



HAL
open science

Bilan de carbone du déboisement lié au projet de déboisement lié au projet de parc photovoltaïque Horizeo.

Denis Loustau, Christophe Chipeaux, Pierre Trichet, Barry A. Gardiner

► To cite this version:

Denis Loustau, Christophe Chipeaux, Pierre Trichet, Barry A. Gardiner. Bilan de carbone du déboisement lié au projet de déboisement lié au projet de parc photovoltaïque Horizeo.. [Rapport de recherche] INRAE. 2021. hal-03778686

HAL Id: hal-03778686

<https://hal.science/hal-03778686>

Submitted on 16 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

Rapport final (version 2)

1er novembre 2021

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>	5
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	9
3.3.4 Émissions de carbone fossile liées aux opération sylvicoles.....	10
3.3.5 Sylviculture et gestion de la végétation sous panneaux.....	10
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	23
4.3 Biomasse de la végétation des parcs Solaires de St Germain et Salaunes.	25
4.4 Simulation du parc photovoltaïque de Saucats avec le modèle GO+.....	25
4.4.1 Dynamique de la végétation spontanée sous panneaux solaires.....	25
4.4.2 Bilan d'énergie du parc de panneaux solaires	27
4.4.3 Hydrologie.....	28
4.5 Bilan de carbone du projet de parc de Saucats	29
4.5.1 Carbone de la biomasse.....	34
4.5.2 Matière organique du sol.....	34
4.5.3 Production et exportation des récoltes	37
4.5.4 Émissions fossiles.....	38
4.6 Bilan global et conclusion	39
5 Références	42
6 Annexes.....	47

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 de plate-forme d'énergies renouvelables *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 GINKO21.

L'approche adoptée, dite « net-net », conduit à comparer les stocks et flux de carbone biogéniques¹ de 202' à 2100 entre les deux alternatives suivantes :

- Construction et fonctionnement de *Horizeo* de 2024 ou 2029 à 2100, 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 de Peyrissan et de Salaunes ainsi que du site de Bilos (commune de Salles) ont été effectuées par 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

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

expert(e)s consulté(e)s dont Claire Rebourg et Marie de Saxe (Gingko) 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 dépressages, 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,² surface terrière³ 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. 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 différents 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 précision meilleure que 5% les composantes du bilan radiatif d'une canopée forestière de Pin maritime pendant la saison de croissance.

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 « ferme 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*.

² Surface des feuilles ou aiguilles par unité de surface de sol

³ Projection au sol de la surface de la section horizontale des troncs prise à une hauteur de 1.3m.

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 soit 67 points. 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) selon la disposition des panneaux du parc photovoltaïque de Salaunes et prévue à Saucats respectivement (fig.1).

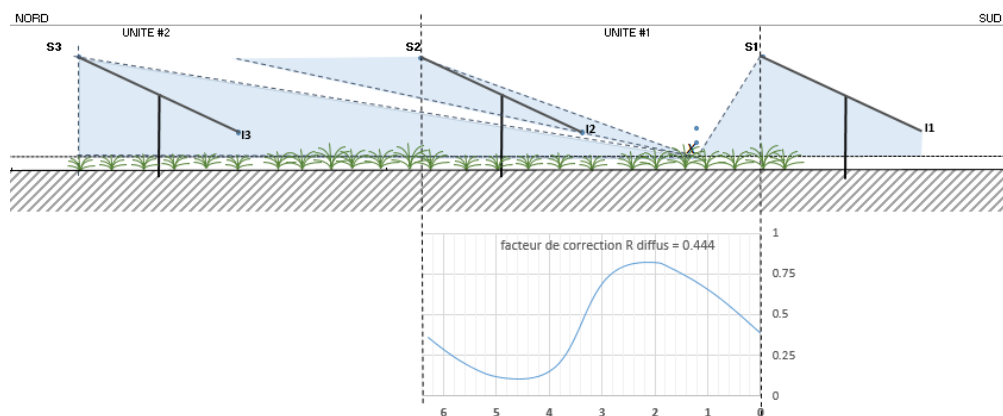


Figure 1. Principe de calcul de la transmission du rayonnement diffus sous une unité de panneau solaire Sud- Nord (paramètres du parc photovoltaïque de Salaunes). A chaque point X du transect, la fraction d'angle du ciel vue est donnée par $= 180 - S3 \times O - S2 \times I2 - S1 \times O$. La fraction 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

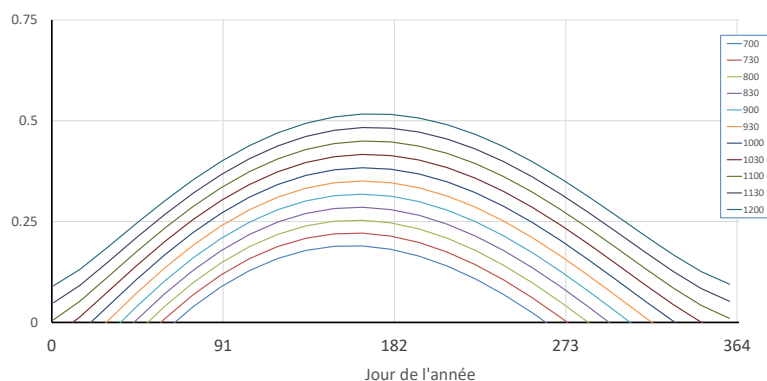


Figure 2. Métamodèle de la fraction de rayonnement direct vue depuis le sol en fonction du jour de l'année et de l'heure de la journée (paramétrage ferme de Salaunes). Chacune des courbes donne l'évolution annuelle de la probabilité de transmission du rayonnement solaire direct sous les panneaux pour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

Rayonnement de grande longueur d'onde.

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 faces supérieures et inférieures des panneaux voisins.

Les caractéristiques sont résumées dans le tableau 1, tirées de la littérature en l'attente de données plus précises du constructeur. 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 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 trainée 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 moyen des panneaux et le niveau $z = 10\text{m}$. La résistance de couche limite 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 panneau 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.

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. Les surfaces boisées sont occupées par le Pin maritime pour l'essentiel (1765.2 ha) et par des taillis de Chêne pédonculé (5.8 ha). 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 périmètre concerné par le déboisement occupe 1771 ha pour un total de 1 958 ha, le reste étant constitué de terrains non boisés dont l'affectation n'est pas modifiée par le projet (pistes forestières, bâtiments, jardins domestiques, lagunes) et qui ne seront donc pas pris en compte dans ce rapport.

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 de 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 :

- Dessouchage (au maximum 1 an après la coupe rase). Valorisation énergétique des souches par Dalkia (site *Smurfit* Biganos) pour les arbres dont la circonférence au pied de l'arbre est supérieure à 1.0 m sur écorce (soit un diamètre de 0.30 à 0.35 m sous écorce). Ce cas ne se produit jamais dans les projections réalisées.
- Destination du bois coupé :
 - Trituration 10 à 20%
 - Petit sciage : 10 à 20% - caisse palette
 - le reste : sciage / déroulage
- Le taillis de chênes (23 ans en 2020) est exploité à l'âge de 80 ans en bois énergie.

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.

Les panneaux solaires (3 m x 4 m) du parc *Horizeo* 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	Saucats	Langelé (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

3.3.3 Végétation et sol

La végétation sous les panneaux est considérée comme spontanée, formée d'un peuplement dominé typiquement par des graminées cespiteuses de Lande humide comme la Molinie (*Molinia caerulea* 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 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.

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 peuplement de Pin maritime sont prises en compte.

- Une version intensive 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).

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 mécanique⁴. La biomasse fauchée est laissée sur place. On suppose que cette opération n’affecte pas le sol lui-même. Dans les deux cas, 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) a été appliqué tel quel.

