ans en 2020 selon un mode de gestion semi-dédié et sous panneaux solaires telle que simulée pour le scénario RCP 4.5. Avec le paramétrage adopté et pour cette classe d'âge, le stock de biomasse serait accru de 48% sous panneau solaire comparativement à un peuplement d'âge initial de 17 ans. On projette ainsi une augmentation de 0.5 points d'indice foliaire (moyenne 2025-2100, RCP4.5) par rapport à la végétation en sous-étage de la forêt de référence. La valeur moyenne du stock de biomasse du sous-étage sous panneau est ici supérieure à celle projetée sous forêt (typiquement : 9.4 tC ha⁻¹ sous panneau contre 6.3 tC ha⁻¹ en forêt). Il faut cependant noter que ce résultat est fortement dépendant des classes d'âge et régime de coupe de la forêt de référence. La végétation sous forêt se développe activement durant la période après coupe et dans la phase juvénile, où le couvert arborescent est absent. Le stock de biomasse peut s'accroître jusqu'à 24 tC ha⁻¹, comme ici en en 2063 après une coupe rase. Sous un couvert mature en revanche, le stock de carbone de la végétation n'est que de à 1.6tC ha⁻¹ en moyenne (année 2045). En forêt, les opérations de débroussaillage sont espacées de 10 ans en moyenne et n'affectent que 75% de la surface pour les travaux sur peuplement installé et 100% uniquement lors de la préparation du sol avant plantation. Sous le parc, nous avons ici appliqué un régime de fauche tardive avec une date fixée au 15 octobre, qui pénalise peu la production de biomasse.

On remarque aussi que :

- sous forêt, la végétation en sous-étage est d'avantage exposée aux périodes de déficit hydrique, du sol, auquel elle est très sensible. En raison du relèvement du niveau de la nappe phréatique, ces périodes de sécheresse édaphique sont moins fréquentes sous le parc (cf. section hydrologie).

- la quantité de rayonnement intercepté par les panneaux solaires (configuration « Saucats » du tableau 1) est peu différente des valeurs correspondantes en forêt de Pin.

**Forêt de référence (âge 17 ans)
en conduite semi dédiée**

Parc photovoltaïque (Saucats)

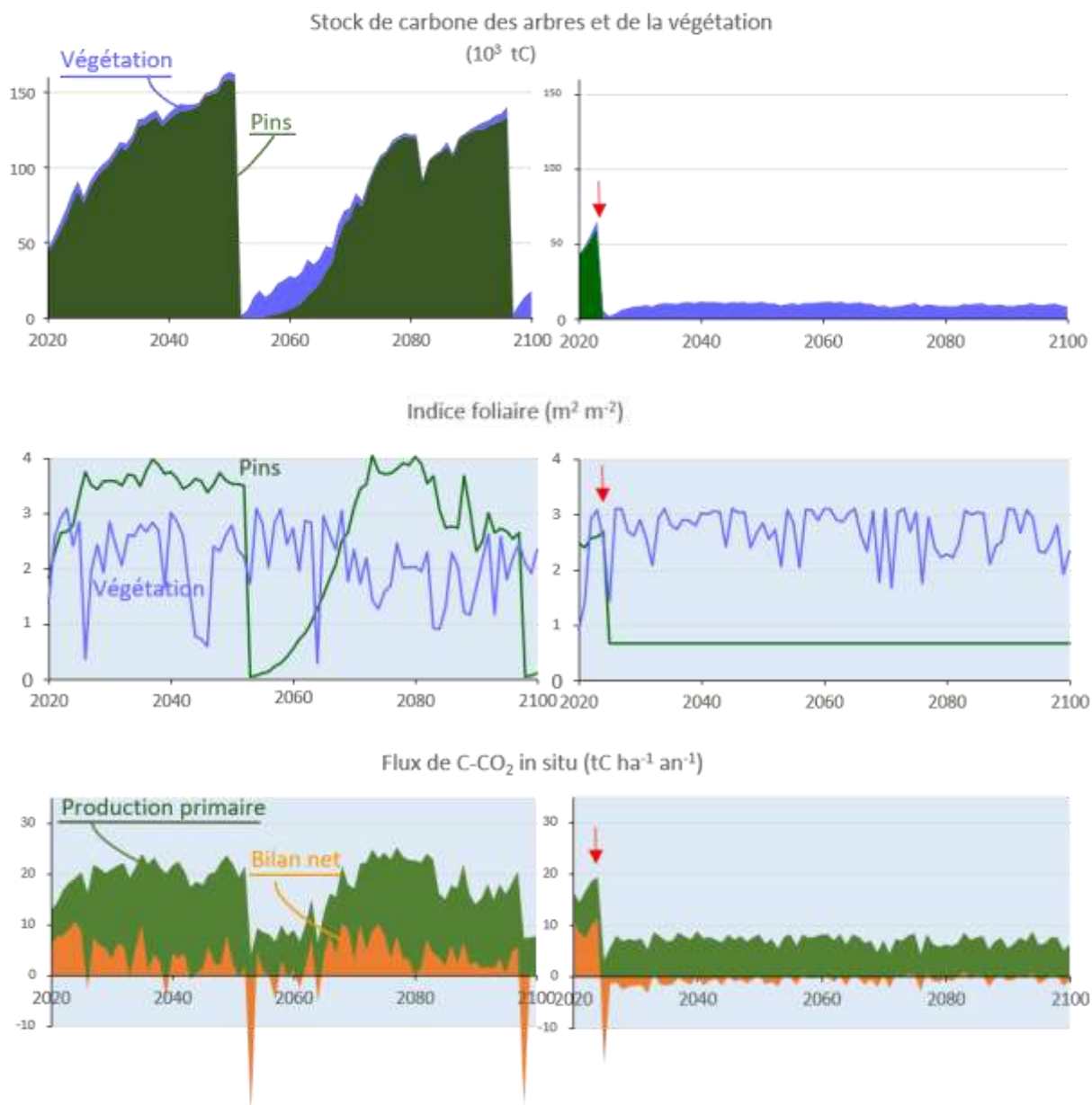


Figure 13. Dynamique du fonctionnement de la végétation après installation des panneaux solaires simulée pour le parc de Saucats, RCP45. La colonne gauche donne les projections pour un peuplement de pins âgé de 22 ans conduit en mode de gestion semi dédiée, à titre de référence (ce mode ne serait en fait pas celui appliqué par le GF du Murat). La colonne droite donne les séries temporelles du parc photovoltaïque installé en 2024 (flèches rouges). Le carbone des produits récoltés n'est pas pris en compte dans ces diagrammes. De haut en bas :

- Stock de carbone dans la biomasse sur pied pour l'ensemble du périmètre défriché (en milliers de tonnes de carbone);
- Indice foliaire des arbres (ou panneaux à droite) et de la végétation en sous étage;
- Flux de carbone C-CO₂ *in situ* : production primaire brute et flux net échangé avec l'atmosphère exprimés en tC-CO₂ par hectare et par an.

4.4.2 Bilan d'énergie du parc de panneaux solaires

Afin d'apprécier l'effet du remplacement du couvert forestier par le parc photovoltaïque, les composantes du bilan radiatif et du bilan d'énergie ont été calculées avec une résolution horaire pour le cas d'un peuplement de pins initialement âgé de 17 ans en 2020 et sous le scénario RCP45. Cette projection est donnée à titre d'exemple pour la période 2020-2030, le calcul pour l'ensemble du projet HORIZEO sortant du cadre de cette étude¹⁰. Les restrictions mentionnées plus haut étant spécifiées, nous montrons que (fig. 14):

- 1) Le rayonnement net absorbé par le parc photovoltaïque est diminué de 11.2% par rapport à celui absorbé par le couvert forestier, de 104 W m^{-2} contre 96 W m^{-2} en moyennes annuelles. Les variations saisonnières et interannuelles de ces flux au-dessus de la forêt sont comme attendu plus marquées que pour la ferme solaire. La strate de pins présente absorbe une quantité d'énergie radiative plus élevée que la couverture de panneaux solaires, 67 contre 47 W m^{-2} . En revanche, et en raison de son indice foliaire plus élevé, la végétation sous panneau absorbe 42% d'énergie de plus que la végétation sous une couverture de pins maritimes de 17 ans.
- 2) Comparativement à la forêt de Pin, où 60 % de l'énergie absorbée est dissipée sous forme de chaleur latente, *LE* (évaporation), et 40% sous forme de chaleur sensible, *H*, l'énergie absorbée par le parc photovoltaïque est restituée dans des proportions inverses, de 47% et 53% respectivement.

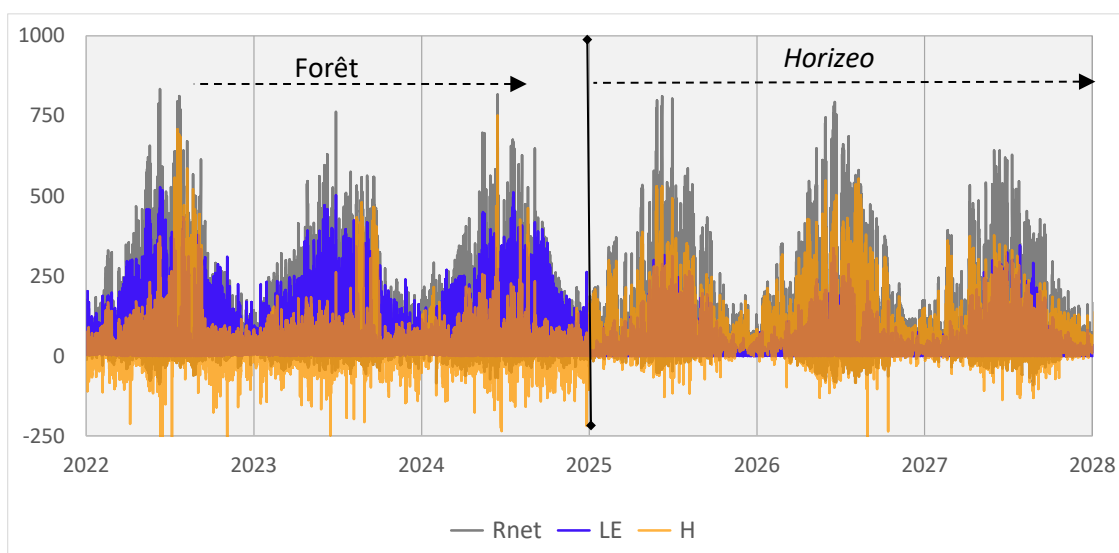


Figure 14. Rayonnement net absorbé (Rnet) et des flux de chaleur sensible (H) et latente (LE) avant et après la construction du parc photovoltaïque et déboisement d'un peuplement de Pins maritimes de 17 ans. (Point 7500, RCP45).

- 3) La dissipation du rayonnement net absorbé, *Rn*, sous forme de chaleur sensible (et la production d'électricité) peut potentiellement provoquer un effet d'îlot de chaleur localisé mais, comme cela a été évoqué précédemment, cet effet est discuté dans la littérature. Nous montrons ici que les valeurs maximales journalières du flux de chaleur sensible ne semblent pas très différentes entre le parc solaire et la forêt de Pins, ce qui irait dans le sens des conclusions de Armstrong et al. (2014) sur des parcs photovoltaïques enherbés, qui observent qu'une couverture de panneau solaire a un effet plutôt refroidissant relativement à la prairie avoisinante.

¹⁰ Une proposition de projet de recherche en partenariat sera déposée pour étudier l'impact climatique de parc photovoltaïque dans le contexte de la forêt landaise et des vignobles limitrophes en janvier 2022 auprès de la Région nouvelle Aquitaine.

L'impact microclimatique de parc solaire en conditions forestières reste à vérifier, nos simulations ne permettant pas de conclure en l'état sur ce point. L'effet d'îlot de chaleur d'un parc solaire dépend fortement des conditions environnantes de référence (sol nu, désert, aire bétonnée ou asphaltée) et n'a pas été déterminé en conditions forestières. Nos résultats, obtenus avec un modèle simple, ne semblent pas indiquer de possibilité d'un tel effet d'îlot de chaleur. Compte tenu des approximations utilisées dans nos modélisations, cela reste cependant à confirmer par des mesures expérimentales.

4.4.3 Hydrologie

Suivant une approche similaire et à titre d'illustration, nous avons projeté l'impact du projet sur l'hydrologie locale sur la période 2020-2100 en comparant l'évapotranspiration, le drainage profond et la piézométrie, sous forêt de référence et sous le parc photovoltaïque. La classe d'âge 6 des peuplements inventoriés par le groupement forestier du Murat (22 ans, 400 tiges ha⁻¹, cf. annexe 4) est prise ici en exemple. Nos résultats montrent que le remplacement de la forêt par les panneaux photovoltaïques réduit l'évapotranspiration du périmètre de 67%, de 690 à 294 mm an⁻¹ (figure 15). Cette diminution est due à la disparition de la canopée des arbres. La quantité de pluie interceptée et ré-évaporée par une canopée forestière représente jusqu'à plus de 20% des précipitations annuelles pour la seule canopée des arbres soit 200 mm an⁻¹ environ pour la forêt de Pin maritime (Loustau *et al.* 1992a et b). Cette composante de l'évapotranspiration est diminuée après installation du parc, les panneaux solaires ne retenant qu'une quantité minimale de la pluie incidente. La transpiration des arbres, qui représente entre 300 et 400 mm an⁻¹ sous les conditions climatiques testées ici, est quant à elle totalement annulée. Le flux de chaleur latente émis depuis la surface des panneaux solaires est de 1.1 W m⁻² (moyenne annuelle 2025-2100 sous RCP4.5) contre 29.5 W m⁻² pour les arbres d'un peuplement de 22 ans en 2020 RCP4.5). Il correspond à l'évaporation des films d'eau retenu à la surface des panneaux pendant et après les épisodes de précipitations.

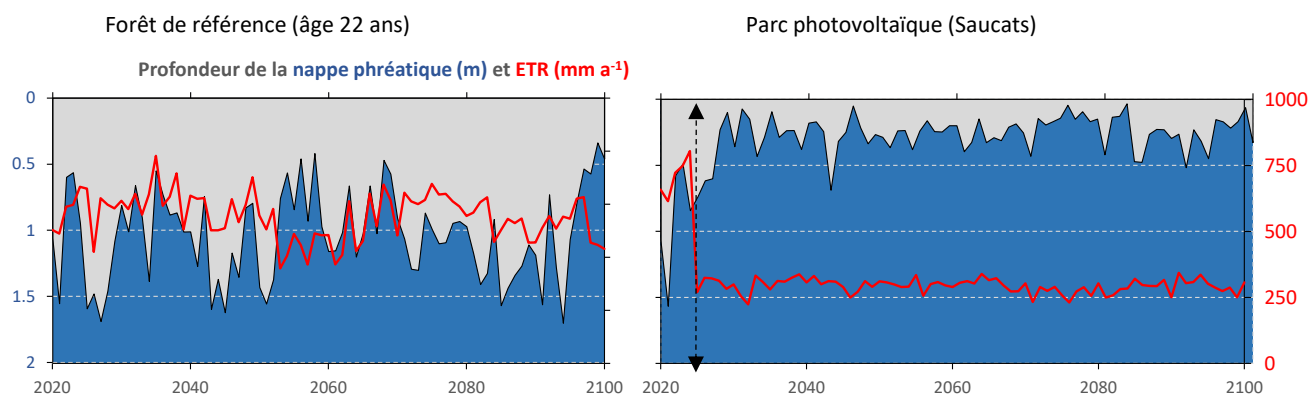


Figure 15. Evolution de l'évapotranspiration annuelle de 2020 à 2100 en forêt (âge 22 ans en 2020) et pour le parc photovoltaïque installé en 2024 (scénario climatique RCP 4.5, sylviculture semi-dédiée). Evapotranspiration totale (courbe rouge) et profondeur sous le sol de la nappe phréatique (aire bleue).

L'évapotranspiration du sous-étage est peu modifiée relativement à la forêt. Le flux de chaleur associé, *LE*, est légèrement accru : la moyenne 2025-2100 sous un peuplement de pins 22 ans en 2020 atteint 11.6 W m⁻² contre 13.1 W m⁻² pour le parc. Inversement et en réponse à l'augmentation de l'indice foliaire de

la végétation, l'évaporation du sol du parc est au contraire légèrement diminuée, passant de 11.5 sous forêt à 8.5 Wm^{-2} dans le parc.

En conséquence, le drainage vers la nappe sous le parc de panneaux solaires est augmenté : il représenterait 676 mm an^{-1} pour le parc contre 362 mm an^{-1} sous la forêt et pour cet exemple. Pour un réseau de drainage inchangé¹¹, le niveau moyen de la nappe phréatique serait en conséquence plus élevé de +0.5 à +1.0m sous le parc photovoltaïque suivant les années (fig. 15). En régime de crue, la nappe affleure à la surface du sol 4 années sur 5 après installation des panneaux solaires, ce qui ne se produit en moyenne qu'une année sur 5 sous forêt.

4.5 Bilan de carbone du projet de parc de Saucats

Approche conduite

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 (tronc, branches et souche selon l'ITS appliqué).

La figure 16 illustre l'approche comparative conduite pour établir le bilan des stocks de carbone du projet. Le peuplement pris ici en exemple correspond à la classe 7 des peuplements inventoriés en 2020 (16 ans). La figure montre la dynamique des compartiments sol et biomasse sous l'option « forêt » et sous l'option « panneaux photovoltaïques » de 2020 à 2100. Les deux courbes en tirets montrent l'évolution des stocks dans le périmètre du projet *Horizeo* : le carbone stocké dans la biomasse est immédiatement ramené à une valeur proche de zéro en 2025 tandis que le stock de carbone de la matière organique (rémanents, litière, couches organiques et sol minéral) est accru par les rémanents. Les courbes en trait plein représentent l'évolution des stocks en forêt. Le bilan du projet est la somme des deux différences entre les deux courbes, ΔC biomasse d'une part et ΔC sol d'autre part.