3.3.6 Scénarios climatiques

Les données utilisées sont mises à disposition par le portail [DRIAS](http://www.drias-climat.fr) 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 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 2006-2300 (Tableau 1). 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

⁴ 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.

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, 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 des 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. Pour les mesures *in situ*, un ensemble de 12 capteurs ont été disposés à 0.2m au-dessus du sol selon un transect Nord-Sud recouvrant une unité panneau+ interbande. 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 verticale descendante du rayonnement solaire dans la bande spectrale 400-700 nm correspondant au spectre visible absorbé par les pigments photosynthétiques de la végétation.

Le premier site est le parc Salaunes, à panneaux fixes. La figure 3 donne un aperçu du dispositif de mesures. Le deuxième site est situé près de Rion-des-Landes (site de Langelé) et équipé de panneaux mobiles pivotant autour d'un axe horizontal Nord-Sud. Le dispositif de mesures, identique à celui utilisé à Salaunes a été installé du 31 mars 2021 au 21 avril.

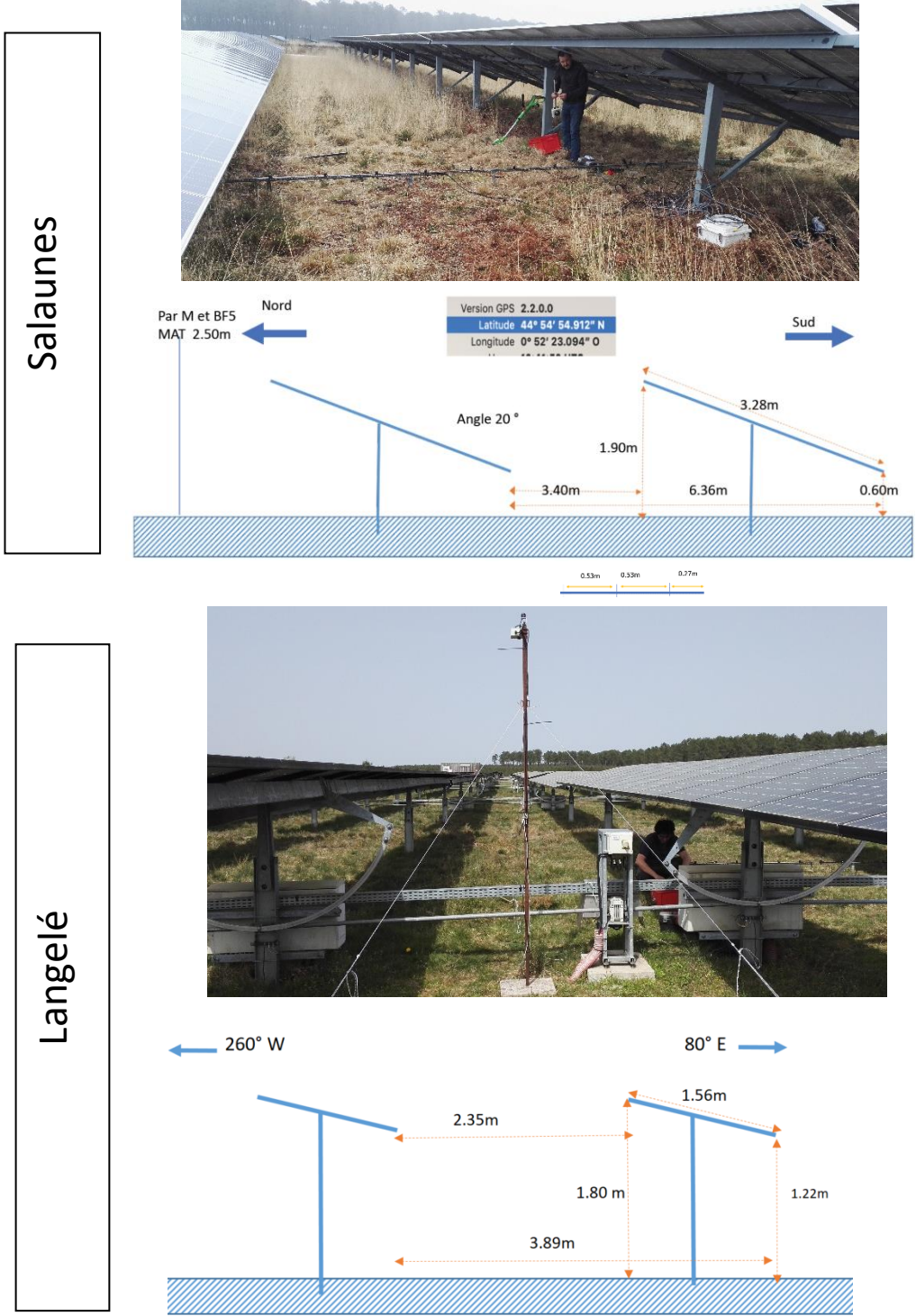


Figure 3. Photo et schéma du dispositif de mesure du rayonnement solaire transmis installé sous les panneaux solaires de la ferme de Salaunes (panneaux fixes) 24 mars au 31 mars 2021) (schéma supérieur) et de Langelé (Rion des Landes) (Solar trackers pivotant autour d'un axe E-W) (schéma inférieur).

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-de-Peyrissan, 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 panneau, intermédiaire et entre les panneaux. Un total de sept transects de 3 prélèvements ont ainsi été réalisés 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 massique.

4 Résultats

4.1 Revue bibliographique

La revue bibliographique a concerné les trois aspects développés ci-après, la dynamique récente de la végétation, l'écophysiole 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 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 m² m⁻² et atteindre un indice racinaire de 70.6 m² 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.

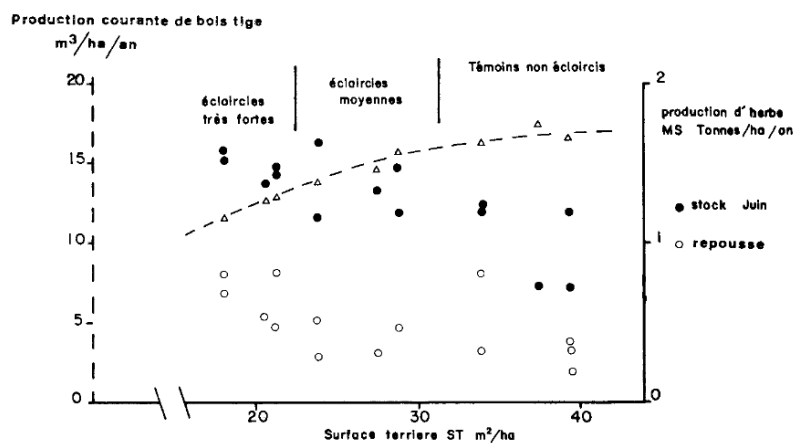


FIG. 3 bis

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 terrière⁵ du peuplement de pins.

⁵ 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.

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	162 \pm 24	27 \pm 2 ^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 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.

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 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, VPD de 0.5 à 2.5 kPa et température de 15-25°C. Cette sensibilité n'avait pas été observée chez Guinochet et Lémée (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 Demesse-macker, 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 défrichement 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 défrichement (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).

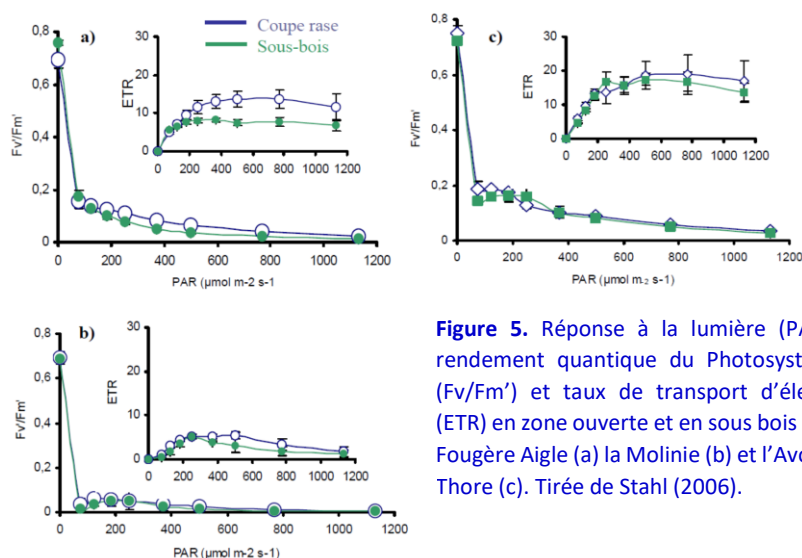


Figure 5. Réponse à la lumière (PAR) du rendement quantique du Photosystème II (F_v/F_m') et taux de transport d'électrons (ETR) en zone ouverte et en sous bois pour la Fougère Aigle (a) la Molinie (b) et l'Avoine de Thore (c). Tirée de Stahl (2006).

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).

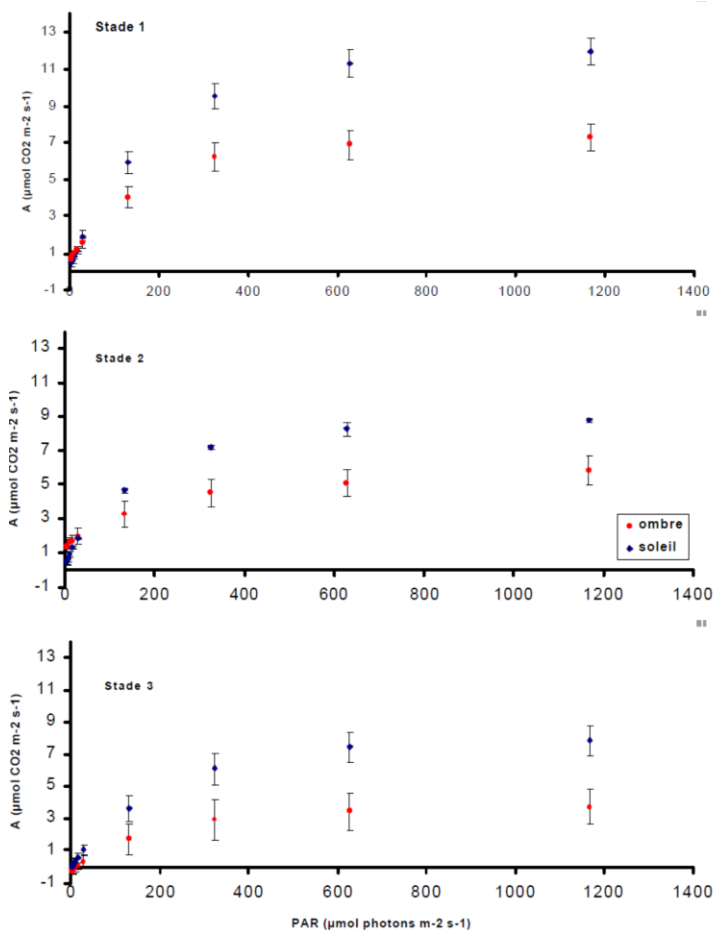


Figure 6. Courbes de réponse à la lumière (PAR) de l'assimilation photosynthétique nette du CO₂ (A) par des feuilles de Molinie élevées sous ombrage (rouge) et témoin (bleu). (Delzon, 2000).

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 (Choi et al. 2020, Fig. 7).

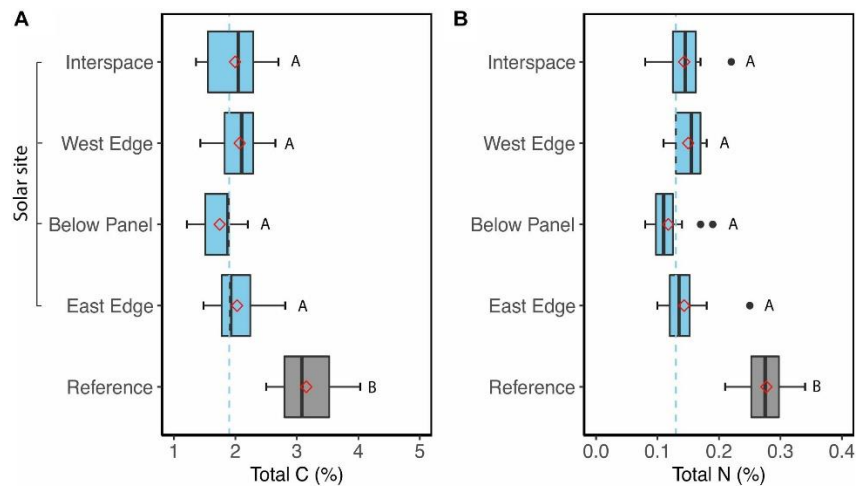


Figure 7. Profils des teneurs moyennes en carbone(A) et azote (B) du sol témoin (grisé) et à différentes positions dans un parc photovoltaïque sous climat sec ($P=373$ mm annuels) dans le Colorado, 7 années après l'installation du parc (tiré de Choi et al. 2020).

Cet effet est attribué à l'exportation des couches organiques superficielles lors de l'implantation du parc. 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).

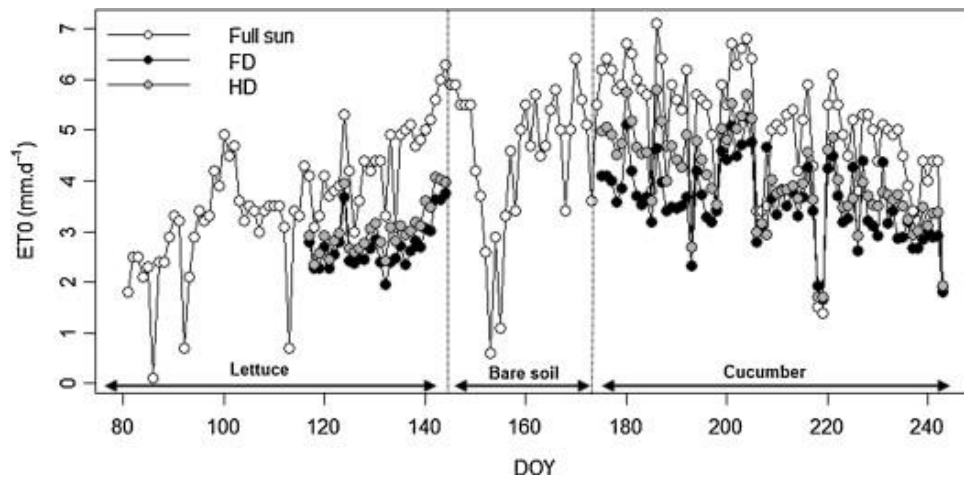


Figure 8. Evapotranspiration potentielle pour un couvert de laitues du jour 81 au jour 144 et un couvert de concombre du jour 175 au jour 244. Full sun : témoin à découvert, FD : panneaux solaires à forte densité ; HD panneaux solaires à faible densité. Tirée de Marrou et al. (2013).

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).