¹¹ La vitesse de vidange naturelle de la nappe phréatique a été calée sur les observations en forêt du site du Bray, commune de Cestas, de 1987 à 2007. Elle correspond à un réseau de drainage forestier standard avec des fossés atteignant 1m de profondeur en moyenne.

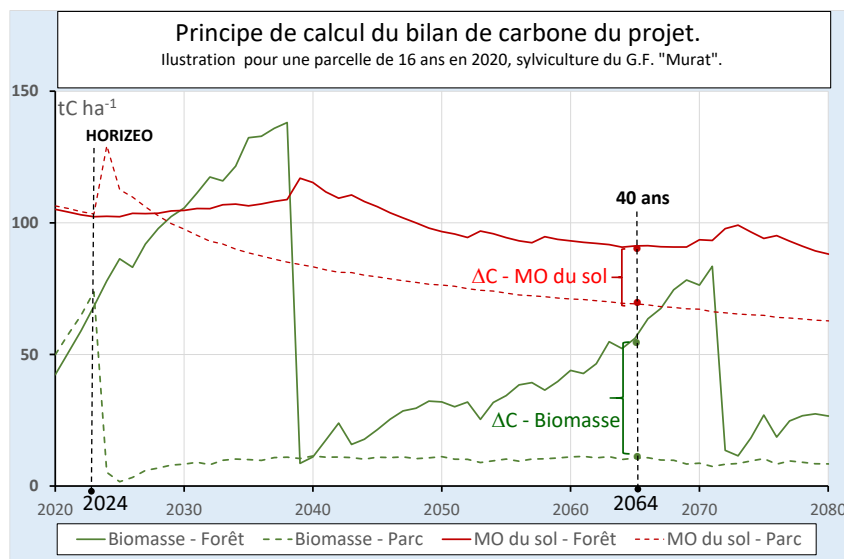


Figure 16. Évolution des stocks de carbone dans la biomasse (vert) et le sol (rouge) pour un peuplement de pins de 16 ans en 2020 (traits pleins) et pour le parc photovoltaïque installé après déboisement (pointillés). La date d'installation du parc est fixée en décembre 2024, scénario RCP45, sylviculture intensive. ΔC Mo du sol et ΔC biomasse illustrent le calcul du bilan de carbone du projet après 40 ans d'amortissement (2064).

Bilan du projet Horizeo

Pour le calcul du bilan global du projet, les simulations ont été réalisées pour chacune des 12¹² classes de peuplement (10 classes d'âge de Pin maritime et deux classes de Chênes), selon deux modes de sylviculture du Pin maritime, « semi-dédié » (ONF, Sardin 2003) ou « intensif » (Groupement forestier du Murat)¹³ et pour deux scénarios de climat, RCP 4.5 et RCP 8.5 (annexe 3). Le bilan global du projet est la somme du produit des simulations de chacune des 12 classes de peuplement par les superficies forestières affectées par la construction du projet *Horizeo* soit 1772 ha. Il est calculé pour les 4 cas possibles de sylviculture \times scénario de climat. Le bilan comparatif en tableau 4 présente aussi la production récoltée et les émissions fossiles provoquées par les travaux de sylviculture et de transport des produits forestiers post-récolte. Chacun des tableaux 4a à 4d donne les stocks de carbone de l'ensemble du périmètre *Horizeo* affecté par la conversion des surfaces boisées en panneaux solaires et selon les données de superficie fournies par ENGIE (annexe 4). Les tableaux 4a et 4b donnent les différences entre forêt de référence et *Horizeo* de 2020 à 2100 pour une sylviculture intensive, les tableaux 4c et 4d donnent ces informations dans le cas d'une sylviculture standard de type semi-dédiée. Les tableaux 4a à 4d sont identiques et construits de la façon suivante. Dans chaque cellule du tableau, la valeur indique le bilan du stock de carbone par rapport à l'année de référence 2024, ΔS (tC ha⁻¹), soit :

$$\Delta S = \sum_{i=1}^{14} (a_{i,y} \times \bar{s}_{i,y-2,y+2} - a_{i,2024} \times s_{i,2024}) \quad (1)$$

où $a_{i,y}$ est la superficie occupée par la classe i à l'année y (ha), \bar{s}_i la moyenne glissante sur 5 ans du stock de carbone pour cette classe (tC ha⁻¹). L'équation (1) s'applique indifféremment à la biomasse (colonne

¹² Deux des 14 classes définies d'après les données d'inventaires ne sont pas concernées par le projet *Horizeo* (cf. annexe 4).

¹³ Dans les deux options de sylviculture les taillis de chênes sont inchangés, ils demeurent conduits en taillis selon l'Itinéraire Technique Sylvicole résumé en annexe 5.

1), au sol (colonne 2) et au cumul du carbone récolté (colonne 4). Le sous-total biomasse + sol est calculé (colonne 3) ainsi que le total sol + biomasse + produits récoltés (colonne 5).

Le bilan des stocks de carbone en forêt est indiqué à la ligne (1). La ligne (2) donne celui du projet *Horizeo* décomposé en deux sous-lignes : la sous-ligne « PV » correspond aux surfaces converties en panneaux solaires soit une superficie au sol de 1053 ha, et la sous-ligne « Pin » aux surfaces restant en sylviculture (689 ha). À cette surface, s'ajoutent 30 ha initialement boisés et convertie en bâtiments (électrolyseur, stockage batterie, ainsi que la superficie en agri-énergie - photovoltaïque et production agricole - qui est comptabilisée dans cette analyse comme ayant le même impact qu'un bâtiment).

Les produits récoltés (colonne 4 « Produits récoltés ») correspondent aux opérations sylvicoles suivantes, et, selon chacune des lignes, aux composantes suivantes :

- Ligne 1 : récolte des peuplements de référence exploités en mode intensif ou standard.
- Sous-ligne 2 – PV : récolte des peuplements coupés, tous en 2024, soient 30 542 tC en RCP 4.5 et 26 005 tC en RCP 8.5 dans le cas du projet *Horizeo* (sous ligne « PV »).
- Sous-ligne 2 – Pin : récolte des peuplements coupés en 2024 et stock récolté issu des peuplements de pins ou de chênes conservés dans la zone d'étude après 2024 (689 ha soit 34.6% de la superficie totale prise en compte) et exploités.

Les valeurs sont calculées par moyenne glissante sur 5 années centrées sur quatre périodes : après 30 ans ($y = 2054$), 40 ans ($y = 2064$) et 50 ans ($y = 2074$) dont la valeur est calculée sur la moyenne 2096-2100. Pour chaque période, le bilan de carbone sol-biomasse est donné par la différence forêt-parc ((2) – (1)), en caractères gras. La dernière ligne (ligne inférieure des tableaux, en italique) indique le déficit en carbone par ha et par an du parc solaire par rapport à la forêt de pins maritimes¹⁴.

Chaque tableau donne le bilan en carbone du projet pour les stocks de carbone *in situ* seuls, correspondant à la biomasse sur pied (colonne 1) et à la matière organique du sol : rémanent, litière, couches organiques et sol (colonne 2). Le bilan de ces stocks biomasse et sol *in situ* est donné en colonne 3 : « Total B+S ». Le cumul du carbone contenu dans les récoltes de bois exporté hors site est aussi indiqué dans la colonne 4 « Production récoltée ». Les émissions de carbone fossile liés à la sylviculture et au transport des produits récoltés aux sites de première transformation (usine de pâte à papier, scieries), supposées situées à une distance moyenne de 35km en moyenne du périmètre du projet, ont également été calculées. Elles sont données dans la colonne 5 du tableau, pour information. Les conclusions sont développées ci-après.

¹⁴ À titre de référence, un peuplement de Pin maritime de Lande humide en sylviculture standard fixe annuellement 3tC ha⁻¹ an⁻¹ (d'après inventaire IFN-IGN, 2008, Berbigier et al. 2002, Kowalski et al. 2002, Moreaux et al. 2011, 2020a, 2020b).

Tableau 4. Variations des stocks de carbone de la biomasse, du sol, du cumul du bois récolté et des émissions de carbone fossile sylvicoles pour trois périodes suivant l'installation du projet de parc photovoltaïque.

La ligne (1) indique la variation observée par rapport à 2024 pour les peuplements forestiers laissés tels quels, La ligne (2) indiquent la variation consécutive au défrichement et à l'installation du parc photovoltaïque en 2024 pour le projet Horizeo et inclut la zone couverte de panneaux « PV » et les peuplements non défrichés « Pin ».

a) Sylviculture intensive, scénario climatique RCP 4.5.

Sylviculture intensive Scénario RCP4.5.			Biomasse	Sol	Total	Production	Fuel
Δstocks en tC			B+S			récoltée	
2024-2054	(1)	Forêt	- 43 141	- 10 150	- 53 291	127 611	- 2 217
	(2)	Projet	- 68 175	- 51 716	- 119 891	30 542	- 755
		Pin	- 10 057	- 3 452	- 13 509	42 073	- 731
		Différence (1)-(2)	35 092	45 018	80 109	54 996	- 732
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.66	0.85	1.51		- 0.01
2064	(1)	Forêt	- 45 766	- 17 686	- 63 452	159 543	- 2 772
	(2)	Projet	- 67 122	- 56 086	- 123 208	30 542	- 829
		Pin	- 14 184	- 7 141	- 21 325	54 621	- 949
		Différence (1)-(2)	35 541	45 540	81 081	74 379	- 994
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.50	0.64	1.14		- 0.01
2074	(1)	Forêt	- 67 523	- 21 406	- 88 929	203 535	- 3 536
	(2)	Projet	- 68 862	- 60 754	- 129 616	30 542	- 904
		Pin	- 18 052	- 9 225	- 27 278	64 538	- 1 121
		Différence (1)-(2)	19 391	48 574	67 965	108 455	- 1 511
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.22	0.55	0.77		- 0.02

b) Sylviculture intensive, scénario climatique RCP 8.5.

Sylviculture intensive Scénario RCP8.5.			Biomasse	Sol	Total	Production	Fuel
Δstocks en tC			B+S			récoltée	
2024-2054	(1)	Forêt	- 22 750	- 10 871	- 33 621	130 914	- 2 275
	(2)	Projet	- 58 162	- 48 518	- 106 681	26 005	- 676
		Pin	- 2 369	- 3 191	- 5 559	45 563	- 792
		Différence (1)-(2)	37 781	40 838	78 619	59 346	- 807
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.71	0.77	1.48		- 0.02
2064	(1)	Forêt	- 13 086	- 15 852	- 28 938	163 983	- 2 849
	(2)	Projet	- 59 413	- 53 301	- 112 714	26 005	- 750
		Pin	- 2 110	- 6 240	- 8 350	58 641	- 1 019
		Différence (1)-(2)	48 437	43 689	92 126	79 338	- 1 080
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.68	0.62	1.30		- 0.02
2074	(1)	Forêt	- 59 138	- 18 657	- 77 795	204 648	- 3 556
	(2)	Projet	- 62 255	- 58 123	- 120 377	26 005	- 825
		Pin	- 14 558	- 7 889	- 22 447	67 641	- 1 175
		Différence (1)-(2)	17 675	47 355	65 030	111 002	- 1 555
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.20	0.53	0.73		- 0.02

Tableau 4 (suite). Variations des stocks de carbone de la biomasse, du sol et du bois récolté et émissions de carbone fossile sylvicoles pour trois périodes suivant l'installation du projet de ferme solaire.

c) Sylviculture semi-dédiée, scénario climatique RCP 4.5.

Sylviculture standard Scénario RCP4.5.			Biomasse	Sol	Total	Production	Fuel
Δstocks en tC					B+S	récoltée	
2024-2054	(1)	Forêt	11 287	11 704	22 990	107 443	- 2 029
	(2)	Projet	- 68 175	- 51 716	- 119 891	30 542	- 801
		PV	10 103	1 254	11 357	29 736	- 561
		Pin					
		Différence (1)-(2)	69 359	62 166	131 525	47 165	- 667
		<i>Déficit annuel par ha</i>	1.31	1.17	2.48		- 0.01
2064	(1)	Forêt	- 6 845	1 223	- 5 621	151 057	- 2 852
	(2)	Projet	- 67 122	- 56 086	- 123 208	30 542	- 875
		PV	9 146	- 459	8 687	42 061	- 794
		Pin					
		Différence (1)-(2)	51 132	57 769	108 900	78 454	- 1 183
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.72	0.82	1.54		- 0.02
2074	(1)	Forêt	41 110	2 884	43 994	183 847	- 3 471
	(2)	Projet	- 68 862	- 60 754	- 129 616	30 542	- 950
		PV	14 419	- 897	13 522	61 053	- 1 153
		Pin					
		Différence (1)-(2)	95 553	64 535	160 088	92 252	- 1 369
		<i>Déficit annuel par ha</i>	1.08	0.73	1.81		- 0.02

d) Sylviculture semi-dédiée, scénario climatique RCP 8.5.

Sylviculture standard Scénario RCP8.5.			Biomasse	Sol	Total	Production	Fuel
Δstocks en tC					B+S	récoltée	
2024-2054	(1)	Forêt	36 828	10 130	46 958	113 254	- 2 138
	(2)	Projet	- 58 162	- 48 518	- 106 681	26 005	- 715
		PV	21 547	1 067	22 613	32 018	- 605
		Pin					
		Différence (1)-(2)	73 443	57 582	131 025	55 231	- 819
		<i>Déficit annuel par ha</i>	1.38	1.08	2.47		- 0.02
2064	(1)	Forêt	23 793	5 746	29 539	159 706	- 3 016
	(2)	Projet	- 59 413	- 53 301	- 112 714	26 005	- 790
		PV	23 304	1 804	25 108	45 308	- 856
		Pin					
		Différence (1)-(2)	59 902	57 243	117 145	88 393	- 1 370
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.85	0.81	1.65		- 0.02
2074	(1)	Forêt	51 826	9 185	61 010	200 109	- 3 778
	(2)	Projet	- 62 255	- 58 123	- 120 377	26 005	- 864
		PV	18 716	1 951	20 668	70 600	- 1 333
		Pin					
		Différence (1)-(2)	95 364	65 356	160 720	103 504	- 1 581
		<i>Déficit annuel par ha</i>	1.08	0.74	1.82		- 0.02

4.5.1 Carbone de la biomasse.

Nous commentons ci-après le bilan des différentes composantes du bilan en biomasse, la forêt d'une part et le parc d'autre part.

- (i) Le bilan de la biomasse de la forêt de référence (ligne (1) du tableau 4) montre de fortes variations selon les périodes de calcul considérées d'une part et entre chaque option de climat × sylviculture d'autre part. Ces variations sont dues en premier lieu aux interventions des deux régimes sylvicoles appliqués (éclaircies, débroussaillage et coupes, cf. fig. 16). La mortalité naturelle et les variations interannuelles de biomasse dues à la croissance des arbres et de la végétation et aux variations interannuelles des facteurs climatiques interviennent au second ordre. Ces variations rendent le calcul du bilan de biomasse fortement dépendant de l'année choisie et de la période considéré. Le calcul par moyenne glissante sur 5 ans utilisé ici n'atténue que partiellement ces fluctuations.
- (ii) Le déficit du bilan en biomasse de la zone du parc couverte de panneau, ligne (2-PV) du tableau, est indépendant de la sylviculture. Il est plus élevé sous climat RCP4.5, -67.1 à -68.9 ktC contre -58.1 ktC à -68.3 ktC sous RCP8.5. Cette différence s'explique par une différence de valeur initiale en 2024 et

par l'effet de l'accroissement du CO₂ qui favorise plus fortement la croissance sous scénario RCP85 (+33% en moyenne).

4.5.2 Matière organique du sol

La matière organique (MO) du sol telle que nous la définissons ici inclut trois composantes :

- (1) le carbone de la biomasse morte apportée au sol (litières et résidus de coupe dont branches, souches et racines suivant l'itinéraire sylvicole),
- (2) la masse de carbone contenue dans les horizons organiques au-dessus du sol minéral : couches OL, OF, OH, correspondant à trois niveaux de décomposition croissante ;
- (3) le carbone de la matière organique du sol de 0 à 80 cm de profondeur.

- Sous forêt (lignes 1 et 2-*Pin*), le carbone organique montre des fluctuations entre les périodes considérées, dues aux apports par les rémanents d'éclaircies et coupes rases. Le régime sylvicole appliqué contraste fortement l'évolution après 2024. En sylviculture standard, où les coupes rases et des travaux du sol sont moins fréquents, le stock de carbone de la matière organique du sol a tendance à s'accroître mais ne montre pas de tendance systématique. Les souches ne sont pas récoltées mais laissées sur place dans ce régime. Au contraire, en régime intensif, les exportations, qui concernent aussi les souches. Les travaux du sol sont aussi plus fréquents et plus intenses ce qui appauvrit le sol tout au long de la période considérée et pour les deux scénarios de climat.
- Le périmètre déboisé et couvert de panneaux solaires (ligne 2-PV) présente un déficit qui s'accroît continuellement de 2024 à 2100. Il atteint 60.7 et 58.1 ktC après 50 ans pour les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5 respectivement.

Afin d'illustrer par un exemple la dynamique de la matière organique du sol, les figures 17 et 18 présentent respectivement l'évolution du stock de carbone organique et le bilan des apports – pertes en carbone du sol comparés entre la forêt de référence et le projet *Horizeo* pour le cas d'une parcelle avec un peuplement âgé de 22 ans en 2020 et défrichée en 2024. Dans cet exemple la forêt est conduite en mode semi dédié.

- Sous forêt, le stock de carbone de la matière organique du sol ne montre pas de tendance systématique (figure 17). Il présente des fluctuations liées aux apports de rémanents et dans une moindre mesure, aux travaux du sol (labour avant plantation, rouleau lourd à chaque éclaircie et dégagement). La répartition du carbone organique du sol entre les différentes fractions ne montre pas non plus de tendance marquée. Cette évolution temporelle traduit un état d'équilibre du sol et de la végétation.
- Après défrichement et sous panneaux solaires, le stock montre un pic en 2024 dû à l'apport des rémanents (souches, racines, aiguilles et branches fines) par la coupe (figure 17). Une fois le parc installé, le modèle prédit une diminution continue du stock de carbone initial du sol. Le stock serait réduit à 72% de sa valeur initiale après 50 ans. La vitesse de diminution du stock de carbone du sol atteint $-1.8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ durant les 30 premières années après installation et diminue ensuite à $-0.35 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Cette diminution affecte en premier lieu les fractions « décomposable » et « résistante » du carbone du sol qui sont diminuées en 2074 de -42 et -72% respectivement. On note que la biomasse microbienne diminue dans les mêmes proportions.

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⁻¹ an⁻¹ suivant le mode de gestion et les composantes de la biomasse laissées sur place : aiguilles, branches, souches (figure 18). 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⁻¹ an⁻¹. Le déficit en carbone du sol du projet est légèrement plus accentué sous scénario 8.5, où la productivité forestière -- et donc les retours au sol -- sont plus importants (tableau 4).

Pour un peuplement âgé de 16 ans en 2020 et défriché en 2024, la diminution du stock de carbone organique après défrichage atteint 0.9 tC ha⁻¹ an⁻¹ et conduit à un appauvrissement net du sol en carbone de 71 tC après 76 ans (2100). La figure 18 montre que cet appauvrissement résulte de la réduction des apports en carbone organique au sol de 5.0 à 3.1 tC ha⁻¹ an⁻¹ suite au déboisement alors que la vitesse de minéralisation est relativement moins réduite, de 5.3 à 4.0 tC ha⁻¹ an⁻¹. L'apport par la végétation (litière et rémanents) est accru sous parc où la végétation est fauchée chaque année (2.7 sous forêt pour 3.1 tC ha⁻¹ an⁻¹ sous parc). Pour la parcelle prise ici en exemple, le bilan global du carbone du sol est négatif dans le cas du parc photovoltaïque (-0.9 tC ha⁻¹ an⁻¹) et, en raison de l'intensification sylvicole¹⁵, pour le peuplement de pins considéré (- 0.3 tC ha¹ an⁻¹).

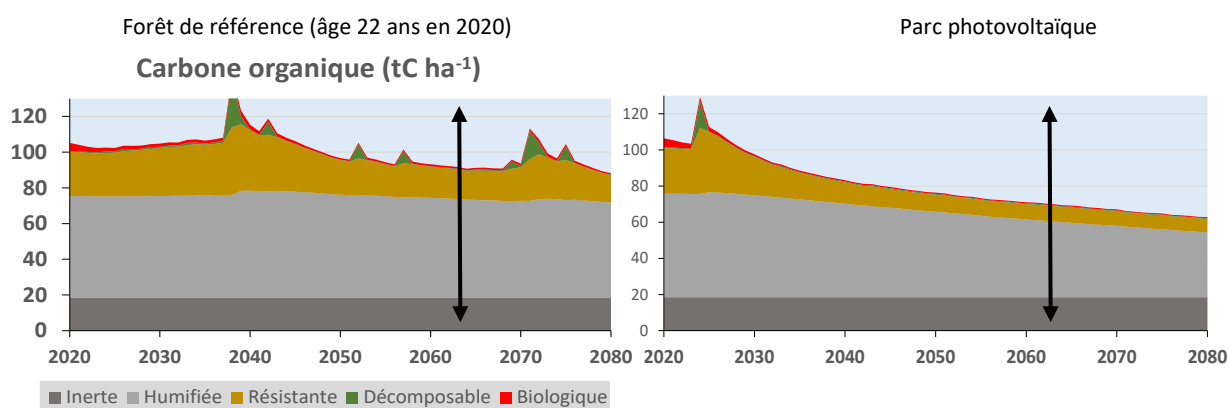


Figure. 17. Évolution du carbone organique du sol de 2020 à 2100 pour une parcelle avec un peuplement de pins maritimes âgés de 16 ans en 2020 et conduit ensuite en mode intensif (à gauche) ou après défrichage et installation de panneaux à partir de 2024 (à droite). Scénario climatique RCP 4.5. La flèche verticale noire indique la durée de 40 ans d'amortissement du parc *Horizeo* (2064).

Les différentes couleurs correspondent aux fractions de carbone organique du modèle GO+ (Roth-C). Le carbone organique du sol comprend 5 fractions : les fractions « décomposable » et « résistante » représentent la matière organique récemment apportée au sol (litière, rémanents), la fraction « humifiée » la composante du carbone la plus évoluée et qui peut être liée à la matrice minérale, la fraction « inerte » correspond à du carbone organique non réactif (charbons, matrice de l'horizon B) et la fraction « biologique » correspond à la biomasse microbienne vivante du sol.

¹⁵ Raccourcissement des révolutions, exportation des souches.

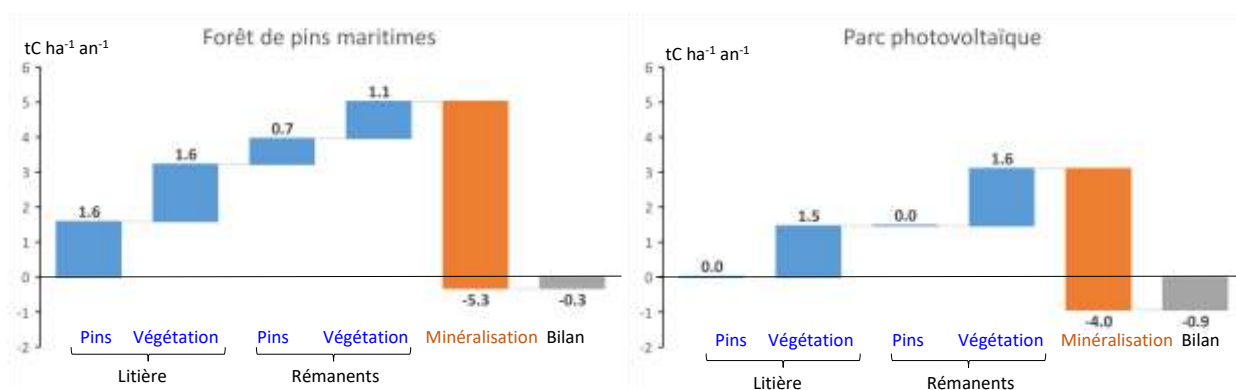


Figure 18. Composantes du bilan de la matière organique du sol sur la période 2020-2100 (valeurs moyennes 2020-2100 des flux et du bilan annuel). Forêt de référence en mode intensif à gauche (parcelle de 16 ans en 2020) et parc photovoltaïque à droite, scénario RCP45.

- La litière correspond aux apports des parties caduques (feuilles, aiguilles...), par la rhizodéposition et la mortalité naturelle des arbres et de la végétation;
- les rémanents sont les fractions de biomasse laissées sur place à la suite des récoltes et des fauches (souches, branches...);
- la minéralisation correspond à l'émission de CO₂ par les microorganismes du sol;
- le bilan global (en gris) inclut les couches organiques superficielles, les rémanents de récolte et la matière organique des horizons organo-minéraux du sol;
- l'horizon B a été considéré comme inerte;

La dynamique du carbone sous parc photovoltaïque installé après défrichement d'une pinède n'est pas connu. Le modèle utilisé pour la représenter n'a pas été évalué dans de telles situations. Néanmoins, l'ordre de grandeur de la diminution projetée ici est cohérent avec les données observées dans la littérature. Une perte de carbone atteignant 8tC ha⁻¹ an⁻¹ a été mesurée après défrichement dans les Landes de Gascogne durant les 10 premières années et sur les seuls 50 premiers cm de sol (Arrouays et Pelissier, 1994). Ces auteurs estiment que la déforestation peut entraîner une perte de 50% du carbone initial, assez conforme à notre simulation. Balesdent et al. (1998) ont observé une diminution de plus de 50% du stock initial de carbone après 35 ans de mise en culture de sols d'anciennes pinèdes. Arrouays et al. (1995) observent une perte en carbone du sol du même ordre en comparant trois forêts et 14 sols, une extension de la même chronoséquence post défrichement que les auteurs précédents. Jolivet (2000) et Achat et al. (2015) ont aussi observé une perte en carbone substantielle de sols de pinède après coupe rase et préparation du sol, le jeu de données de Jolivet (2000) a d'ailleurs été utilisé pour l'évaluation du modèle GO+ v3.0 (fig. 19 tirée de de Moreaux et al. 2020b). Les effets de ces pratiques ont été récemment revus et confirmés dans la synthèse de Mayer et al. (2020).

Fujisaki et al. (2017) mesurent une perte du même ordre après mise en culture de sol auparavant forestiers (-18.7% du carbone du sol sur les 30 premiers cm après 5 années), et ce quel que soit le mode de travail du sol. Nous n'avons pas de références comparables pour des périodes de temps allant jusqu'au siècle. Le modèle Roth-C inclus dans GO+, a été construit à partir de données expérimentales de différents régimes d'apport en fumure au sol sur plus de 170 ans (Coleman et Jenkinson, 1994). À Rothamstead même, la mise en culture d'un sol riche en carbone sous prairie permanente a entraîné une perte de l'ordre de 40% en 60 ans, un ordre de grandeur compatible avec notre simulation, même si cette expérience diffère sur de nombreux points du projet de Saucats.

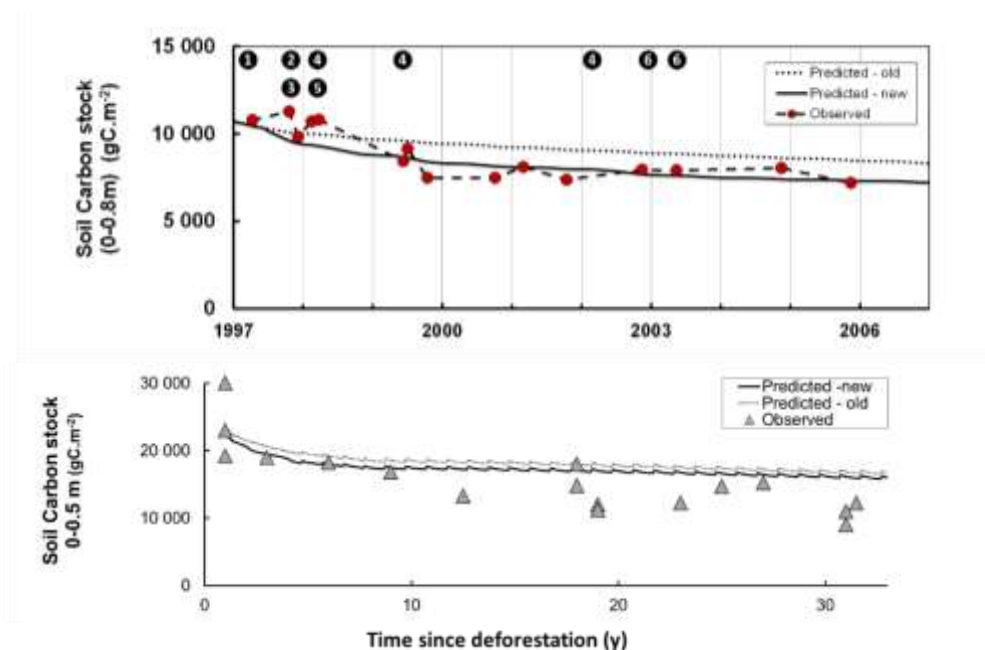


Figure 19. Évolution du stock de carbone du sol minéral après coupe rase et préparation du sol et replantation (graphe supérieur, Jolivet 2000) et après défrichage et mise en culture de maïs (graphe inférieur, Arrouays et Péliissier, 1994). Les symboles sont les données observées, les courbes montrent les simulations par le modèle GO+ (Roth-C) ; version 2.7 (« old »): pointillés, trait plein : version 3.1 (« new ») ; trait plein.

L'impact attendu du parc sur la température du sol est ici simulé de façon très simple. Le modèle GO+ la simule comme une fonction de rappel entre la température de la zone profonde, stable à 13.5°C, et de la surface du sol calculée d'après un bilan d'énergie très simplifié de la surface, faute de mesures de validation *in situ* qui permettrait un calcul plus précis du bilan de chaleur du sol. Notre approche ne permet donc pas à ce stade de prédire comment le régime thermique du sol serait modifié sous le parc relativement à un sol forestier. La littérature disponible montre des résultats contrastés sur ce point (cf. revue bibliographique). Compte tenu de l'acclimatation à la température de la flore microbienne, l'impact attendu d'une variation de température à long terme sur la dynamique de carbone du sol est probablement de 2^{ème} ordre comparé à celui du défrichage et de l'installation des panneaux (fig. 16 et tableau 4) (Davidson et Janssens, 2006 ; Lloyd et Taylor, 1994). Les résultats de Prescott et al. (2000) suggèrent d'ailleurs bien que les effets d'une coupe rase sur le carbone du sol sont dus en premier lieu à l'interruption des apports au sol de matière organique qui suit la coupe, la vitesse de minéralisation du carbone du sol n'étant pas ici en cause. À l'inverse, l'augmentation de teneur en eau du sol simulée par GO+ sous le parc photovoltaïque est susceptible d'accroître très légèrement la vitesse de minéralisation du carbone du sol. Cet effet, qui semble assez modeste, est bien pris en compte dans le modèle utilisé mais nous n'en avons pas effectué de quantification précise.

4.5.3 Production et exportation des récoltes

Le carbone exporté hors périmètre sous forme de récolte constitue une composante majeure du bilan global du projet. Pour la forêt de référence, cette exportation est plus importante en sylviculture intensive qu'avec l'option semi-dédiée jusqu'en 2064 mais cette tendance s'inverse ensuite. Cette différence s'explique par la durée de révolution plus courte et la structure d'âge des peuplements qui entraîne un nombre de coupes rases plus élevé de 2024 à 2054 en mode intensif. La récolte en biomasse est accrue

de +2% à +9% en scénario RCP 8.5 en raison de l'impact dominant de l'accroissement de la concentration atmosphérique en CO₂. Cet impact de l'accroissement en CO₂ se ressent davantage sur la production récoltée en mode standard.

Le déficit du parc photovoltaïque s'accroît bien évidemment avec la durée d'amortissement considérée. Pour une durée de 40 années, il représente une valeur assez proche de celle de la composante *in situ* (Total B+S) mais il dépasse celle-ci de +25% et +125% en moyenne à la fin de la période.

4.5.4 Émissions fossiles

Les données de consommation en fuel et en équivalent CO₂ sont présentées dans la dernière colonne « Fuel » du tableau 4. Elles sont calculées à partir des coefficients d'émissions disponibles pour chacune des opérations sylvicoles pratiquées (tableau 5) tirées des travaux de González-Garcia et al. (2014) qui ont déterminé les émissions en fuel fossile pour différentes opérations sylvicoles des forêts de Pin maritime en Aquitaine pour des options de sylviculture standard ou intensives et d'un référentiel pour la fauche de prairie du gouvernement canadien¹⁶. Nous avons vérifié ces données avec d'autres sources concernant le Pin maritime (Dias and Arroja, 2012) ainsi que d'autres données sur les forêts de conifères exploitées en Europe (Lijewski et al., 2017; Athanassiadis, 2000; Berg et al., 2010; González-Garcia et al., 2009). Cette comparaison montre une bonne concordance de ces études avec les données utilisées ici.

Les émissions en CO₂ par m³ de bois rond écorcé pour les options semi-dédiées et intensive sont de 13.3 and 12.3 kg CO₂ respectivement. Elles sont inférieures aux valeurs typiques de la littérature qui varient de 16.0 (González-Garcia et al., 2014) à 18.5 (Dias and Arroja, 2012) avec des valeurs extrêmes de 25 kg CO₂ m⁻³ (Mikelsen et al., 2008). Cette particularité est liée à la nature du sol des Landes qui est facile à travailler, présente un risque de tassement faible et un relief plat, permettant un accès rapide aux parcelles. Ces estimations représentent 1.6% et 1.5% respectivement du CO₂ représenté par le bois rond (824.85 kg CO₂ équivalent par m³ pour une infra-densité de 450 kg m⁻³ et une fraction de carbone de 0.48). Les valeurs de taux d'émissions que nous avons appliquées ici ne prennent pas en compte les processus de transformation et transport en aval de la première livraison sur site (usine ou scierie). Par ailleurs, elles ne tiennent pas compte de l'évolution future de l'efficacité en CO₂ du transport et de la machinerie utilisée. Elles représentent probablement la valeur maximale des émissions en CO₂ fossile à attendre de l'exploitation sylvicole de ces peuplements.

¹⁶ (<https://www.gov.mb.ca/agriculture/environment/climate-change/life-cycle-assessment-of-agriculture-in-manitoba.html>)

Tableau 5. Émissions de fuel fossile et équivalent en CO₂ des opérations sylvicoles des alternatives considérées, d'après González-Garcia et al. (2014). NB. Des unités différentes ont été utilisées pour calculer l'équivalent en CO₂ qui est exprimé par m³ de bois rond écorcé pour les options sylvicoles et par hectare fauché pour le parc (colonne de droite).