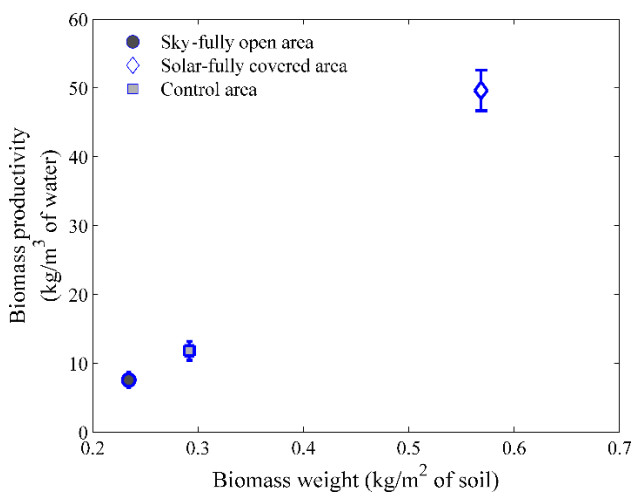


Figure 9. Efficacité de l'eau en relation avec la production en matière sèche entre (*sky fully open area*) et sous (*solar fully covered area*) les rangs de panneaux solaires, et comparée au témoin à découvert (*Control area*). Tirée de Hassanpour Adeg et al. (2018).

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 $+2^{\circ}\text{C}$ 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 $+4^{\circ}\text{C}$ 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:

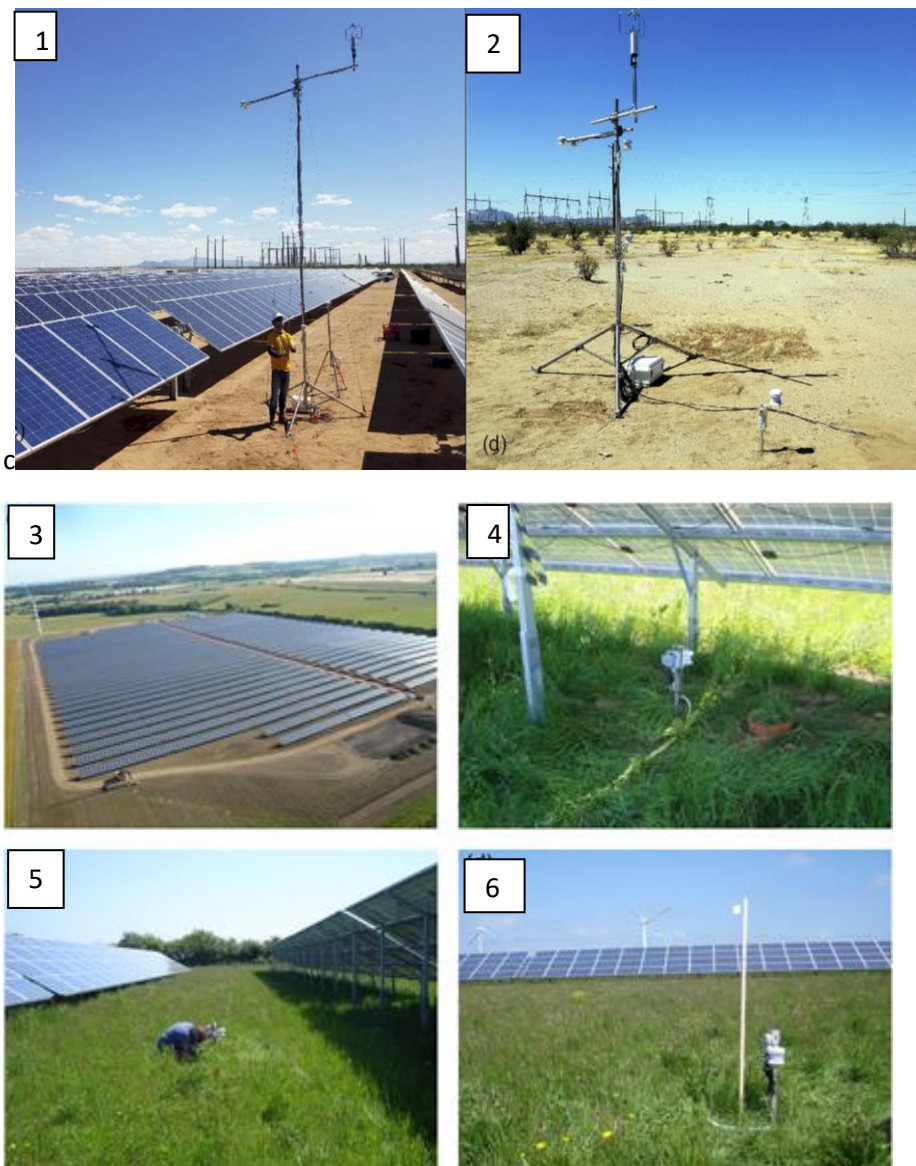


Figure 10. Dispositifs expérimentaux de l'expérience de Broadbent et al. (2019) (1 et 2) et de Armstrong et al. (2016) (3 à 6).

- Une réduction des émissions dans l'infrarouge 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.

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 tété, un refroidissement de -5.2 °C ainsi qu'une baisse d'humidité de l'air est observée sous les panneaux. En hiver, la baisse de température est de -1.7°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 voltaïque 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 $z=2.5m$ 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 bleutée 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. A 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). A 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.

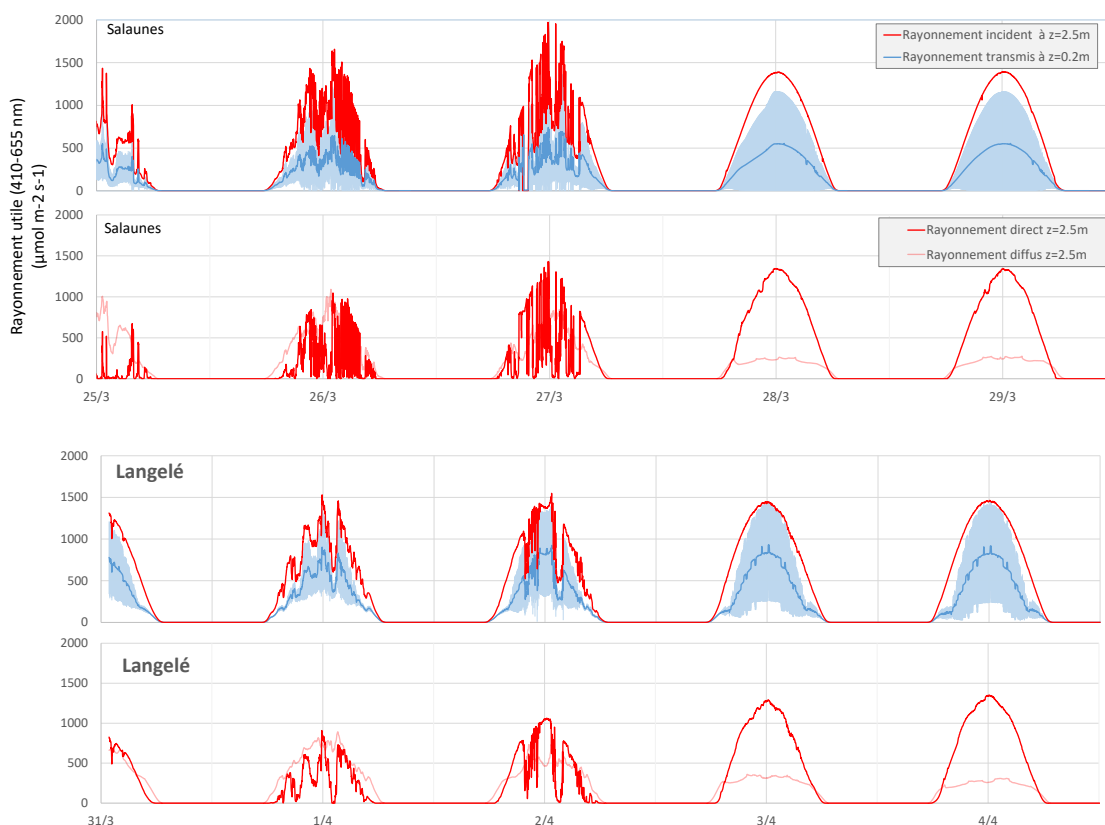


Figure 11. Séries temporelles des valeurs mesurées de rayonnement visible incident sur les sites de Salaunes (panneaux fixes) et de Langelé (trackers). Pour chaque site, le diagramme supérieur représente le rayonnement incident (rouge) et la moyenne du rayonnement transmis sous les panneaux au niveau $z=0.2\text{m}$ (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 à Salaunes et Saint Germain de Peyrissan respectivement. On remarque également que la biomasse du parc de St Germain de Peyrissan est la plus élevée. La fauche plus tardive sur ce site qu'à Salaunes pourrait être une explication.