Opération	ITS semi dédié		ITS intensif		Taillis de chênes		Végétation sous parc
	Fuel utilisé (l m ⁻³ bois rond)	CO ₂ équivalent (kg m ⁻³ bois rond)	Fuel Used (l m ⁻³ bois rond)	CO ₂ Equivalent (kg m ⁻³ bois rond)	Fuel Used (l m ⁻³ bois rond)	CO ₂ Equivalent (kg m ⁻³ bois rond)	CO ₂ Equivalent (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)
Préparation du sol et déssouchage	0.334	0.897	0.377	1.015	0.180	0.484	
Rouleau-Landais x 4			0.1192	0.321	0.109	0.293	
Éclaircie 1	0.244	0.657	0.495	1.331	1.499	4.031	
Éclaircie 2	0.443	1.190	0.495	1.331			
Éclaircie 3	0.545	1.465					
Éclaircie 4	0.545	1.465					
Éclaircie 5	0.545	1.465					
Coupe finale et débardage	1.475	3.966	2.286	6.146	1.475	3.966	
Transport 35 km	0.814	2.188	0.814	2.188	0.814	2.189	
Fauche (parc solaire)							26.0
TOTAL par cycle sylvicole	4.945	13.293	4.5862	12.332	4.077	10.96	26.0

La prise en compte du bilan des émissions fossiles sylvicoles modifie 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.

4.6 Bilan global et conclusion

Le calcul du bilan des stocks seuls (« total B+S ») ne fait pas apparaître de différences très marquées entre les 4 options climat x sylviculture envisagées, ni entre les périodes de calcul considérées, 30, 40, et 50 ans. Le déficit annuel par hectare est compris entre 0.73 et 2.48 tC ha⁻¹ an⁻¹ pour la biomasse et le sol et entre 1.97 et 3.49tC ha⁻¹ an⁻¹ si on ajoute la production et les émissions fossiles.

Pour compenser la perte en carbone in situ (*Total B+S*), un boisement de terres improductives (ne séquestrant pas de carbone) par des peuplements forestiers ayant une productivité moyenne de 12 m³ ha⁻¹ an⁻¹, correspondant à une séquestration de carbone atmosphérique estimée à 2.0 – 3.5 tC ha⁻¹ an⁻¹, serait théoriquement à même de compenser un tel déficit avec un ratio de superficie¹⁷ compris entre :

- 0.20 (0.71/3.5) pour l'option la plus basse (forêt de référence en sylviculture intensive, amortissement sur 50 ans, reboisement compensateur sur sol productif, climat RCP 8.5), correspondant à un reboisement de 359 ha. Ce ratio appliqué au projet montre qu'en reboisement d'une surface de 359 ha fixerait sur 50 ans une masse de carbone équivalente à celle perdue en raison du défrichement dans le sol et la biomasse.

¹⁷ Le rapport superficie compensatrice / superficie du périmètre pris en compte (1799 ha)

- 1.23 (2.46/2.0) pour l'option la plus élevée (forêt de référence en sylviculture standard, amortissement sur 30 ans, reboisement compensateur peu productif, climat RCP 4.5) correspondant à un reboisement de 2178 ha.

Ces valeurs étant calculées pour exemple et sans tenir compte de la production récoltée ou des émissions fossiles. La prise en compte des récoltes forestières accroît le déficit en carbone du parc d'un facteur 1.3 à 2.7 suivant les options de sylviculture et de climat et la durée d'amortissement considérée. Il serait toutefois nécessaire de tenir compte du cycle de vie et des émissions éventuellement évitées par l'utilisation du carbone récolté, ce qui sortait du cadre de ce rapport.

La compensation du bilan en carbone du défrichement provoqué par la mise en œuvre du projet de parc suppose d'atteindre un équilibre entre les émissions provoquées (« total B+S ») et la séquestration liée à un boisement compensateur. Suivant le type de mesures compensatoires adoptées, la durée nécessaire est plus ou moins importante. Pour une période d'amortissement de trente ans (correspondant à la préconisation du label « bas carbone » forestier), le déficit annuel du parc pour les composantes sol et biomasse seuls est compris entre 1.46 et 2.46tC ha⁻¹. Il semble réalisable de compenser un tel déficit par un reboisement à croissance rapide d'une superficie équivalente au parc.

À titre d'illustration, la figure 20 montre une projection de la dynamique des émissions du projet HORIZEO, comparée au cumul de la masse de carbone séquestrée dans la biomasse de peuplements de Pins et de chênes. Trois options sont présentées : plantations de pins, taillis de chênes, et mix chênes-pins. Dans cet exemple, les reboisements s'effectuent en 2024 sous un scénario RCP4.5, sur une superficie totale de 2000 ha. Seules les composantes biomasse et sol sont prises en compte. L'évolution du déficit en carbone du projet (aires colorées, diagramme supérieur, figure 20) est une augmentation progressive entrecoupée d'épisodes de diminution correspondant aux coupes et récoltes forestières des peuplements de référence. La fixation nette de carbone par les boisements en croissance (courbes bleue, noire et rouge, diagramme supérieur) montre une dynamique elle aussi fortement contrôlée par les interventions (éclaircies, coupes). Dans cet exemple purement illustratif, un taillis de chênes équilibrerait le déficit du projet HORIZEO en 2039, une futaie de pins maritimes en 2053. La fixation nette de carbone par le mix chênes-pins (courbe en rouge) atteindrait lui aussi une valeur équivalente à la perte en carbone de biomasse et matière organique du sol du projet *Horizeo* en 2053, soit 29 ans après l'installation. Ce laps de temps est dû au fait qu'une plantation jeune ne séquestre que peu ou pas de carbone et peut même être une source de CO₂¹⁸. Une « dette carbone » (en rouge, diagramme inférieur, pour le mix Chênes pins) est donc observée durant les premières années avant d'être compensée par les boisements. Au-delà de la date d'équilibre, le bilan global varie dans le temps en fonction des régimes sylvicoles appliqués. Nos conclusions soulignent que la durée d'amortissement, la superficie et la nature des zones boisées ou reboisées consacrées à une compensation doivent bien être prises en compte dans les mesures compensatoires qui sont adoptées.

¹⁸ Une jeune régénération forestière (plantation, semais ou naturelle) installée après une coupe forestière constitue généralement une source de carbone plusieurs années durant (Magnani et al. 2007, Kowalski et al. 2003, 2004)

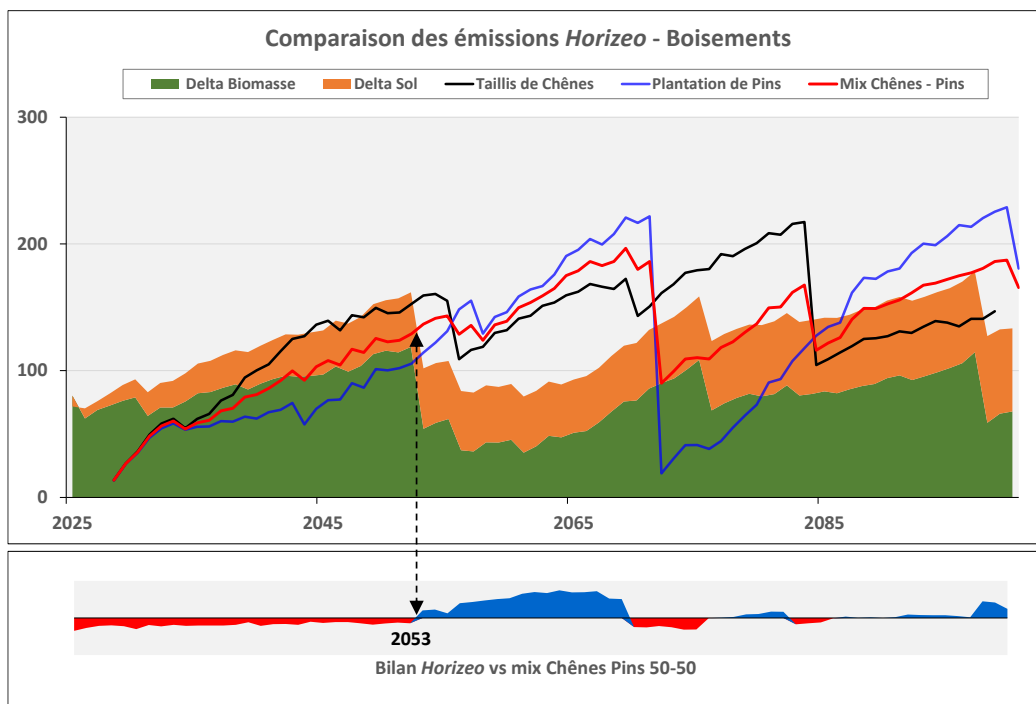


Figure 20. Dynamique des émissions de carbone liées au défrichage provoqué par le projet *Horizeo* (1771 ha) comparée à la séquestration de carbone effectuée par des plantations de chênes pédonculés et pins maritimes conduits en taillis et en futaie respectivement, en sylviculture semi dédiée. Ces projections correspondent à l’option représentée dans le tableau 4c.

- Les aires colorées (diagramme supérieur) sont les pertes en carbone des compartiments biomasse (vert) et sol (orange) du projet *Horizeo* (forêts de référence - parc photovoltaïque, périmètre de 1771 ha).
- Les trois courbes (diagramme supérieur) sont la fixation nette de carbone biomasse et sol de plantations de chênes (vert clair), de pins (vert foncé) et d’un mix chênes – pins (rouge) sur une superficie de 2000 ha.

Le diagramme inférieur indique l’évolution du bilan global *Horizeo* et du reboisement avec un mix chênes-pins sur 2000 ha. Le déficit ou dette carbone est figuré en rouge, le gain en carbone en bleu.

5 Références

- Achat D.L., M. Fortin, G. Landmann, B. Ringeval, L. Augusto (2015). Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting *Sci. Rep.*, 5 (2015), p. 15991
- Adeh, E. H., J. S. Selker and C. W. Higgins (2018). "Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency." *Plos One* 13(11).
- Adeh, E. H., S. P. Good, M. Calaf and C. W. Higgins (2019). "Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands." *Scientific Reports* 9.
- Armstrong, A., S. Waldron, J. Whitaker and N. J. Ostle (2014). "Wind farm and solar park effects on plant–soil carbon cycling: uncertain impacts of changes in ground-level microclimate." *Global Change Biology* 20(6): 1699-1706.
- Armstrong, A., N. J. Ostle and J. Whitaker (2016). "Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling." *Environmental Research Letters* 11(7).
- Arrouays, D. and P. Pelissier (1994). "Changes in carbon storage in temperate humic loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France." *Plant and Soil* 160(2): 215-223.
- Arrouays, D., J. Balesdent, A. Mariotti and C. Girardin (1995). "Modeling organic-carbon turnover in cleared temperate forest soils converted to maize cropping by using c-13 natural-abundance measurements." *Plant and Soil* 173(2): 191-196.
- Arya, S.P.S., 1988 *Introduction to Micrometeorology*, Acad press,
- Athanassiadis, D., 2000. Energy consumption and exhaust emissions in mechanized timber harvesting operations in Sweden. *Sci. Total Environ.* 255, 135–143. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00463-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00463-0)
- Balesdent, J., E. Besnard, D. Arrouays and C. Chenu (1998). "The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence." *Plant and Soil* 201(1): 49-57.
- Bakker M.R., L. Augusto, D.L. Achat (2006) Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites *Plant Soil.*, 286 (2006), pp. 37-51
- Bazelaire (J.-G. de), 1997. Influence de l'utilisation des herbicides en culture de Pin maritime. — Bordeaux : ENITA, 1997. — 75 p. + annexes (Mémoire de stage de 3e année ; option forêt cultivée).
- Berbigier, P., A. Diawara and D. Loustau (1991). "Étude microclimatique de l'effet de la sécheresse sur l'évaporation d'une plantation de pins maritimes et du sous-bois." *Ann. For. Sci.* 48(2): 157-177.
- Berbigier, P., J. M. Bonnefond and P. Mellmann (2001). "CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site." *Agricultural and Forest Meteorology* 108(3): 183-197.
- Berg, S., Fischbach, J., Poissonnet, M., Varet, A., Pizzirani, S., Brüchert, F., Arbeit, C., Winking, A., Bensemann, T., Fundel, V., Bürzle, B., Becker, G., 2010. Set of data for harvesting processes to be put into ToSIA at case study and European case level, EFORWOOD.
- Bergeret H. (1980) Evolution floristique et productivité de landes à Molinie (*Molinia coerulea* (L.) Moench) en forêt landaise, Thèse de doctorat, Université Bordeaux III, Bordeaux, 154 pages.
- Broadbent Ashley M., E. Scott Krayenhoff, Matei Georgescu, and David J. Sailor (2019). The Observed Effects of Utility-Scale Photovoltaics on Near-Surface Air Temperature and Energy Balance. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol58 (5) 989-1006.
- Chang, R., Y.B. Shen, Y. Luo, B. Wang, Z.B. Yang, and P. Guo, (2018). Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China. *Renewable Energy*, 2018. 118: p. 131-137 DOI: 10.1016/j.renene.2017.11.007.
- Choi, C. S., A. E. Cagle, J. Macknick, D. E. Bloom, J. S. Caplan and S. Ravi (2020). "Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure." *Frontiers in Environmental Science* 8(140).
- Chamberlain A.C. et al. (1984). Transport of gases and particles to surfaces with widely spaced roughness elements. *Boundary Layer Meteorology*, 29, 343-360.
- Chossat, J. C. and F. Campagne (1998). "Infiltration and runoff in sandy soils in the Landes of Gascogne Infiltration et ruissellement en sol sableux des Landes de Gascogne." *Bulletin du GFHN*(42): 140-145.
- Cochard, H. (1988). Utilisation d'un système de type 'enceinte fermée' pour l'estimation de la transpiration journalière d'un sous-bois de pin maritime (*Pinus pinaster* ait.): 31.
- Coleman K., and Jenkinson, D.D. 1996. RothC - 26.3 - A model for the turnover of carbon in soil. , in: *Evaluation of soil organic matter models using existing, long-term datasets.*, edited by: Powlson D.S., Smith P., and J.U., S., NATO ASI Series I, Springer Verlag, Heidelberg, Germany, 237-246, 1996.
- Davidson, E. A. and I. A. Janssens (2006). "Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change." *Nature* 440(7081): 165-173.
- Deleuze Christine, François Morneau, Jean-Pierre Renaud, Yannick Vivien, Michaël Rivoire, Philippe Santenoise, Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Jean-Christophe Hervé, Patrick Vallet (2014). Estimer le volume total d'un arbre,

- quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. Rendez vous Techniques de l'ONF, n° 44 - printemps 2014 – ONF p22-32.
- Delzon, S. (2000). Photosynthèse de la Molinie (*Molinia caerulea* (L.) Moench) en sous-bois de Pin maritime, aux niveaux de la feuille et du couvert Mémoire de D.E.A. d'Ecologie, Paris XI.
- Delzon S. (2000). Photosynthèse de la Molinie (*Molinia caerulea* (L.) Moench) en sous-bois de Pin maritime, aux niveaux de la feuille et du couvert. Mémoire DEA Ecophysiologie végétale, Université Paris XI. INRA, Bordeaux, 32 pages.
- Demain, C., Journee, M., Bertrand, C., 2013. Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces. *Renewable Energy* 50, 710-721.
- Dias, A.C., Arroja, L., 2012. Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. *J. Clean. Prod.* 37, 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.056>
- Dolling A. H. U. (1999) The vegetative spread of *Pteridium aquilinum* in a hemiboreal forest - invasion or revegetation? *Forest Ecology and Management*, 124, 177-184.
- Dolling A. H. U. (1996) Interference of bracken (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn) with Scots pine (*Pinus sylvestris* (L.)) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) seedling establishment. *Forest Ecology and Management*, 88, 227-235.
- Dufay J., Hardy F., Caze G., Leblond N. et Romeyer K., 2016. Inventaire de la flore sauvage des Landes-Bilan des travaux menés en 2016. Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique, 35pages+ annexes.
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y., 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36 (10), 2725–2732.
- EL Habchi A., 1989. Evaluation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) au cours d'une saison de croissance. Mémoire de D.E.A. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 46 p.
- El-Hadj-Moussa, F. (1989). Circulation de l'eau dans un écosystème de Pin maritime en Landes de Gascogne. Bilan hydrique d'un peuplement de 18 ans et fonctionnement hydrique de l'arbre adulte Thèse de Doctorat. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 120p.
- Franzaring, J., I. Holz and A. Fangmeier (2008). "Different Responses of *Molinia caerulea* Plants from Their Origins to CO2 Enrichment and Nutrient Supply." *Acta Oecologica* 33: 176-187.
- Fujisaki, K., A.-S. Perrin, B. Garric, J. Balesdent and M. Brossard (2017). "Soil organic carbon changes after deforestation and agrosystem establishment in Amazonia: An assessment by diachronic approach." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 245: 63-73.
- Gobin R., Nathalie Korboulewsky, Yann Dumas et Philippe Balandier (2015). Transpiration of four common understorey plant species according to drought intensity in temperate forests. *Annals of Forest Science* (2015) 72:1053–1064 DOI 10.1007/s13595-015-0510-9
- Gonzalez, M., L. Augusto, A. Gallet-Budynek, J. Xue, N. Yauschew-Raguenees, D. Guyon, P. Trichet, F. Delerue, S. Niollet, F. Andreasson, D. L. Achat and M. R. Bakker (2013). "Contribution of understory species to total ecosystem aboveground and belowground biomass in temperate *Pinus pinaster* Ait. forests." *Forest Ecology and Management* 289: 38-47.
- Guillet B., Disnar J.-R., Loustau D. and Balesdent J. (2010). Dynamics of soil carbon and moder horizons related to age in pine and beech stands. *Forest Carbon Cycle and Climate Change*. D. Loustau. Versailles, Quae: 55-79.
- González-García, S., Berg, S., Feijoo, G., Moreira, M.T., 2009. Environmental impacts of forest production and supply of pulpwood: Spanish and Swedish case studies. *Int. J. Life Cycle Assess.* 14, 340–353. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0089-1>
- González-García, S., Bonnesoeur, V., Pizzi, A., Feijoo, G., Moreira, M.T., 2014. Comparing environmental impacts of different forest management scenarios for maritime pine biomass production in France. *J. Clean. Prod.* 64, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.040>
- Guinochet, Lemée (1950) Contribution à la connaissance des races biologiques de *Molinia caerulea* (L.) Moench. *Rev Gén Bot* 680,563-593.
- Jefferies TA (1915) Ecology of the Purple Heath Grass (*Molinia caerulea*). *J Ecol* 3, 93-109
- Jubayer, C.M. and H. Hangan, Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014. 134: p. 56-64 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.008>.
- Hassanpour Ateh E, Selker JS, Higgins CW (2018) Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE* 13(11): e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Hernandez, R. R., S. B. Easter, M. L. Murphy-Mariscal, F. T. Maestre, M. Tavassoli, E. B. Allen, C. W. Barrows, J. Belnap, R. Ochoa-Hueso, S. Ravi and M. F. Allen (2014). "Environmental impacts of utility-scale solar energy." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 29: 766-779.
- Heusinger, J., A. M. Broadbent, D. J. Sailor and M. Georgescu (2020). "Introduction, evaluation and application of an energy balance model for photovoltaic modules." *Solar Energy* 195: 382-395.

- Hu, A., S. Levis, Gerald A. Meehl, W. Han, Warren M. Washington, Keith W. Oleson, Bas J. van Ruijven, M. He and Warren G. Strand (2016). "Impact of solar panels on global climate." *Nature Climate Change* 6(3): 290-294.
- IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2 (Energy). Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Jolivet, C.: Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles, Ph D Thesis, Université de Bourgogne, Dijon, 306p, 2000.
- Kowalski, S., M. Sartore, R. Burlett, P. Berbigier and D. Loustau (2003). "The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest." *Global Change Biology* 9(7): 1051-1065.
- Kowalski, A. S., D. Loustau, P. Berbigier, G. Manca, V. Tedeschi, M. Borghetti, R. Valentini, P. Kolari, F. Berninger, U. Rannik, P. Hari, M. Rayment, M. Mencuccini, J. Moncrieff and J. Grace (2004). "Paired comparisons of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe." *Global Change Biology* 10(10): 1707-1723.
- Le Goff, N., F. Ningre and J. M. Ottorini (2021). "Modeling size-density trajectories of even-aged ash (*Fraxinus excelsior* L.) stands in France. A baseline to assess the impact of Chalara ash dieback." *Annals of Forest Science* 78(1).
- Lemoine B., D. Bonhomme, D. Chinzi, B. Comps, H. Bergeret, J. Gelpe, C. Juste et M. Menet (1983). Elevage en forêt dans les Landes de Gascogne I. - Le système végétal. *Ann. For. Sci.*, 40 1 (1983) 3-40
DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:19830101>
- Lijewski, P., Merksiz, J., Fuć, P., Ziółkowski, A., Rymaniak, Ł., Kusiak, W., 2017. Fuel consumption and exhaust emissions in the process of mechanized timber extraction and transport. *Eur. J. For. Res.* 136, 153–160.
<https://doi.org/10.1007/s10342-016-1015-2>
- Lloyd, J. and J. A. Taylor (1994). "On the temperature-dependence of soil respiration." *Functional Ecology* 8(3): 315-323.
- Loustau D., Granier A., El Hadj Moussa F.. 1990. Évolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de Pin maritime. —*Annales des Sciences forestières*, vol. 47, 1990, pp. 599-618.
- Loustau, D. and H. Cochard (1991). "Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de pin maritime à molinie (*Molinia caerulea* (L) Moench)." *Annales des Sciences Forestières* 48(1): 29-45.
- Loustau, D., P. Berbigier and A. Granier (1992) (a). "Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II : An application of Gash's analytical model of interception." *Journal of Hydrology* 138(3/4): 469-485.
- Loustau, D., P. Berbigier, A. Granier and F. El-Hadj Moussa (1992) (b). "Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy." *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 138(3/4): 449-467.
- Lytle, W., T. K. Meyer, N. G. Tanikella, L. Burnham, J. Engel, C. Schelly and J. M. Pearce (2021). "Conceptual Design and Rationale for a New Agrivoltaics Concept: Pasture-Raised Rabbits and Solar Farming." *Journal of Cleaner Production* 282.
- Magnani, F., M. Mencuccini, M. Borghetti, P. Berbigier, F. Berninger, S. Delzon, A. Grelle, P. Hari, P. G. Jarvis, P. Kolari, A. S. Kowalski, H. Lankreijer, B. E. Law, A. Lindroth, D. Loustau, G. Manca, J. B. Moncrieff, M. Rayment, V. Tedeschi, R. Valentini and J. Grace (2007). "The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests." *Nature* 447(7146): 848-850.
- Maia, A. S. C., E. D. Culhari, V. D. C. Fonseca, H. F. M. Milan and K. G. Gebremedhin (2020). "Photovoltaic panels as shading resources for livestock." *Journal of Cleaner Production* 258.
- Marrou H., Jacques Wéry, Lydie Dufour, Christian Dupraz (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, Elsevier, 2013, 44, pp.54-66.
10.1016/j.eja.2012.08.003. hal-01137075v2
- Marrou, H., L. Dufour and J. Wery (2013). "How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system?" *European Journal of Agronomy* 50: 38-51.
- Masson, V., M. Bonhomme, J.-L. Salagnac, X. Briottet, and A. Lemonsu, 2014: Solar panels reduce both global warming and urban heat island. *Front. Environ. Sci.*, 2, 14, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00014>.
- Martinie D., 1993. Evapotranspiration d'un sous-bois de Pin maritime à Molinie (Moench.) : méthodologie à la mesure de la conductance stomatique, contribution à l'étude de l'interception. Mémoire de Maîtrise Angers, 58p.
- Mayer, M., C. E. Prescott, W. E. A. Abaker, L. Augusto, L. Cecillon, G. W. D. Ferreira, J. James, R. Jandl, K. Katzensteiner, J. P. Laclau, J. Laganier, Y. Nouvellon, D. Pare, J. A. Stanturf, E. I. Vanguelova and L. Vesterdal (2020). "Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis." *Forest Ecology and Management* 466. 10.1016/j.foreco.2020.118127
- McDonald P. M., Abbott C. S., & Fiddler G. O. (2003) Density and development of Bracken Fern (*Pteridium aquilinum*) in forest plantations as affected by manual and chemical application. *Native plants*, 53-60.
- Michelsen, O., Solli, C., Strømman, A.H., 2008. Environmental impact and added value in forestry operations in Norway. *J. Ind. Ecol.* 12, 69–81. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00008.x>

- Miskin, C. K., Y. R. Li, A. Perna, R. G. Ellis, E. K. Grubbs, P. Bermel and R. Agrawal (2019). "Sustainable co-production of food and solar power to relax land-use constraints." *Nature Sustainability* 2(10): 972-980.
- Misson, L., D. D. Baldocchi, T. A. Black, P. D. Blanken, Y. Brunet, J. C. Yuste, J. R. Dorsey, M. Falk, A. Granier, M. R. Irvine, N. Jarosz, E. Lamaud, S. Launiainen, B. E. Law, B. Longdoz, D. Loustau, M. McKay, K. T. Paw U, T. Vesala, D. Vickers, K. B. Wilson and A. H. Goldstein (2007). "Partitioning forest carbon fluxes with overstory and understory eddy-covariance measurements: a synthesis based on FLUXNET data." *Agricultural and Forest Meteorology* 144(1/2): 14-31.
- Monteith J. L. and M. H. Unsworth (2013). *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*, 4th Edition. San Diego, Elsevier Academic Press Inc.
- Moreaux, V., E. Lamaud, A. Bosc, J. M. Bonnefond, B. E. Medlyn and D. Loustau (2011). "Paired comparison of water, energy and carbon exchanges over two young maritime pine stands (*Pinus pinaster* Ait.): effects of thinning and weeding in the early stage of tree growth." *Tree Physiol* 31(9): 903-921.
- Moreaux, V., B. Longdoz, D. Berveiller, N. Delpierre, E. Dufrene, J. M. Bonnefond, C. Chipeaux, R. Joffre, J. M. Limousin, J. M. Ourcival, K. Klumpp, O. Darsonville, A. Brut, T. Tallec, E. Ceschia, G. Panthou and D. Loustau (2020a). "Environmental control of land-atmosphere CO₂ fluxes from temperate ecosystems: a statistical approach based on homogenized time series from five land-use types." *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 72(1): 1-25.
- Moreaux, V., S. Martel, A. Bosc, D. Picart, D. Achat, C. Moisy, R. Aussenac, C. Chipeaux, J. M. Bonnefond, S. Figuères, P. Trichet, R. Vezy, V. Badeau, B. Longdoz, A. Granier, O. Roupsard, M. Nicolas, K. Pilegaard, G. Matteucci, C. Jolivet, A. T. Black, O. Picard and D. Loustau (2020b). "Energy, water and carbon exchanges in managed forest ecosystems: description, sensitivity analysis and evaluation of the INRAE GO+ model, version 3.0." *Geosci. Model Dev.* 13(12): 5973-6009.
- Malu, P. R., U. S. Sharma and J. M. Pearce (2017). "Agrivoltaic potential on grape farms in India." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 23: 104-110.
- Moreda, G. P., M. A. Munoz-Garcia, M. C. Alonso-Garcia and L. Hernandez-Callejo (2021). "Techno-Economic Viability of Agro-Photovoltaic Irrigated Arable Lands in the EU-Med Region: A Case-Study in Southwestern Spain." *Agronomy-Basel* 11(3).
- Nemet G. F., 2009. Net radiative forcing from widespread development of photovoltaics. *Environ. Sci. Technol.*, 2009. 43, 2173-2178.
- Ningre, F., J.-M. Ottorini and N. Le Goff (2016). "Modeling size-density trajectories for even-aged beech (*Fagus sylvatica* L.) stands in France." *Annals of Forest Science* 73(3): 765-776.
- Ningre, F., J. M. Ottorini and N. Le Goff (2019). "Size-density trajectories for even-aged sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.) stands revealing similarities and differences in the mortality process." *Annals of Forest Science* 76(3).
- Osterthun N., N. Neugebohrn, K. Gehrke, M. Vehse, and C. Agert (2021). Spectral engineering of ultrathin germanium solar cells for combined photovoltaic and photosynthesis. *Optic Express*, Research Article Vol. 29, No. 2 / 18 January 2021 / *Optics Express* 938, <https://doi.org/10.1364/OE.412101>
- Pascaris, A. S., C. Schelly and J. M. Pearce (2020). "A First Investigation of Agriculture Sector Perspectives on the Opportunities and Barriers for Agrivoltaics." *Agronomy-Basel* 10(12).
- Prescott, C. E., L. L. Blevins and C. L. Staley (2000). "Effects of clear-cutting on decomposition rates of litter and forest floor in forests of British Columbia." *Canadian Journal of Forest Research* 30(11): 1751-1757.
- Rascher U., Liebig M., & Lüttge U. (2000) Evaluation of instant light-response curves of chlorophyll fluorescence parameters obtained with a portable chlorophyll fluorometer on site in the field. *Plant, Cell and Environment*, 23, 1397-1405.
- Raupach, M. R. (1994). "Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index." *Boundary-Layer Meteorology* 71(1): 211-216.
- Ravi, S., D. B. Lobell and C. B. Field (2014). "Tradeoffs and Synergies between Biofuel Production and Large Solar Infrastructure in Deserts." *Environmental Science & Technology* 48(5): 3021-3030.
- Renard C, Demessemacker W (1983) Effects of wind velocity on stomatal conductance and consequences of leaf rolling on water uptake in tall Fescue. *Biol Plant* 25, 408-411
- Rothstein D. E. & Zak D. R., (2001) Photosynthetic adaptation and acclimation to exploit seasonal periods of direct irradiance in three temperate, deciduous-forest herbs. *Functional Ecology*, 15, 722-731.
- Roux A., Jean-François Dhôte, Claire Bastick, Antoine Colin, Alain Bailly, Jean-Charles Bastien, Alain Berthelot, Nathalie Bréda, Sylvain Caurila, Jean-Michel Carnus, Barry Gardiner, Hervé Jactel, Jean-Michel Leban, Antonello Lobianco, Denis Loustau, Benoit Marçais, Simon Martel, Céline Meredieu, Christophe Moisy, Luc Pâques, Delphine Deshors-Picart, Eric Rigolot, Laurent Saint-André, Bertrand Schmitt (2017). Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. (Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)), <https://hal.inrae.fr/hal-02790472>

- Sardin T. et al. 2013. Itinéraires techniques de travaux sylvicoles. Plateau landais – Pin maritime des Landes (Aquitaine) révision Post Klaus 2013. ONF, 131p.
- Schlichting C. D. (1986). The evolution of phenotypic plasticity in plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17, 667-693.
- Sharpe, K. T., B. J. Heins, E. S. Buchanan and M. H. Reese (2021). "Evaluation of solar photovoltaic systems to shade cows in a pasture-based dairy herd." *Journal of Dairy Science* 104(3): 2794-2806.
- Taylor, K., A. P. Rowland and H. E. Jones (2001). "Molinia caerulea (L.) Moench." *Journal of Ecology* 89(1): 126-144.
- Timbal J. (2008) Influence de la sylviculture sur la composition floristique des landes humides de Gascogne, *Acta Botanica Gallica*, 155:1, 143-151, DOI: 10.1080/12538078.2008.10516100
- Timbal J., Maizeret C., (1998) Biodiversité végétale et gestion durable de la forêt landaise de Pin maritime. *Revue Forestière Française [Rev. For. Fr.]*, ISSN 0035-2829, 1998, Vol. 50, N° 5, p. 403-424
- Touil, S., A. Richa, M. Fizir and B. Bingwa "Shading effect of photovoltaic panels on horticulture crops production: a mini review." *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*.
- Taha, H., 2013: The potential for air-temperature impact from large-scale deployment of solar photovoltaic arrays in urban areas. *Sol. Energy*, 91, 358–367, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.09.014>.
- Thom A.S. (1972). Momentum, mass and heat exchange of vegetation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 94, 44-55.
- Trichet P. et Gelpe J., 1992. La Fertilisation peut induire des substitutions de flore et modifier la réussite des plantations. *Revue forestière française*, vol. XLIV, n° 1, 1992, pp. 35-42.
- Trommsdorff, M., J. Kang, C. Reise, S. Schindele, G. Bopp, A. Ehmann, A. Weselek, P. Hogy and T. Obergfell (2021). "Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 140.
- Vaugeois Y., 1994. Etude des échanges de CO₂ au niveau d'un sous-bois de Pin maritime. Mémoire d'I.U.T. Brest, 27 p
- Vernier F., Beuffe H., Chossa J.-C. 2003. Forêt et ressource en eau : étude de deux bassins versants en sol sableux (Landes de Gascogne). *Rev. For. Fr.*, 55_6, 2003 p523_542.
- Wesely M. L., Hicks, B.B. (1977). Some factors that affect the deposition of sulphur dioxide and similar gases on vegetation. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 27, 1110-1116.
- Zhang, X.H. and M. Xu, Assessing the Effects of Photovoltaic Powerplants on Surface Temperature Using Remote Sensing Techniques. *Remote Sensing*, 2020. 12(11) DOI: 10.3390/rs12111825.
-

6 Annexes

Annexe 1

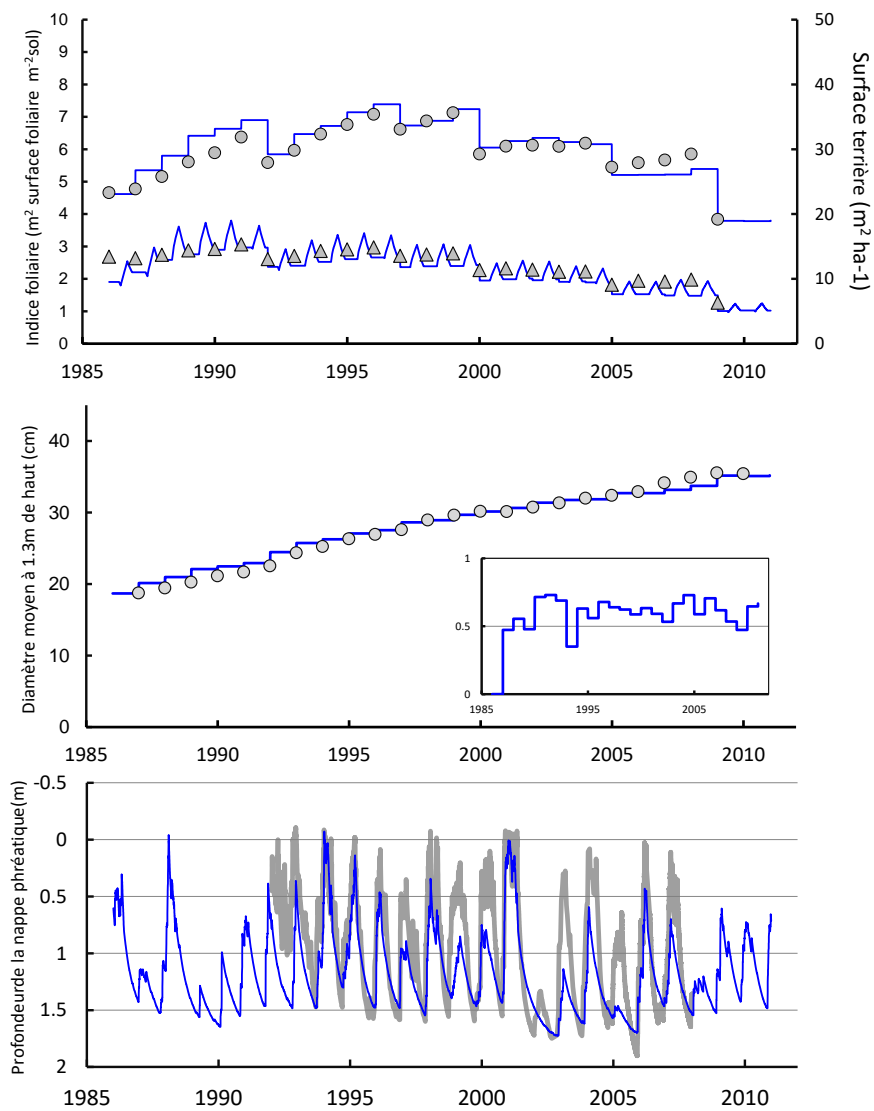


Figure A1. Comparaison de séries temporelles de valeurs prédites par le modèle GO+ v3.1 (courbes bleues) avec les valeurs observées sur le site du Bray de 1987 à 2010 (symboles et courbe en gris).