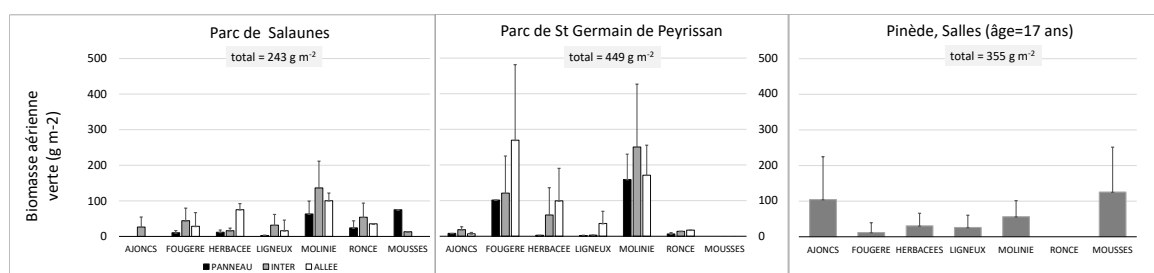


Figure 12. Biomasse sèche à 65°C des parties vertes de la végétation des parcs photovoltaïques de Salaunes et de St Germain de Peyrissan, comparée à la végétation accompagnatrice d'un peuplement de Pins de Lande Humide à Bilos (commune de Salles). Les barres donnent la valeur moyenne des prélèvements, 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. 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 de la végétation 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. 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 24tC ha⁻¹, comme ici 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. Elles s'effectuent plutôt en hiver, hors saison de croissance, et pénalisent donc moins le développement de la strate herbacée. 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 que sous forêt, la végétation en sous-étage est d'avantage exposée aux périodes de déficit hydrique du sol qui sont moins fréquentes sous le parc (cf. section hydrologie).

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

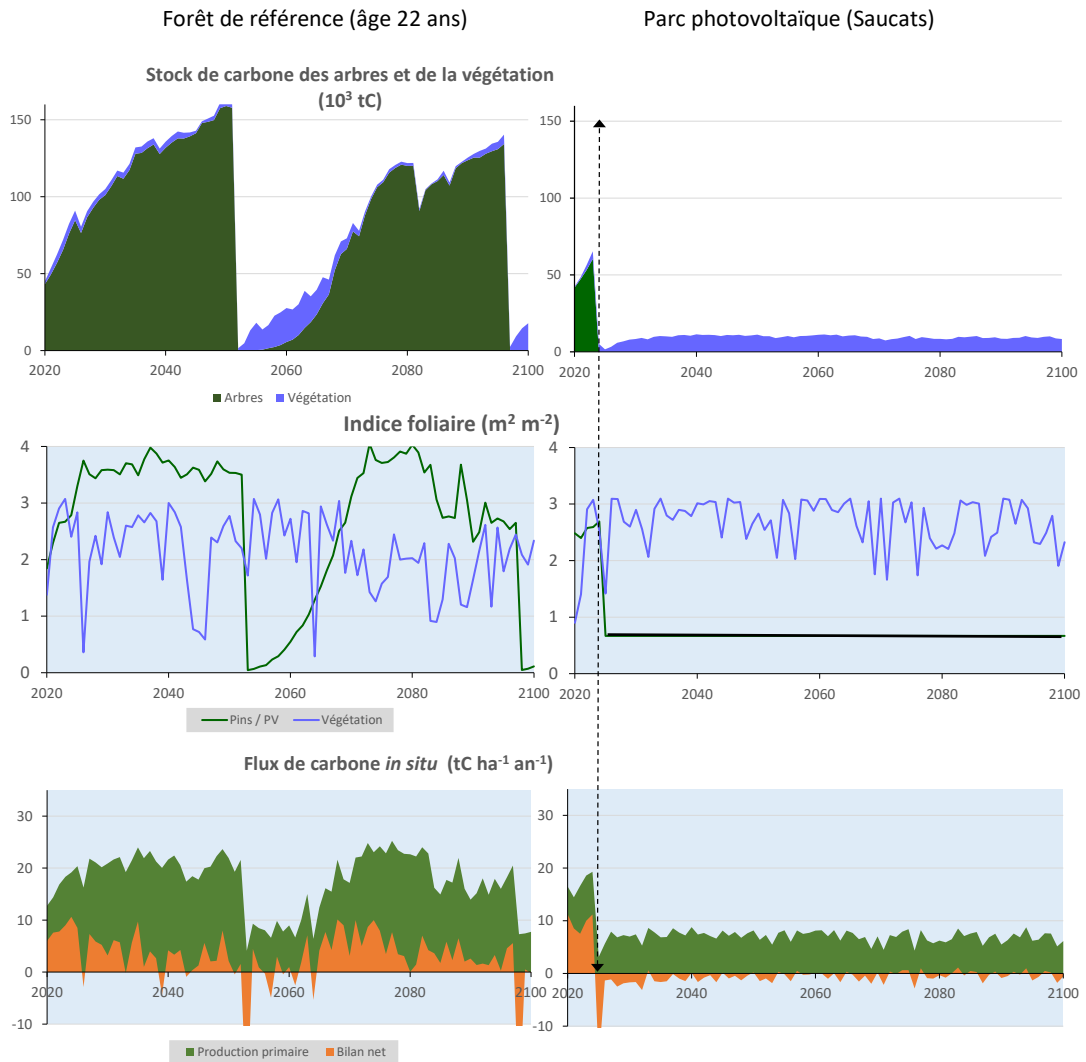


Figure 13. Dynamique du fonctionnement de la végétation après installation des panneaux solaires simulée pour le parc de Saucats, RCP4.5. La colonne gauche donne les projections pour un peuplement de pins âgé de 17 ans, à titre de référence. La colonne droite indique les calculs pour le parc photovoltaïque installé en 2024. De haut en bas :

- Stock de carbone dans la biomasse ;
- Indice foliaire des arbres et de la végétation en sous étage; l'indice correspondant aux panneaux solaires est figuré par un trait noir.
- Flux de carbone in situ : production primaire brute et flux net échangé avec l'atmosphère

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 initial âgé de 17 ans (classe 7) 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 étude⁶. 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 aussi un bilan d'énergie radiative plus élevé 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 les panneaux solaires est restituée dans des proportions inverses, de 47% et 53% respectivement.