Diagramme supérieur : les courbes et symboles supérieurs sont la surface terrière, les courbes inférieures l'indice foliaire

Diagramme médian : l'insert est l'indice de stress hydrique calculé par le modèle, la courbe est le diamètre moyen.

Diagramme inférieur : profondeur de la nappe phréatique

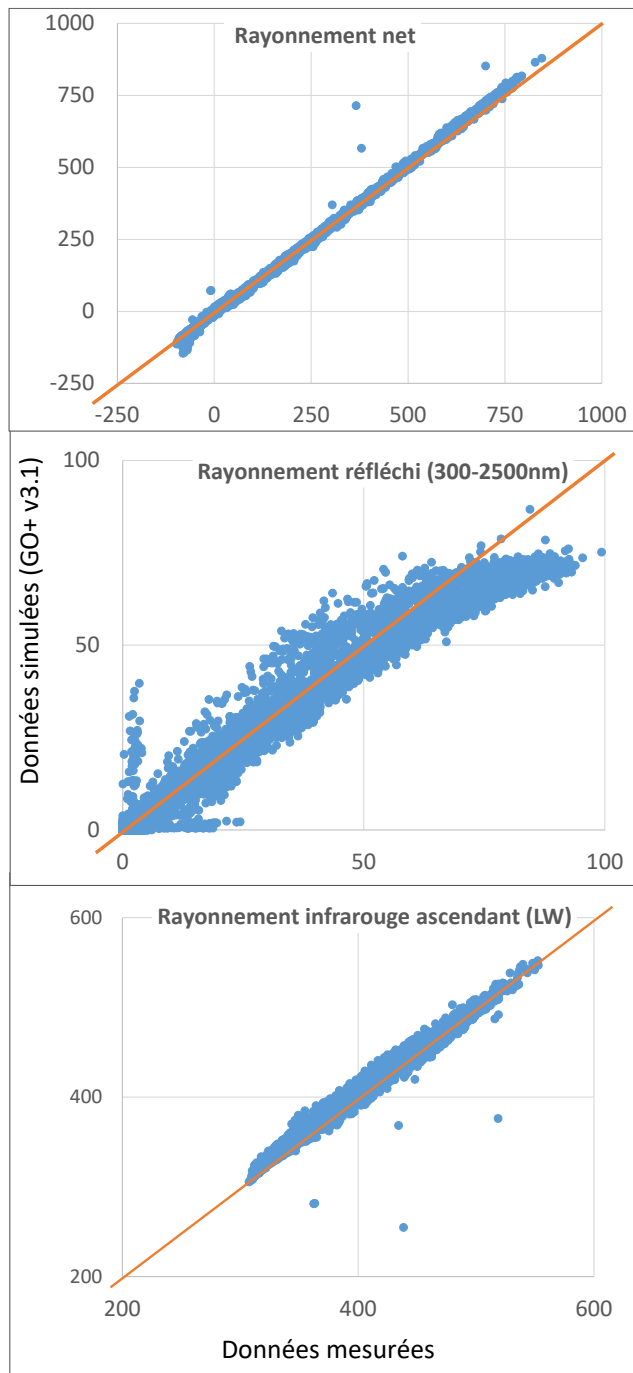


Figure A2. Evaluation des simulations de composantes du bilan radiatif du modèle GO+ v3.1 avec des données observées mesurées en juillet 2020 sur la station ICOS de Salles (Fr-Bil). Les données sont des valeurs moyennes demi horaires exprimées en $W m^{-2}$. Les mesures ont été effectuées à 16 m au-dessus d'un couvert de Pin maritimes de hauteur 8.5 m avec un capteur CNR4 (Kipp et Zonen). La droite en rouge matérialise la bissectrice.

Annexe 2

Model GO+. Note on the version 3.0 → version 3.1 changes.

30th April 2021.

Radiation balance

The radiative transfer as described in the version 3.0 was including different shortcuts and bulk parameters, e.g. for the diffuse radiation attenuation coefficients that are removed from the version 3.1 for both the shortwave and the longwave radiations. The latter is strictly compliant to the de Pury and Farquhar equations that were adapted for accounting for the two-layer scheme of GO+.

In the short wave domain, the extinction coefficient is no more empirical but based upon the theoretical derivation of Ross and other's approach. The extinction coefficients normal to the horizontal surface, $K(\theta)$, or orthogonal to the beam direction, $G(\theta)$, are calculated for canopies whose area elements are arranged according to the ellipsoidal model. This scheme is applied to both canopy layers. Furthermore each layer includes two elements, the foliage (leaves or needles) and stems+ branches. The radiative exchanges are split among those. The radiation transfer scheme is described for the broad band 300-2500 nm. The calculation of transfers in the visible part of the spectrum 400-700 nm, that is used for photosynthesis calculation, is then performed using the Monteith and Unsworth approximation (2008, p128), for the direct radiation first and then for the diffuse part. Last the radiation transfer accounts of the foliage clumping using a new parameter, the clumping factor [0.7 – 1.0].

The “normal” extinction coefficient, $G(\theta)$ where θ is the zenith angle is:

$$G = (x^2 \sin(\beta)^2 + \cos(\beta)^2)^{0.5} / (A \cdot x)$$

The “horizontal” extinction coefficient $K(\theta)$ is :

$$K(\theta) = \text{Clump}_f * (x^2 + \text{TAN}(\theta)^2)^{0.5} / (A \cdot x)$$

$$\text{Where } A \text{ is: } (x + 1.774 * (x + 1.182)^{-0.733}) / x$$

The radiation parameters of each layer and components are therefore:

x_f or x_w	Ratio of the horizontal to the vertical axis of the ellipsoidal model chosen. $X=1$ is the spherical model, $x < 1$ are the prolate ellipsoids and > 1 the oblate ellipsoid.
ρ , ρ_f or ρ_w	Leaf or stem reflectance in the 400-700nm domain
τ , τ_f or τ_w	Leaf or stem transmittance in the 400-700nm domain
ε , ε_f or ε_w	Long wave (>3000nm) emissivity
Clump_f or Clump_w	Clumping factor of the foliage the stems+branches

New variables added:

k_b_f or w	= $K(\theta)$, beam shortwave extinction coefficient for foliage = average projection of foliage elements on to an horizontal surface
k_{dprime}_f or w	extinction coefficient for diffuse shortwave (300-2500nm)
k_{bprime}_f or w	extinction coefficient for direct shortwave (300-2500nm)
ρ_{cb}_f or w	reflection coefficient for direct shortwave (300-2500nm)
ρ_{cd}_f or w	reflection coefficient for diffuse shortwave (300-2500nm)

G_f or w	average projection of foliage elements on to a surface normal to the direction of the projection
Gap_fraction	Gap fraction
PAR_Abs_f	Visible SW radiation (400-700 nm) absorbed by foliage (W m ⁻²), split among Sun- and Shade- layers

The diffuse part of the radiation transfer model is also applied to the long wave transmission. Further improvements should address the separation of the energy balance among stems+branches and foliage and, for the latter, sunlit and shaded fractions would be needed.

Wood production.

The production of harvested products have been improved and the production in the timber (stem with diameter larger than 7 cm is described for Douglas fir, Beech and Oak species according to Deleuze et al. (2014).

A self-thinning rule based upon the observations of mortality in the French Douglas fir stands has been applied to Douglas fir, European Beech and Oaks, based on the observations by N. LeGoff et al. (2016) and F. Ningre et al. (2019). The mortality thus induced is added to the thinning rules of each management alternatives.

The stem volume production is calculated for the entire stem (PROD_VOL) and for the commercial volume (stem part with diameter >7cm, PROD_VOL07). The calculation of the wood area index, WAI, has been corrected. The stem volume before and after thinning has been explicated.

The carbon input into the soil has been split among (1) the litterfall resulting from the natural senescence of plant organs and mortality, and (2) the leftover parts that includes the plant parts left on site after harvesting.

A coppicing technique has been implemented. Coppicing removes the stem and branches whole leaving the root system and stump alive. The number of new stems resprouting from the stump is selected by the user. Following coppicing, the carbon allocation to the aerial part is increased until the root-shoot ratio is restored.

New variables

PROD_VOL07	mdlTreeStand (calculated in mdlMngt_Operations)	Annual production of stem (above 7cm) m3 ha-1 y-1
PROD_VOLTOT	mdlTreeStand (calculated in mdlMngt_Operations)	Annual production of stem + branches m3 ha-1 y-1
Stem_VOL	mdlTreeStand	Standing stem volume (above 7cm diameter for only Douglas fir) m3 ha-1
Stem_VOL_pt	mdlTreeStand (calculated in mdlMngt_Operations)	Same after thinning m3 ha-1
Tree_VOL	mdlTreeStand	Standing Stem + branches volume m3 ha-1
Tree_VOL_pt	mdlTreeStand (calculated in mdlMngt_Operations)	Same after thinning m3 ha-1
Cut_VOL	mdlMngt_Operations	Stem volume cut that may be harvested or left on site m3 ha-1
Leftover	mdlTreeStand (calculated in mdlMngt_Operations)	Mass of plant parts remaining in site after harvesting. It may include leaves or needles, branches stump and roots. gC m2 y-1

Water balance.

Some minor inconsistencies have been detected and corrected.

Leaf life cycle.

The initialisation of the leaves cohort at the beginning of simulations (process “tree stand installation” and “include trees” have been improved for Douglas fir.

New Species.

Phenological and allometry modules have been adapted to oak species and implemented in the code. New species for which a set of parameters is provided are:

- oak species (complex *Petraea* + *Robur*);
- solar panels.

Parameters files

The files organising the parameters for the site and species have been revised. The parameters are described among three files; respectively:

- the tree species file,
- the undestorey file,
- the “site” file that includes the soil description of the area, location, altitude, topography,
- the “soil init” file that includes the soil description and organic carbon initialisation.

Aerodynamic resistance

An additional resistance term, r_b , has been implemented in the aerodynamic transfer scheme using the Thom (1975) equation (17.8) in Monteith and Unsworth (2008). A model adapted to fixed solar panels has been implement according to Raupach (1994) and used for simulation the wind profile attenuated by the solar panels arrays.

Annexe 3

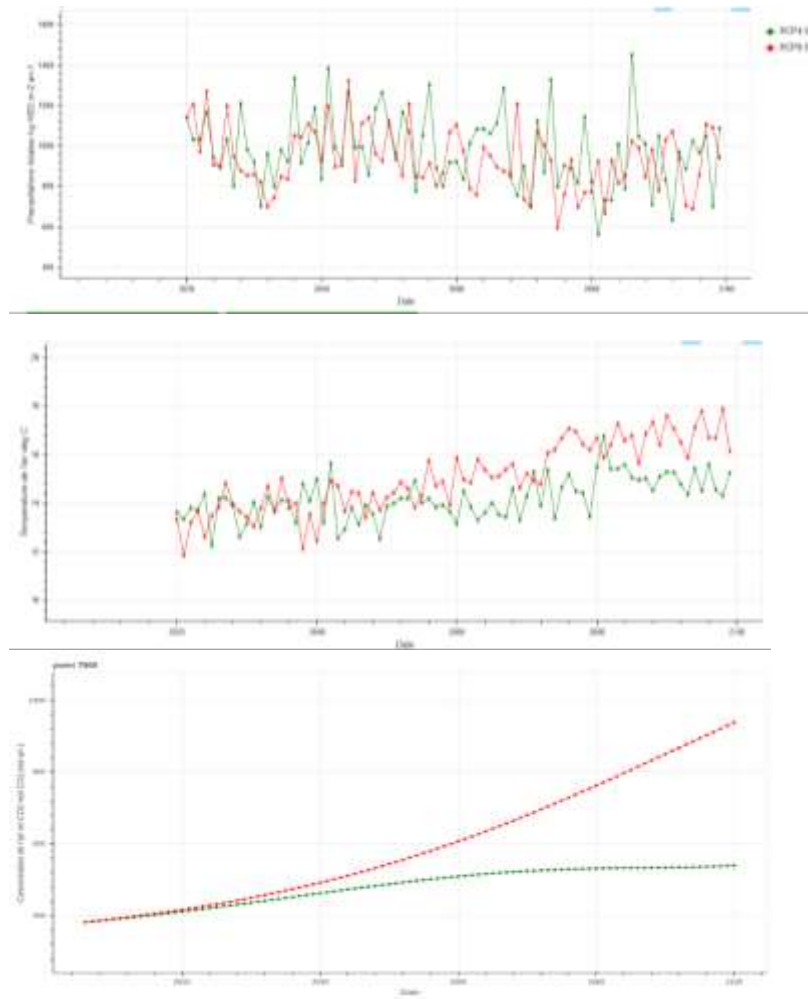


Figure A2. Evolution de 2020 à 2100 de la hauteur de précipitations annuelles, de la température moyenne et de la concentration en dioxyde carbone pour les scénarios RCP45 et RCP85 au point de grille SAFRAN # 7500 (Saucats).

Annexe 4.

Tableau A1. Occupation des surfaces du périmètre du projet en 2020 et devenir après installation de la ferme.

AVANT			Superficies (Ha)								
Espèce	âge (ans)	Conduite	densité (ha ⁻¹)	Classe	Parc PV	Forêt	Agriculture	datacenter	Electrolyseurpiste	Autres	
Pin maritime	125	futaie	130	1		2.6					
Pin maritime	120	futaie	140	2		13.9					
Pin maritime	38	futaie	150	3		483.4					
Pin maritime	33	futaie	200	4		20.5					
Pin maritime	25-26	futaie	300	5		13.9					
Pin maritime	20-24	futaie	400	6		65.5					
Pin maritime	15-19	futaie	500	7		537.0					
Pin maritime	10-14	futaie	750	8		263.2					
Pin maritime	9	futaie	1000	9		17.8					
Pin maritime	1	futaie	1100	10		347.4					
Pin maritime	-	futaie	-	11		0.0					
Chêne pédoi	12	taillis	-	12		0.0					
Chêne pédoi	12	taillis	250	13		4.6					
Chêne pédoi	45	taillis	250	14		1.2					
				Total	0.0	1771.0					
				Grand total						1771.0	

APRES										
			Classe	Parc PV	Forêt	Agriculture	datacenter	Electrolyseurpiste	Autres	
			1	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			2	0.0	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			3	299.0	184.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			4	6.6	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			5	13.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			6	51.5	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			7	401.3	116.4			19.2		0.0
			8	190.4	62.4			10.4		0.0
			9	17.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			10	70.2	277.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			13	0.0	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			14	0.0	1.2					0.0
			Total	1052.7	688.8	29.6	0.0	0.0	0.0	0.0
			Grand total							1771.0

Dans le tableau « APRES », les superficies concernant les briques (agriculture, datacenter, électrolyseur, pistes) sont regroupées sous une seule valeur. Ce rapport prend en compte l'existence du centre de données, qui ne fait cependant plus partie du projet Horizeo et qui n'est donc plus envisagé sur ce secteur. Les briques sont toutes considérées de la même façon dans ce rapport. Aussi, prendre en compte le centre de données revient à considérer une superficie aménagée pour les briques un peu plus grandes qu'elle ne le serait.

Annexe 5.

Opérations sylvicoles de l'option de sylviculture intensive (groupement forestier du Murat).

En italique grisé sont mentionnées les opérations réalisées sur le groupement forestier mais non prises en compte dans le calcul de cette empreinte carbone.

Année 1: Coupe rase, dessouchage, récolte tronc et souches

Année 2: Double débroussaillage juste avant le labour/plantation.

Année 3 : Plantation à 1250 tiges / ha. Les plants utilisés ont 2 ans.

Année 5 (âge des pins : 5 ans) : débroussaillage mécanique au rouleau landais.

Année 13 : Débroussaillage mécanique au rouleau landais.

Année 15 (âge des pins : 15 ans): débroussaillage mécanique au rouleau landais, première éclaircie (densité cible =725 tiges/ha), récolte des troncs et branches.

Année 20 (âge des pins : 20 ans): débroussaillage mécanique au rouleau landais, deuxième éclaircie, récolte troncs et branches, densité cible 580 tiges / ha.

Année 32 (âge des pins : 32 ans): débroussaillage mécanique au rouleau landais.

Année 33 Coupe rase, récolte des troncs, branches et souches.

Opérations sylvicoles de l'option de sylviculture semi dédiée (ONF).

Année 1 Coupe rase, dessouchage, récolte troncs, branches et souches.