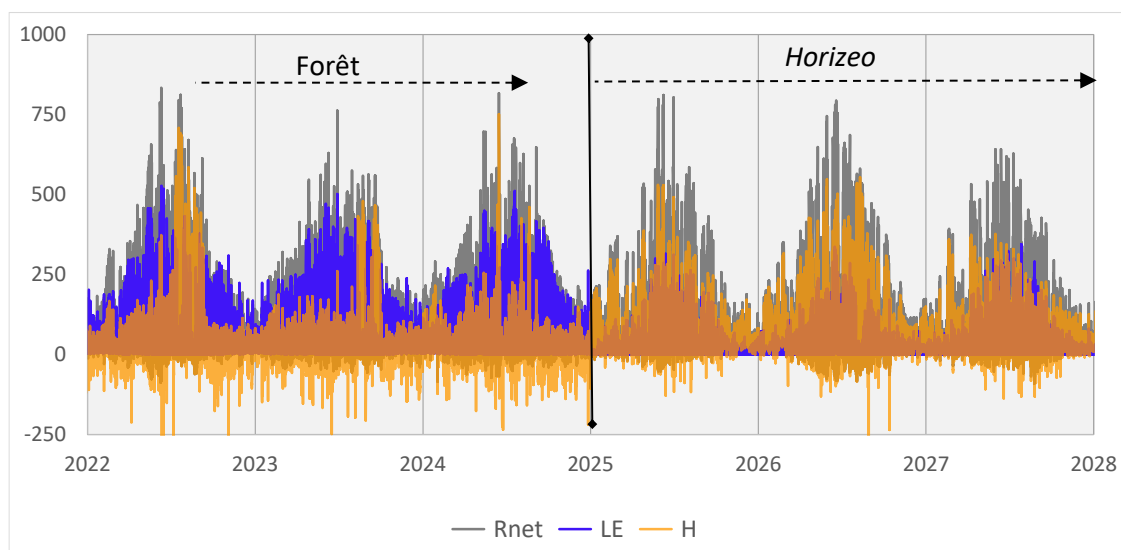


Figure 14. Rayonnement net absorbé (Rnet) et des flux de chaleur sensible (H) et latente (LE) avant et après la construction du parc photovoltaïque et déboisement d'un peuplement de Pins maritimes de 17 ans. (Point7500, RCP45).

- 3) La dissipation du rayonnement net absorbé, R_n , 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.

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

⁶ 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.

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 (17 ans, 500 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 associé aux panneaux 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 17 ans en 2020 RCP4.5).

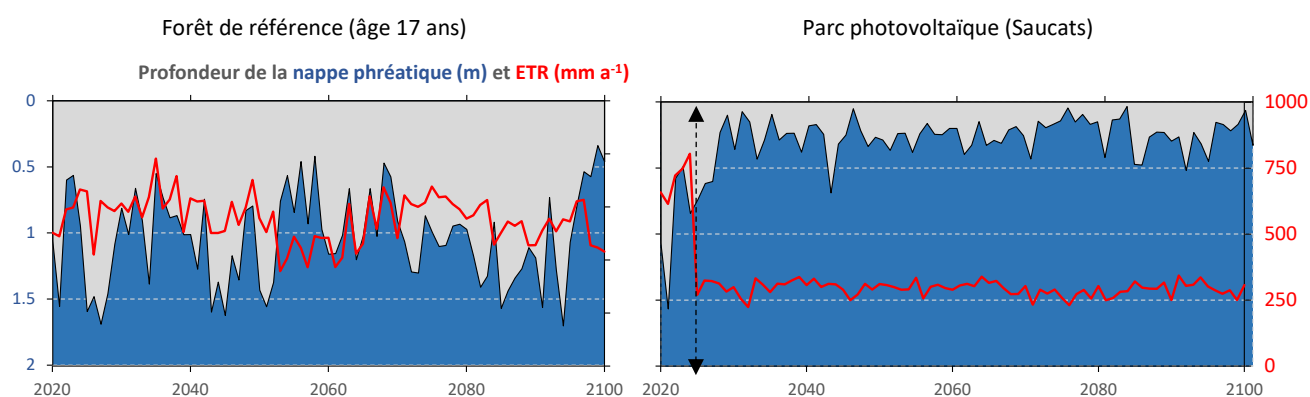


Figure 15. Evolution de l'évapotranspiration annuelle de 2020 à 2100 en forêt (âge 17 ans,) et pour le parc photovoltaïque (scénario climatique RCP 4.5, sylviculture tendancielle). Evapotranspiration totale (courbe rouge) et profondeur sous le sol de la nappe phréatique (aire bleue).

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 17 ans en 2020 atteint 11.6 W m⁻² contre 13.1 W m⁻² pour le parc. 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 réponse à l'augmentation de l'indice foliaire de la végétation.

En conséquence, le drainage profond 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 inchangé⁷, 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. Elle montre la dynamique des compartiments sol et biomasse sous l'option « forêt » et sous l'option « panneaux photovoltaïques » pour une période de 76 ans consécutive à la construction. Le peuplement initial correspond à la classe 6 des peuplements inventoriés en 2020 (22 ans). Les barres verticales représentent les trois dates où le bilan est calculé soient 30, 40, 50 et 76 années respectivement après la construction. 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 et stock de carbone de la matière organique (rémanents, litière, couches organiques et sol minéral). 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, $\Delta C_{biomasse}$ d'une part et ΔC_{sol} d'autre part.

⁷ 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.

Principe de calcul du bilan de carbone du projet

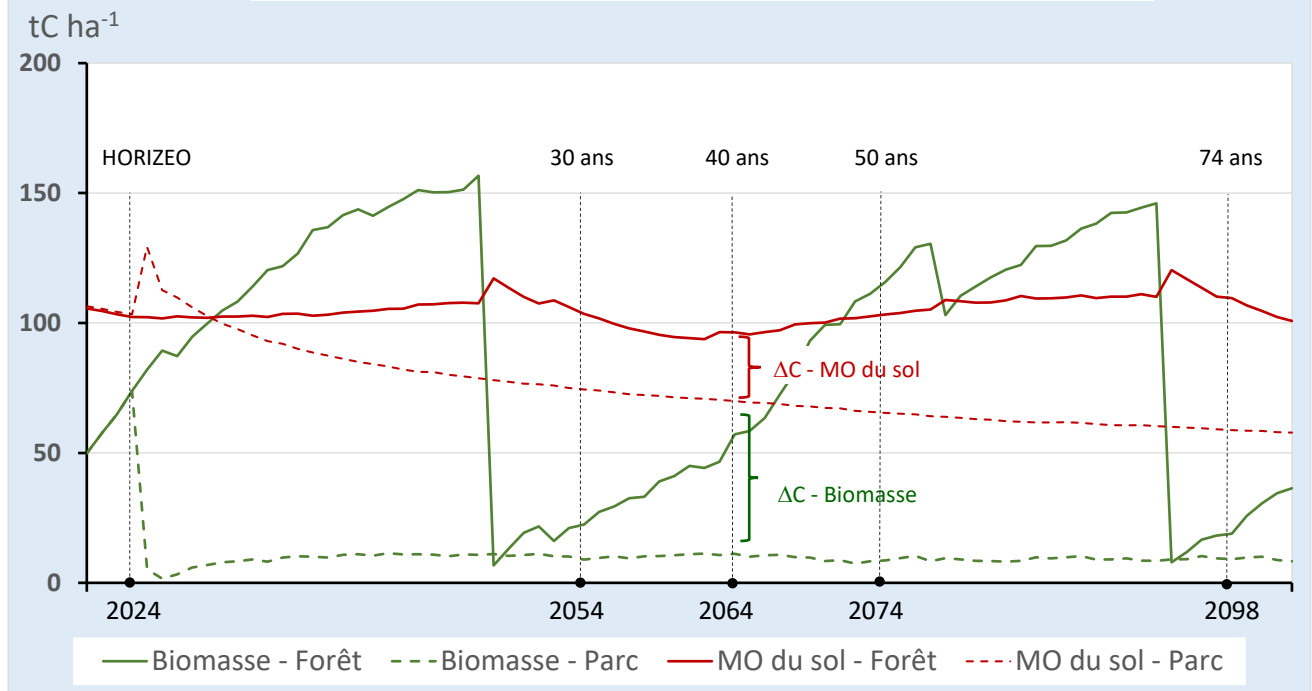


Figure 16. Évolution des stocks de carbone dans la biomasse (vert) et le sol (rouge) pour un peuplement de pins de 17 ans en 2020 (trait plein) et pour le parc photovoltaïque installé après déboisement (pointillés). La date d'installation du parc est fixée en décembre 2024, scénario RCP85, sylviculture standard. ΔC Mo du sol et ΔC biomasse illustrent le calcul du bilan de carbone du projet pour cette classe d'âge.

Bilan du projet Horizeo

Pour le calcul du bilan global du projet, les simulations ont été réalisées pour chacune des 12⁸ classes de peuplement (10 classes d'âge de Pin maritime et 2 classes de Chênes), selon deux modes de sylviculture du Pin maritime, « semi-dédié » (ONF, Sardin 2003) ou « intensif » (Groupement forestier du Murat)⁹ et pour deux scénarios de climat, RCP 45 et RCP85 (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 × scénario de climat. Le bilan comparatif calculé prend en compte la production récoltée et les émissions fossiles provoquées par les travaux de sylviculture et de transport des produits forestiers récoltés. 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 :

⁸ Deux des 14 classes définies d'après les données d'inventaires ne sont pas concernées par le projet *Horizeo* (cf. annexe 4).

⁹ 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.

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

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 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 intactes (689 ha). À cette surface, s'ajoutent 30 ha initialement boisés et convertie en bâtiments (électrolyseur et *datacenter* ou pistes).

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 selon en mode intensif ou standard.
- Sous-ligne 2 – PV : récolte des peuplements coupés 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 le périmètre du parc 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 ($y = 2064$), 50 ans ($y = 2074$) et 74 ans ($y = 2100$) 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 (ligne (2) – ligne (1)), en caractères gras. Le déficit annuel (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 pin maritime¹⁰.

Chaque tableau donne le bilan en carbone du projet:

- pour les stocks de carbone *in situ* seuls, correspondant à la biomasse sur pied et à la matière organique du sol (rémanent, litière, couches organiques et sol) : colonne 3 « Total B+S » ;
- en y ajoutant la production exportée (colonne 4 « Total »)¹¹.

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 dernière colonne du tableau, pour information. Les conclusions sont développées ci-après.

¹⁰ À titre de référence, un peuplement de Pin maritime de Lande humide en sylviculture standard fixe annuellement $3\text{tC ha}^{-1}\text{ an}^{-1}$ (d'après inventaire IFN-IGN, 2008, Berbigier et al. 2002, Kowalski et al. 2002, Moreaux et al. 2011, 2020a, 2020b).

¹¹ Ce calcul équivaut à attribuer un coefficient de substitution de 1:1 aux produits récoltés.

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

(1) indique la variation observée par rapport à 2024 pour les peuplements forestiers laissés tels quels,
 (2) indique la variation consécutive au défrichement et à l'installation de la ferme solaire en 2024.

a) Sylviculture intensive, scénario climatique RCP 4.5.

Sylviculture intensive Scénario RCP4.5.			Biomasse	Sol	Total	Production	Total	Fuel
Δstocks en tC					B+S	récoltée		
2024-2054	(1)	Forêt	- 43 141	- 10 150	- 53 291	127 611	74 320	- 2 217
	(2)	Projet						
		PV	- 68 175	- 51 716	-119 891	30 542	- 89 349	- 755
		Pin	- 10 057	- 3 452	- 13 509	42 073	28 564	- 731
		Différence (1)-(2)	35 092	45 018	80 109	54 996	135 105	- 732
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.66	0.85	1.51	1.04	2.54	- 0.01
2064	(1)	Forêt	- 45 766	- 17 686	- 63 452	159 543	96 091	- 2 772
	(2)	Projet						
		PV	- 67 122	- 56 086	-123 208	30 542	- 92 666	- 829
		Pin	- 14 184	- 7 141	- 21 325	54 621	33 296	- 949
		Différence (1)-(2)	35 541	45 540	81 081	74 379	155 461	- 994
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.50	0.64	1.14	1.05	2.19	- 0.01
2074	(1)	Forêt	- 67 523	- 21 406	- 88 929	203 535	114 607	- 3 536
	(2)	Projet						
		PV	- 68 862	- 60 754	-129 616	30 542	- 99 074	- 904
		Pin	- 18 052	- 9 225	- 27 278	64 538	37 260	- 1 121
		Différence (1)-(2)	19 391	48 574	67 965	108 455	176 420	- 1 511
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.22	0.55	0.77	1.22	1.99	- 0.02
2100	(1)	Forêt	- 61 691	- 38 460	-100 151	225 468	125 318	- 3 918
	(2)	Projet						
		PV	- 68 686	- 67 681	-136 367	30 542	- 105 825	- 1 098
		Pin	- 17 780	- 14 385	- 32 165	75 720	43 555	- 1 316
		Différence (1)-(2)	24 775	43 606	68 381	119 206	187 587	- 1 504
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.19	0.33	0.52	0.91	1.43	- 0.01

b) Sylviculture intensive, scénario climatique RCP 8.5.

Sylviculture intensive Scénario RCP8.5.			Biomasse	Sol	Total	Production	Total	Fuel
Δstocks en tC					B+S	récoltée		
2024-2054	(1)	Forêt	- 22 750	- 10 871	- 33 621	130 914	97 293	- 2 275
	(2)	Projet						
		PV	- 58 162	- 48 518	- 106 681	26 005	- 80 676	- 676
		Pin	- 2 369	- 3 191	- 5 559	45 563	40 003	- 792
		Différence (1)-(2)	37 781	40 838	78 619	59 346	137 965	- 807
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.71	0.77	1.48	1.12	2.60	- 0.02
2064	(1)	Forêt	- 13 086	- 15 852	- 28 938	163 983	135 045	- 2 849
	(2)	Projet						
		PV	- 59 413	- 53 301	- 112 714	26 005	- 86 709	- 750
		Pin	- 2 110	- 6 240	- 8 350	58 641	50 290	- 1 019
		Différence (1)-(2)	48 437	43 689	92 126	79 338	171 464	- 1 080
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.68	0.62	1.30	1.12	2.42	- 0.02
2074	(1)	Forêt	- 59 138	- 18 657	- 77 795	204 648	126 853	- 3 556
	(2)	Projet						
		PV	- 62 255	- 58 123	- 120 377	26 005	- 94 372	- 825
		Pin	- 14 558	- 7 889	- 22 447	67 641	45 194	- 1 175
		Différence (1)-(2)	17 675	47 355	65 030	111 002	176 032	- 1 555
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.20	0.53	0.73	1.25	1.99	- 0.02
2100	(1)	Forêt	- 52 560	- 40 555	- 93 116	230 834	137 718	- 4 011
	(2)	Projet						
		PV	- 68 307	- 73 037	- 141 344	26 005	- 115 339	- 1 019
		Pin	- 16 957	- 15 649	- 32 605	80 756	48 151	- 1 403
		Différence (1)-(2)	32 704	48 130	80 834	124 073	204 907	- 1 588
		<i>Déficit annuel par ha</i>	0.25	0.37	0.62	0.95	1.56	- 0.01

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	Total	Fuel
Δstocks en tC						B+S	récoltée		
2024-2054	(1)	Forêt		11 287	11 704	22 990	107 443	130 433	- 2 029
	(2)	Projet	PV	- 68 175	- 51 716	- 119 891	30 542	- 89 349	- 801
			Pin	10 103	1 254	11 357	29 736	41 093	- 561
				69 359	62 166	131 525	47 165	178 690	- 667
				<i>Déficit annuel par ha</i>	1.31	1.17	2.48	0.89	3.36 - 0.01
2064	(1)	Forêt		- 6 845	1 223	- 5 621	151 057	145 436	- 2 852
	(2)	Projet	PV	- 67 122	- 56 086	- 123 208	30 542	- 92 666	- 875
			Pin	9 146	- 459	8 687	42 061	50 747	- 794
				51 132	57 769	108 900	78 454	187 355	- 1 183
				<i>Déficit annuel par ha</i>	0.72	0.82	1.54	1.11	2.64 - 0.02
2074	(1)	Forêt		41 110	2 884	43 994	183 847	227 841	- 3 471
	(2)	Projet	PV	- 68 862	- 60 754	- 129 616	30 542	- 99 074	- 950
			Pin	14 419	- 897	13 522	61 053	74 575	- 1 153
				95 553	64 535	160 088	92 252	252 340	- 1 369
				<i>Déficit annuel par ha</i>	1.08	0.73	1.81	1.04	2.85 - 0.02
2100	(1)	Forêt		23 685	16 949	40 634	377 656	418 289	- 7 131
	(2)	Projet	PV	- 68 686	- 67 681	- 136 367	30 542	- 105 825	- 1 144
			Pin	25 087	5 585	30 672	122 670	153 342	- 2 316
				67 284	79 045	146 328	224 444	370 772	- 3 671
				<i>Déficit annuel par ha</i>	0.51	0.60	1.12	1.71	2.83 - 0.03