Année 2 Labour en plein, plantation à 2500 tiges /ha, plants de 2 ans.

Année 6 âge 6 ans, débroussaillage mécanique au rouleau landais, éclaircie à 1200 tiges / ha , récolte troncs et branches.

Année 17 âge 17 ans : débroussaillage mécanique au rouleau landais, éclaircie à 828 tiges / ha, récolte troncs et branches.

Année 22 âge 22 ans : débroussaillage mécanique au rouleau landais, éclaircie à 621 tiges / ha, récolte troncs et branches.

Année 32 âge 32 ans : débroussaillage mécanique au rouleau landais, éclaircie à 371 tiges / ha, récolte troncs et branches.

Année 37 âge 37 ans : débroussaillage mécanique au rouleau landais, éclaircie à 290 tiges / ha, récolte troncs et branches.

Année 47 âge 47 ans : nouvelle coupe rase

Opérations sylvicoles appliquées au peuplement de Chênes (régime de taillis).

Année 1 : Installation par plantation à 1250 tiges ha⁻¹, débroussaillage, léger travail localisé du sol, plants âgés d'un an.

1^{er} cycle de recépage

Année 5 Dégagement (débroussaillage en plein)

Année 30 Éclaircie à 500 tiges ha⁻¹, récolte des troncs, écorces et branches (bois énergie)

Année 45 Éclaircie à 300 tiges ha⁻¹, récolte des troncs, écorces et branches (bois énergie)

Année 60 Éclaircie à 100 tiges ha⁻¹, récolte des troncs écorces et branches (bois énergie).

Année 80 1^{er} recépage avec une repousse 1250 tiges /ha, récolte des troncs écorces et branches (bois énergie).

Ce cycle de recépage est reconduit deux fois consécutivement. À la fin du 3^e cycle (âge de souche =240 ans), les souches sont récoltées et une nouvelle plantation est effectuée l'année 241.

Bilan de carbone du déboisement lié à l'installation du projet HORIZEO de Saucats.

Supplément au Rapport final (version 7)

Mise à jour 10 septembre 2025

D. Loustau

(1) UMR ISPA, INRAE, Centre de Bordeaux Nouvelle Aquitaine.

Table des matières

Actualisation du bilan de carbone de la biomasse et du sol du projet HORIZEO	3
Etat initial du périmètre du projet.	3
Mise en place du projet HORIZEO	4
Pratiques sylviculturales.....	4
Simulations réalisées	4
Occupation des sols au sein du projet HORIZEO (version 2024)	5
Résultats	6
Stock moyen de carbone à l'hectare	6
Stocks calculés pour l'ensemble du projet HORIZEO	7
Biomasse	7
Sol	8
Déficit en carbone	8
Récolte et fuel fossile	8
Bilan de carbone du mix « compensateur »	10
Références bibliographiques.	13
Annexes.....	14

Ce mémoire supplémente le rapport INRAE sur le bilan de carbone du défrichement du projet HORIZEO du 1er novembre 2021. Il a pour objectif de réactualiser les données établies en tenant compte de la version la plus récente du projet HORIZEO et du plan d'occupation des sols dans le périmètre du projet. Les composantes du bilan de carbone ont été recalculées avec la même approche net-net que dans la version précédente, en comparant les stocks de carbone de la biomasse sur pied, du sol et des produits forestiers récoltés dans le périmètre du projet HORIZEO, installé en 2026, et la forêt de référence qui se serait développée sans la réalisation du projet.

Les données présentées ont été simulées avec un modèle représentant le cycle du carbone en forêt et qui a été adapté pour représenter un parc photovoltaïque enherbé. Ce modèle est forcé avec les séries temporelles 2024-2100 de données climatiques régionalisées par les modèles ARPEGE et ALADIN de Météo France aux points de grille les plus proches. Comme dans la version 2021, deux scénarios climatiques sont retenus, le scénario RCP4.5 et le scénario RCP8.5. Une version légèrement modifiée du modèle GO+v3.1 a été utilisée ici pour établir l'évolution des stocks de carbone dans le sol et pour la biomasse et les produits récoltés de chacun des 11 types d'occupation du sol du projet. Nous ne présentons ici que les nouveautés intervenues par rapport au calcul établi en 2021 et renvoyons au rapport 2021 pour le détail des outils de calcul et des deux scénarios climatiques utilisés.

Nous remercions Jean-Christophe DOMEQ, professeur à l'École Bordeaux Sciences Agro qui a accepté de relire et corrigé une version préliminaire de ce rapport.

Actualisation du bilan de carbone de la biomasse et du sol du projet HORIZEO

Le calcul du bilan de carbone est actualisé avec les données récentes (septembre 2024) qui tiennent compte de l'état des peuplements présents dans l'emprise du projet et du plan actualisé d'occupation des surfaces du projet HORIZEO (en annexe).

Etat initial du périmètre du projet.

La matrice de transition des superficies occupées entre 2024 et l'état après installation du projet HORIZEO est donnée en annexe A1. Les peuplements en place sont décrits d'après les données transmises par le projet HORIZEO et le Groupement Forestier du Murat, (plan simple de gestion, cartographie des âges et tableau de synthèse des données des peuplements¹). Ces données donnent l'état des peuplements inventoriés sur le périmètre en 2024. Elles ont été synthétisées pour représenter l'ensemble des peuplements en 9 classes d'âge de peuplements de Pin maritime. On note que relativement à 2021 les peuplements de Pins et Chênes les plus anciens ont été récoltés et sont donc absents. Les taillis de chênes pédonculés, marginaux en 2021(5.8 ha), sont négligeables en 2024 (moins de 3 ha). 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 sol est considéré comme homogène sur l'ensemble du périmètre avec une profondeur moyenne de 0.80 m et une réserve utile de 60 mm. L'épaisseur de sol équivalente prospecté par les racines est fixée à

¹ Documents fournis par les commanditaires (email L. Debril (18 avril 2024 et 23 septembre 2024) et L. Cantet (5 juin 2024)

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

0.50 m. Le réseau de drainage forestier préexistant est supposé être conservé en l'état après l'installation du parc.

Mise en place du projet HORIZEO

L'installation intervient en fin d'année 2026 au lieu de 2024 précédemment.

- Les surfaces non défrichées du projet HORIZEO comprennent désormais (1) des corridors boisés de conifères et feuillus (50:50), (2) des corridors enherbés non boisés, ainsi que (3) des peuplements de pins conduits selon un itinéraire « adapté », laissés sans récolte avec une densité initiale de 1250 tiges ha⁻¹ réduite à 250 tiges ha⁻¹ à 30 ans et débroussaillé tous les 5 ans³.
- L'installation des panneaux se fait après broyage sur place des souches.
- la végétation herbacée des surfaces défrichées et aménagées en parc solaire sera gérée selon un mode « standard », comme la version 2021, avec une fauche annuelle tardive.
- Une partie de la surface défrichée est laissée sans panneau solaire. Elle est répartie entre 1) une zone conduite dédiée à développer un peuplement de graminées (Molinie) ouvert avec une fauche tardive tous les trois ans, 2) un couvert de Molinie conservé « ras » avec deux fauches annuelles 3) des corridors boisés avec un couvert composé de chênes et de pins, 4) des îlots naturels (lagune, étang) et 5) des surfaces artificialisées (pistes, postes). Les corridors boisés sont répartis en trois catégories :
 - CAD : corridor mixte conifères- feuillus débroussaillé deux fois par an (1^{er} juin et 15 septembre)⁴
 - CAN : corridor mixte conifères- feuillus débroussaillé tous les 5ans (le 15 septembre)
 - CA : corridor boisé en chênes et feuillus, débroussaillé tous les 4 ans (15 octobre).

Pratiques sylviculturales

Les itinéraires techniques sylvicoles (ITS) conduits dans le périmètre du parc sont changés relativement à la version 2021. Les peuplements forestiers de référence⁵ sont conduits suivant l'itinéraire du plan simple de gestion qui correspond à l'option « intensif » de la version 2021 (coupe finale à l'âge de 28 ans, durée totale de rotation de 30 ans incluent deux éclaircies). Le tableau A2 résume les itinéraires techniques qui ont été simulés avec le modèle GO+ v3.1. Outre les modes de conduite déjà implémentés dans la version précédente, les modes de conduite nouveaux suivants ont été ajoutés :

- Zone ouverte à Molinie avec une fauche triennale
- Zone ouverte à Molinie conservée rase avec deux fauches annuelles (30 mars et 19 septembre)⁴
- Corridors boisés : Pins et chênes plantés à densité de 550 tiges ha⁻¹ avec différents régimes de fauche

Simulations réalisées

Le même protocole expérimental qu'en 2021 a été appliqué. Les stocks de carbone de la biomasse et du sol ainsi que le carbone exporté par les récoltes ont été calculés de 2024 à 2100 avec le modèle GO+ v3.1 forcé par les séries temporelles de données climatiques du point de grille SAFRAN le plus proche de Saucats

3 Les valeurs de l'âge où sont effectuées les éclaircies de cet itinéraire sont en fait de 20ans. L'âge de 30 ans utilisé ici anticipe une croissance plus lente dans le futur qu'actuellement ; la différence en termes de stock de carbone est minime.

4 Les dates de fauche sont ici fixées pour maximiser l'effet de la fauche sur la végétation et les stocks de carbone. Elles pourraient être différentes en réalité selon les prescriptions obligatoires de débroussaillage ou liées à la gestion écologique de la parcelle.

5 La forêt de référence est celle qui aurait existé si le projet HORIZEO n'existait pas

et pour les deux scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5. Les 8 classes d'âge et les 5 types d'occupation du sol de la matrice de transition (Annexe) ont été systématiquement simulés.

Le modèle de transfert radiatif utilisé lors de la version 2021 a été amélioré et certaines simplifications ont été dépassées. Le rayonnement direct est calculé dans la version 2024 par une approche de lancer de rayons sur un transect Nord-Sud de 80 points régulièrement espacés, perpendiculaire à l'axe des rangées de panneaux⁶. La géométrie du parc photovoltaïque est modifiée selon les prescriptions données (tableau 1). Cette nouvelle configuration laisse pénétrer 30% de plus de rayonnement que la configuration 2021 au niveau du sous étage de graminées et du sol.

Tableau 1. Disposition des panneaux solaires dans la version 2024 et comparaison avec la version 2021.

	Version	Version
	2024	2021
Hauteur du bord supérieur du panneau (m)	2.5	2.2
Exposition	Sud (0°)	Sud (0°)
Angle d'inclinaison (degré)	16°	20°
Largeur des panneaux (m)	4.76	4.50
Hauteur du bord inférieur des panneaux (m)	1.19	0.67
Largeur de l'inter rang entre deux rangées de panneaux (m)	3.5	2.5

Occupation des sols au sein du projet HORIZEO (version 2024)

L'occupation des sols du périmètre dans la version 2024 (ci-après v24) montre les différences suivantes avec la version 2021 (ci-après v21) :

- La superficie restant boisée et exploitée pour la sylviculture est réduite de 689 ha dans la v21 à 638 ha ⁽⁷⁾ dans la v24 ce qui augmente le déficit carbone de biomasse et sol.
- La surface défrichée passe de 1053 ha (v21) à 1178.7 ha (v24) comportant :
 - o 45 ha de corridors
 - o Une surface de 263 ha dédiée à l'installation d'une prairie de graminées fauchée tous les trois ans.
 - o Une surface de 64.7 ha conservée rase par des fauches bisannuelles
 - o 682 ha dotés de panneaux solaires
 - o 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 :
 - o 71 ha de corridors boisés
 - o 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.
 - o 53.5 ha de pistes
 - o 3.5 ha laissés en arial

⁶ Sur chacun des 80 points, la probabilité de recevoir le rayonnement direct, autrement dit de voir l'astre solaire, est calculée toutes les heures.

⁷ En incluant la forêt soumise au plan simple de gestion (638 ha)

Résultats

L'évolution des stocks de carbone du projet HORIZEO et de la forêt de référence a été simulée de 2024 à 2068 avec une résolution horaire, ces stocks ont ensuite été intégrés en bilans annuels. Nous présentons ici les données obtenues pour quatre durées d'amortissement du projet, installé en 2026, soient les années 2036, 2046, 2056 et 2066.

Stock moyen de carbone à l'hectare

Le tableau 2 donne les valeurs moyennes de stock de carbone à l'hectare estimées par le modèle GO+ v3.1 pour les différents types d'occupation du sol et à la date de 2056 prise ici pour exemple. Ces calculs ont été effectués pour les deux scénarios climatiques considérés, RCP4.5 et RCP8.5. Comme cela est attendu, les stocks de carbone sont les plus élevés sous forêt. Les valeurs les plus faibles sont calculées pour le parc de panneaux solaires et pour la prairie de Molinie, les corridors boisés étant intermédiaires. Ce résultat appelle à une certaine prudence pour les raisons suivantes :

- le modèle utilisé n'a pas été évalué dans le cas de prairies mais uniquement pour des sous-bois ou des friches forestières.
- les données de la littérature montrent qu'à l'équilibre, le stock de carbone organique du sol sous prairie ne devrait pas être très différent de celui observé sous forêt dans les mêmes conditions. La valeur simulée par le modèle GO+ semble un peu faible ce qui pourrait être dû à une inadéquation du paramétrage utilisé, qui correspond à un sous étage forestier et non à une prairie ouverte.
- Le module de sol du modèle n'a pas été modifié et la vitesse de vidange de la nappe correspond aux observations réalisées sur le site du Bray sous Pin maritime, à environ 10 km du périmètre du projet HORIZEO. Ce paramétrage ne correspond pas exactement à la situation du parc HORIZEO où le drainage profond de la nappe dépendra du réseau de fossés présent dans et autour du parc. La présence de la nappe impactant l'humidité du sol qui elle-même joue sur la vitesse de minéralisation du carbone organique et sur le confort hydrique de la végétation, cette incertitude se répercute donc sur la dynamique du carbone simulée par le modèle avec un impact à attendre sur le stock de carbone du sol de $\pm 5\%$.

Les valeurs sous forêt sont relativement faibles, les peuplements d'arbres étant conduits selon l'itinéraire intensif et donc coupés à 28 ans. On note aussi que le scénario climatique RCP85 produit des valeurs de biomasse par hectare légèrement plus faibles mais des stocks de carbone organique dans le sol pratiquement similaires, voire légèrement plus élevés sous forêt..

Tableau 2. Valeur moyenne du stock de carbone à l'hectare calculée en 2056 avec le modèle GO+V3.1 pour les différents types d'occupation du sol du projet HORIZEO et pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

	Stocks moyens de carbone à l'hectare en 2056 (tC ha ⁻¹)			
	RCP4.5		RCP8.5	
	Biomasse	Sol	Biomasse	Sol
Corridors arborés	56.7	83.2	46.7	83.7
Prairie à Molinie	33.9	73.3	30.6	74.5
Forêt de pins (ITS intensif)	61.0	97.6	57.3	104.2
Végétation rase	0.3	58.9	0.5	59.3
Panneau photovoltaïque	13.6	69.8	10.8	69.9

Stocks calculés pour l'ensemble du projet HORIZEO

Les tableaux 3-1 et 3-2 montrent les stocks de carbone du sol, de la biomasse et des produits récoltés de l'ensemble du périmètre (1945 ha) hors bâtiment du projet HORIZEO et de la forêt de référence pour des périodes d'amortissement allant de 10 à 40 ans et pour les scénarios climatiques RCP45 et RCP85. En 2026, la valeur indiquée correspond à l'état de la forêt avant installation.

Biomasse

Le stock de carbone de la biomasse sur pied, dans la forêt de référence comme dans HORIZEO, montre des fortes variations selon la durée d'amortissement en raison des cycles de récoltes des arbres et des fauches de végétation qui se produisent de façon irrégulière. Ce sont surtout les peuplements de pins soumis à gestion, la prairie de graminées et secondairement les corridors qui provoquent ces variations (figure 1).. La mortalité naturelle et les variations temporelles de la croissance des arbres et de la végétation interviennent aussi second ordre. Ces variations rendent le calcul du bilan de biomasse fortement dépendant de l'année choisie et de la période considérée. Ainsi, sous RCP 4.5, le stock de carbone de la biomasse en forêt de référence est minimal en 2026 et montre au contraire un maximum en 2056 (tableau 3.1). En conséquence la différence des valeurs du stock de biomasse entre la forêt de référence et le projet HORIZEO montre des variations importantes selon les dates d'amortissement choisies, avec un minimum et un maximum atteignant 40 807 et 88 132 tC en 2036 et 2056 respectivement (RCP 4.5). La figure 1 détaille l'évolution du stock de carbone entre 5 dates échelonnées de 2026 à 2066 pour chaque catégorie d'occupation.

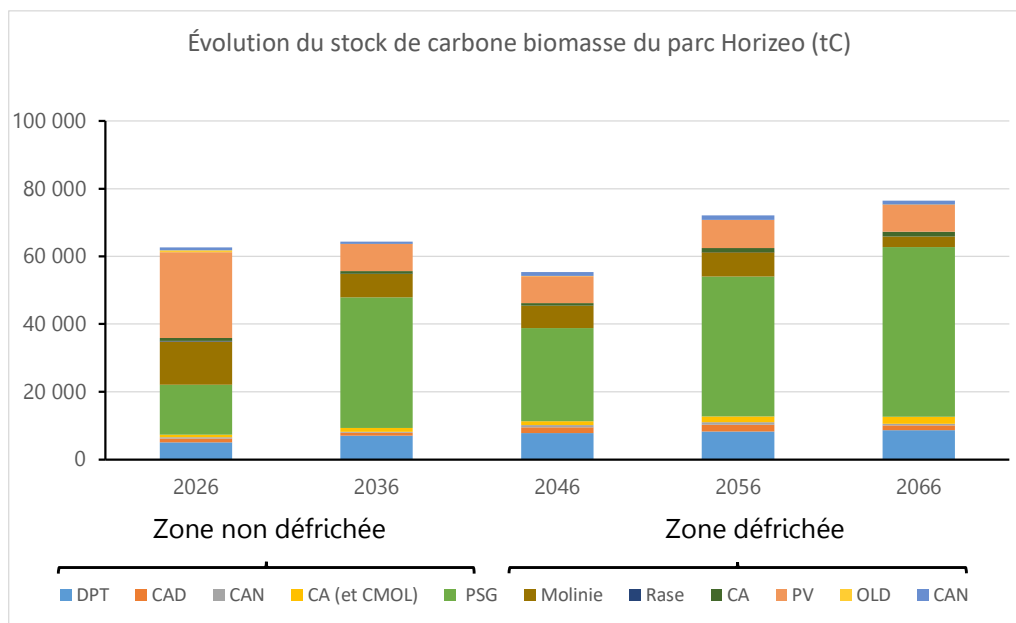


Figure 1. Stocks de carbone des différentes occupations du sol en zone défrichée et en zone non défrichée du parc Horizeo sous le scénario RCP 4.5. La définition des différentes abréviations est donnée en tableau A1, en annexe.

On observe aussi que la croissance en biomasse des forêts est plus rapide avec cette version du modèle (3.1) que dans la version 2021, elle est avantagée par le climat prédit sous le scénario RCP4.5 par rapport au scénario 8.5, ce dernier aggravant fortement les périodes de stress hydrique.

Sol

Le stock de carbone organique du sol montre quant à lui une baisse continue dans le temps pour le projet HORIZEO. Cette baisse s'atténue toutefois avec la durée d'amortissement. Cette tendance était déjà observée et commentée dans la première version de ce rapport (figs. 17 & 18, pages 33-36). Elle correspond ici à un déficit allant de 42 133 à 46 224 tC après 40 ans sous les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5 respectivement. Ces valeurs sont légèrement différentes de celles obtenues dans le rapport 2021 qui étaient de 45 540 tC et 43 689 tC respectivement. Le stock de carbone organique du sol reste stable en forêt de référence.

Déficit en carbone sol et biomasse cumulés

Comme dans la version initiale, nous avons exprimé le déficit en carbone du projet HORIZEO en le ramenant à une valeur annuelle et pour un hectare. La valeur de ce déficit annuel de carbone est légèrement différente de celle de la version 2021. Après 30 ans d'amortissement (2056), la valeur du déficit s'élève à 2.04 (RCP 4.5) et 2.14 (RCP 8.5) tC ha⁻¹ an⁻¹ contre 1.5 et 1.5 tC ha⁻¹ an⁻¹ respectivement dans la version 2021. Cet écart entre les deux versions est expliqué par le changement d'allocation des surfaces avec une diminution de la surface non défrichée et un accroissement de la surface déboisée. Un deuxième facteur est la croissance plus rapide des forêts dans la version 2024 qui a utilisé un paramétrage remis à jour. Le déficit en carbone calculé est sensible au scénario climatique, cette différence étant surtout marquée durant les 20 premières années d'amortissement : relativement au scénario RCP 4.5, le déficit sous le scénario RCP8.5 est plus élevé de respectivement +15% et +23% en 2036 et 2046.

Récolte et fuel fossile

Les différences de carbone récolté ne sont pas prises en compte dans le déficit calculé ici, car sa durée de vie est relativement brève. Le carbone récolté et exporté est nettement plus important dans la forêt de référence. Les valeurs de carbone récolté diffèrent peu entre les deux scénarios climatiques et représentent

un écart atteignant un cumul sur 40 ans de 154×10^3 tC (RCP8.5) à 163×10^3 tC (RCP 4.5) contre 144×10^3 tC dans la version 2021. Le fuel fossile nécessaire aux opérations culturales a déjà été calculé en v21 et il représentait environ -1 à -2% du déficit. Nous ne l'avons pas recalculé ici. Si nécessaire, nous préconisons d'appliquer une valeur conservative d'abattement de -1.5% au déficit calculé.

Tableau 3-1. 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 RCP4.5. Les valeurs de stocks et la différence brute entre HORIZEO et forêt de référence sont donnés en tonnes de carbone pour l'ensemble du périmètre. Le déficit annuel calculé est exprimé par hectare.

RCP 4.5						
Stock de carbone (tC)						
		2026	2036	2046	2056	2066
Horizeo	Biomasse	64 664	67 359	57 263	74 760	79 630
	Sol	177 831	157 583	151 496	141 679	130 082
	Récolte	16 999	25 858	51 515	64 151	82 849
Forêt de Référence	Biomasse	64 664	108 166	134 599	162 892	135 110
	Sol	177 831	167 702	175 121	172 616	172 216
	Récolte	3 410	44 088	99 722	154 882	246 314
Différence brute (tC)	Biomasse	-	40 807	77 336	88 132	55 480
	Sol	-	10 118	23 626	30 936	42 133
	Récolte	- 13 589	18 230	48 207	90 731	163 465
Déficit (tC ha ⁻¹ an ⁻¹)	Biomasse	-	2.10	1.99	1.51	0.71
	Sol	-	0.52	0.61	0.53	0.54
	Total		2.62	2.60	2.04	1.25
	Récolte		0.9	1.2	1.6	2.1

Tableau 3-2. 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

Bilan de carbone du mix « compensateur »

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 4 indique les superficies, emplacement et type de boisement envisagés et proposés comme mix « compensateur » par le commanditaire. Les simulations déjà disponibles dans le cadre du projet Forêts-21⁸ ont été utilisées ici selon la correspondance indiquée dans le tableau 4. Ces simulations ont été effectuées avec la même version du modèle GO+, la version 3.1, que celle utilisée pour les calculs précédents. Les points de grille 7580 et 7588 de la grille SAFRAN de Météo-France ont été sélectionnés pour représenter les scénarios climatiques du Sud-Gironde et de l'Entre-deux-mers respectivement. Les données simulées présentées ici sont publiques et disponibles sur les pages web de Forêts-21.

Les résultats obtenus sont résumés dans la figure 2. 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. Le déficit en carbone lié au défrichement pour l'aménagement du projet est indiqué par les symboles bleus ; l'évolution du stock de carbone du mix est représentée séparément pour le sol (marron), la biomasse (vert) et le total biomasse + sol (gris).

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, sous les deux scénarios climatiques considérés. 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 sol⁹ 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 7cm 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.

⁸ <https://forets21.inra.fr/pelican3.1>

⁹ le compartiment « sol » inclut les couches organiques de l'humus et les rémanents, en plus du sol minéral de 0 à 100 cm de profondeur.

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 tendancier (4 éclaircies et coupe à DBH=40 cm)	PM - ITS tendancier # 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 tendancier (4 éclaircies et coupe à DBH = 40 cm)	PM - ITS tendancier #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

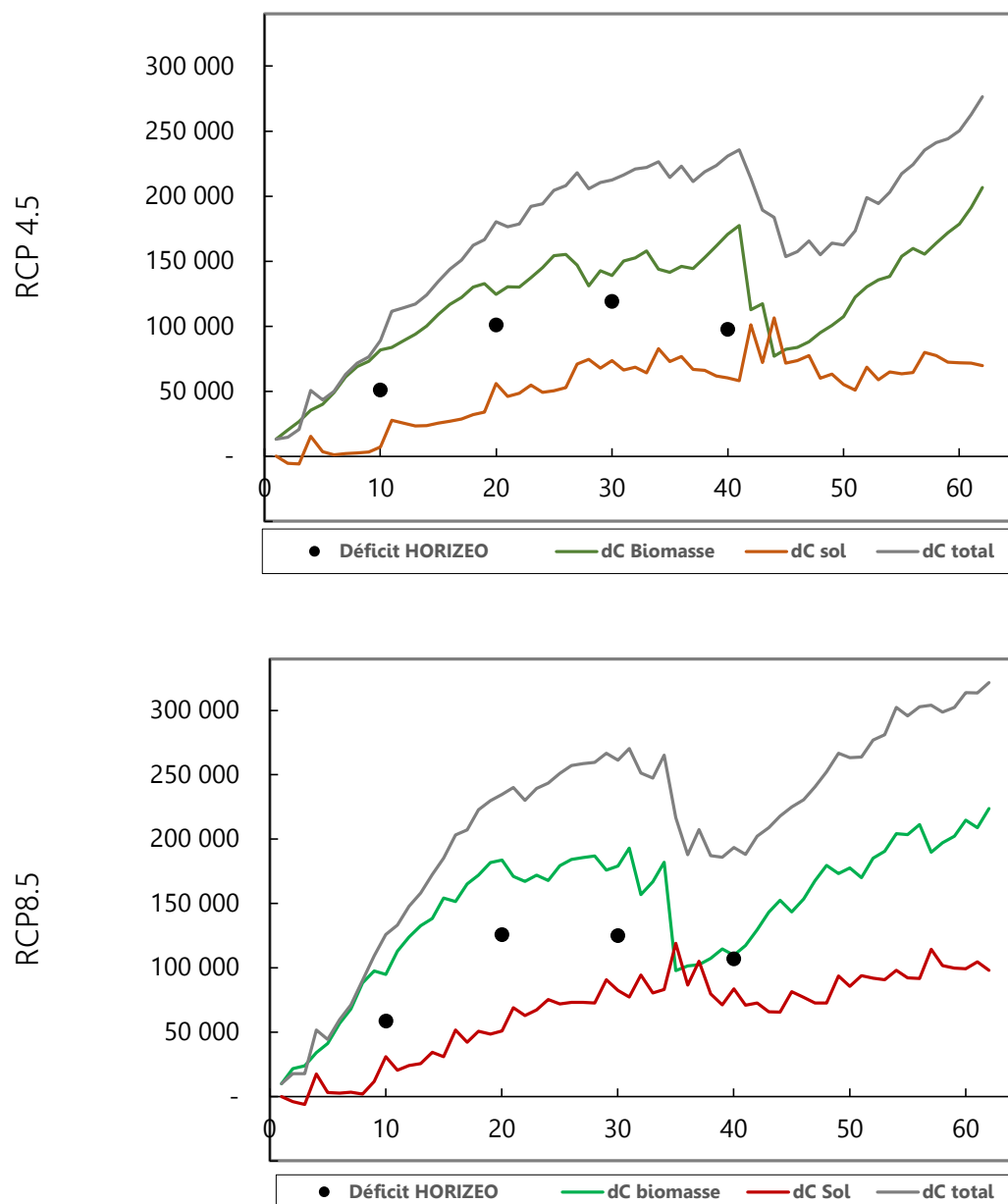


Figure 2. Évolution des stocks de carbone dans la biomasse sur pied et le sol du mix compensateur (3000 ha) selon la durée d'amortissement sous les scénarios climatique RCP4.5 (haut) et RCP8.5 (bas). Le déficit en carbone lié au défrichage pour l'aménagement du projet HORIZEO calculé dans le tableau 3.2 comme la somme des différences brutes « Biomasse » et « Sol » en tonnes de carbone est également indiqué (symboles noirs).

Il est important de rappeler les limites propres à notre étude. Les simulations que nous avons effectuées ou mobilisées dans ce supplément sont des approximations scénarisées du futur. Les outils de simulation et scénarios utilisés sont parmi les plus récents et les plus aboutis pour être appliqués dans ce type d'évaluation, ils reposent sur des bases théoriques bien maîtrisées de physique environnementale, d'écophysiologie végétale et d'écologie fonctionnelle forestière. Nous ne disposons toutefois pas de données de référence pour chacun des paramètres de chaque espèce envisagée dans ce mix et les avons donc simulées avec des essences plus ou moins similaires. Le modèle de sol intégré à GO+, Roth-C, n'a pas encore été évalué pour ce type de conditions : déforestation, reforestation, parc photovoltaïque. Cela constituera un de résultats attendus du volet (1) du projet régional « IMPACTS ». En particulier, nous ne disposons pas de référence observée et ne connaissons donc pas encore le degré de vraisemblance de la recharge en carbone

de sols anciennement viticoles telle qu'elle est simulée ici dans les boisements compensateurs, ou, à l'inverse, et comme nous l'avions signalé pour le rapport 2021, de l'appauvrissement en carbone organique des sols sous panneau. Une incertitude affecte aussi les données climatiques simulées que nous utilisons : on sait qu'elles restituent mal les épisodes de canicule et sécheresse observés depuis 2006 (Figuères et al. 2021). Par ailleurs, nos simulations ne tiennent pas compte de l'impact d'événements extrêmes comme tempêtes ou incendies dont la fréquence et la sévérité se sont accrues depuis 25 ans en Gironde et qui, dans le futur, affecteront aussi bien la forêt du périmètre du projet que la forêt dite de référence ou les boisements compensateurs. Nous considérons malgré ces limites que la démarche adoptée ici et les outils de simulation et données utilisées sont les plus à jour compte tenu de l'état de l'art dans ce domaine et les mieux à même de fournir un pronostic du bilan de carbone du défrichement lié au projet Horizeo.

Références bibliographiques.

Ansaldi L., D. Makowski, C. Labarre et D. Loustau. 2024. Optimisation of maritime Pine forest management under climate change. (soumis).

Figuères S., Moisy C., D. Loustau 2021. Comparaison des données de température et pluviométrie simulées selon le scénario RCP8.5 par les modèles ARPEGE – ALADIN version 2014 avec les données observées de 2006 à 2020. Communication interne, 15 planches, UMR ISPA, INRAE.

Annexes

Tableau A1. Matrice de transition des superficies occupées par le projet HORIZEO. Les données sont en hectares.

Occupation pré projet					projet HORIZEO											
Espèce	âge (ans)	Conduite	Superficie (ha)	Classe	Zone non défrichée (766 ha)								Zone défrichée (1178.7 ha)			
					DPT	CAD	CAN	CA	CMOL	PSG	divers	Pistes	CAN	divers	pistes	Total hors CAN
Pin maritime	0-4	futaie	302	1	13	1	2	5	1	85			3			193
Pin maritime	5-9	futaie	591	2	3	6	0	23		342			3			214
Pin maritime	10-14	futaie	0	3									0			0
Pin maritime	15-19	futaie	177	4	10	7	1	2		35			3			120
Pin maritime	20-24	futaie	587	5	43	10	5	5		50			9			466
Pin maritime	25-29	futaie	102	6	37	1	1	1		18			0			44
Pin maritime	30-34	futaie	27	7	0	1	0	0		2			2			22
Pin maritime	>35	futaie	1	8									0			1
Chêne pédoi		airial	2	9												
		Ball trap	7	10												
		Lagune	1	11												
		Landes	0	12												
		Pistes	147	13												
Grand total (ha)					106	26	8	36	1	532	4	54	19			1160

Code	définition	Code des fichiers CSV (XX=4.5 ou 8.5)
DPT :	itinéraire technique de pins avec fauche quinquennales, densité des arbres ramenée à 250 ha ⁻¹ après 30 ans et laissée ensuite sans coupe	forest_RCPXX_DPT1 -6
CAD :	corridor arboré débroussaillé deux fois par an et comprenant 50% chênes, 50% pins.	forest_RCPXX-CAD_1-6_P ou Q
CAN :	corridor arboré débroussaillé tous les cinq ans (50% chênes, 50% pins)	forest_RCPXX-CAN_1-6_Q et forest_RCPXX_1-6
CA :	corridor arboré de feuillus, fauche tous les quatre ans.	forest_RCPXX-CA_1-6_Q
CMOL :	corridor à Molinie, identique au CA.	
PSG :	peuplement de pins conduit selon le plan simple de gestion (ITS intensif)	forest_RCPXX_1-8
OLD :	zone défrichée, laissée en friche et fauchée 2 fois par an (mars et juin)	OLD1-8PV_RCPXX
Pistes :	pistes de circulation (artificiel)	
MOL :	Molinie seule sans couvert arbustif, fauche tardive tous les trois ans.	MOL1-6PV_RCPXX
RAS :	couvert de graminées maintenues rases avec deux fauches par an (mars, septembre)	RAS5PV_RCPXX
PV :	panneaux photovoltaïques sur végétation de graminées (une fauche tardive par an)	STD1-8PV_RCPXX_v3
Divers :	surface pas ou peu végétalisée (ball trap, lagune, airial)	

Tableau A2. Caractéristiques de gestion des types d'occupation du sol du parc HORIZEO.

	Nom et code	Végétation au sol	Arbres	Densité des arbres (ha ⁻¹)	Éclaircies (âge en années)	Coupe finale (âge)
Forêts	Compensation, DPT	Graminées, fauche tous les 5 ans	Pin maritime	1250 – 250	10,15,20	(couvert continu)
	Plan simple de gestion, PSG	Graminées, fauche tous les 5 ans	Pin maritime	1250 – 580	15,20,	28
	OLD	Graminées, 2 fauches par an	aucun	0		2
Corridors	Corridor arboré débroussaillé, CAD	Graminées, 2 fauches par an	Pin maritime, Chênes	1250-580 (pins) 550 (chênes)	aucune	aucune
	Corridors arborés non débroussaillés, CAN, CA	Graminées, fauches tous les 5 ans	Pin maritime, Chênes	1250-580 (pins) 550 (chênes)		
	Corridor à molinie, CMOL	Graminées, fauches tous les 3 ans	Pin maritime	125	aucune	aucune
Zones sans panneau	Prairie à Molinie, MOL	Graminées, fauches tous les 3 ans		0		
	Prairie rase, RAS	Graminées, 2 fauches par an		0		
	Pistes	Aucune				
Zones sous panneaux	Parc sous panneaux, PV	Graminées, fauches annuelles tardive				