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

Sylviculture standard Scénario RCP8.5.				Biomasse	Sol	Total	Production	Total	Fuel
Δstocks en tC						B+S	récoltée		
2024-2054	(1)	Forêt		36 828	10 130	46 958	113 254	160 212	- 2 138
	(2)	Projet	PV	- 58 162	- 48 518	- 106 681	26 005	- 80 676	- 715
			Pin	21 547	1 067	22 613	32 018	54 631	- 605
				73 443	57 582	131 025	55 231	186 256	- 819
				<i>Déficit annuel par ha</i>	1.38	1.08	2.47	1.04	3.51 - 0.02
2064	(1)	Forêt		23 793	5 746	29 539	159 706	189 245	- 3 016
	(2)	Projet	PV	- 59 413	- 53 301	- 112 714	26 005	- 86 709	- 790
			Pin	23 304	1 804	25 108	45 308	70 417	- 856
				59 902	57 243	117 145	88 393	205 537	- 1 370
				<i>Déficit annuel par ha</i>	0.85	0.81	1.65	1.25	2.90 - 0.02
2074	(1)	Forêt		51 826	9 185	61 010	200 109	261 119	- 3 778
	(2)	Projet	PV	- 62 255	- 58 123	- 120 377	26 005	- 94 372	- 864
			Pin	18 716	1 951	20 668	70 600	91 268	- 1 333
				95 364	65 356	160 720	103 504	264 224	- 1 581
				<i>Déficit annuel par ha</i>	1.08	0.74	1.82	1.17	2.98 - 0.02
2100	(1)	Forêt		27 092	16 790	43 883	391 758	435 641	- 7 397
	(2)	Projet	PV	- 68 307	- 73 037	- 141 344	26 005	- 115 339	- 1 058
			Pin	25 580	8 143	33 723	126 952	160 675	- 2 397
				69 820	81 684	151 504	238 800	390 305	- 3 942
				<i>Déficit annuel par ha</i>	0.53	0.62	1.16	1.82	2.98 - 0.03

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(lignes (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, indépendant de la sylviculture, est peu variable d'une période à l'autre. Il est plus élevé sous climat RCP 4.5, -67.1 à -68.9 ktC contre -58.1 ktC à -68.3 ktC sous RCP8.5. Cette différence se répercute sur le bilan du périmètre entier de façon plus ou moins marquée. Elle s'explique par une légère différence de la valeur initiale en 2024 et par l'effet de l'accroissement du CO₂ qui favorise plus fortement la croissance de la végétation sous panneau sous scénario RCP85 (+33% en moyenne). Le bilan de la végétation sous panneaux s'accroît au long de la période 2024-2100, cette aggravation étant plus marquée sous scénario RCP8.5, +17.4% contre +0.7% sous scénario RCP4.5.

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,
 - (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 2020-2100. En sylviculture standard, où la fréquence des coupes rases et des travaux du sol sont moins fréquentes, le stock de carbone de la MO du sol a tendance à s'accroître mais ne montre pas de tendance systématique. Au contraire, en régime intensif, les exportations et travaux du sol plus fréquents et plus intenses appauvrissent 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 67.7 et 73.0 ktC en 2100 pour les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5 respectivement.

Afin de représenter la dynamique de la MO du sol et pour compléter les données présentées dans le tableau 4, la figure 17 représente l'évolution du stock de carbone organique comparée entre la forêt de référence et le projet *Horizeo* (en exemple, le défrichement d'un peuplement de 17 ans en 2024).

- Sous forêt, le stock de carbone de la MO du sol ne montre pas de tendance systématique. 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.

- 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. Une fois le parc installé, le modèle prédit une diminution continue du stock de carbone initial du sol. Le stock est réduit à 44% de sa valeur initiale après 76 ans. Sur la période 2024-2100, 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 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 de -95 et -92% en 2100 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 $9 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ suivant le mode de gestion et les composantes de la biomasse laissées sur place : aiguilles, branches, souches. Après installation du parc photovoltaïque, l'apport de carbone organique au sol est réduit à la litière de la végétation herbacée et aux rémanents laissés au sol après chaque fauche, soit en moyenne 2.5 à $3.5 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. 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 d'âge moyen, la diminution du stock de carbone organique atteint $0.9 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et conduit à un appauvrissement net du sol en carbone de 71 tC après 76 ans (2100) et pour la classe d'âge 7. La figure 18 montre que cet appauvrissement résulte de la réduction des apports en carbone organique au sol de 7.4 à $3.1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ suite au déboisement alors que la vitesse de minéralisation est relativement moins réduite, de 6.7 à $4.0 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. L'apport par la végétation est accru sous parc (1.7 sous forêt à $3.1 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ sous parc). Le bilan global est donc négatif dans le cas du parc photovoltaïque alors qu'il est en légère augmentation pour ce peuplement.

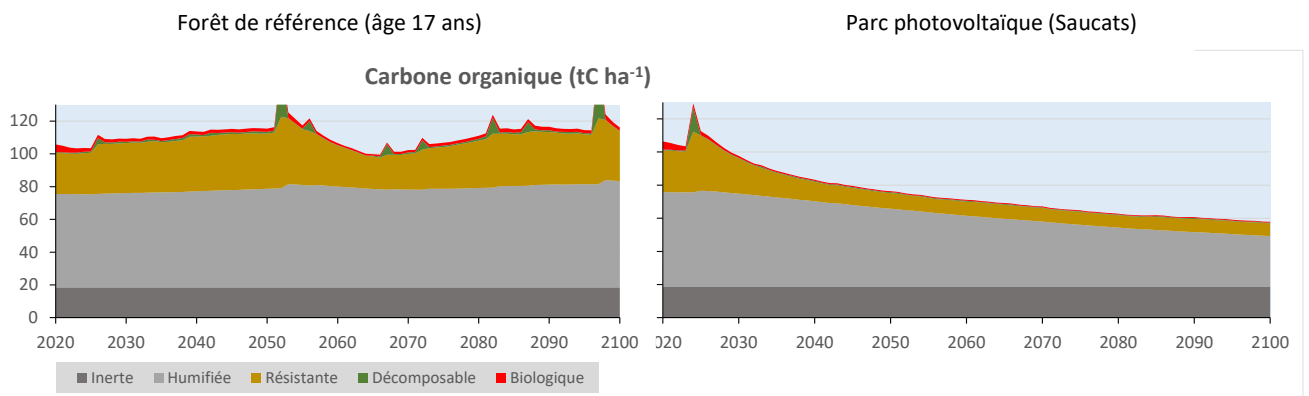


Figure. 17. Évolution du carbone organique du sol de 2020 à 2100 sous forêt (à gauche) et sous parc photovoltaïque (à droite) pour la classe 7 de peuplement de Pin maritime (âge 17 ans, DBH 19 cm, densité $500 \text{ tiges ha}^{-1}$).

Le modèle GO+ (Roth-C) décompose le carbone organique du sol en 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.

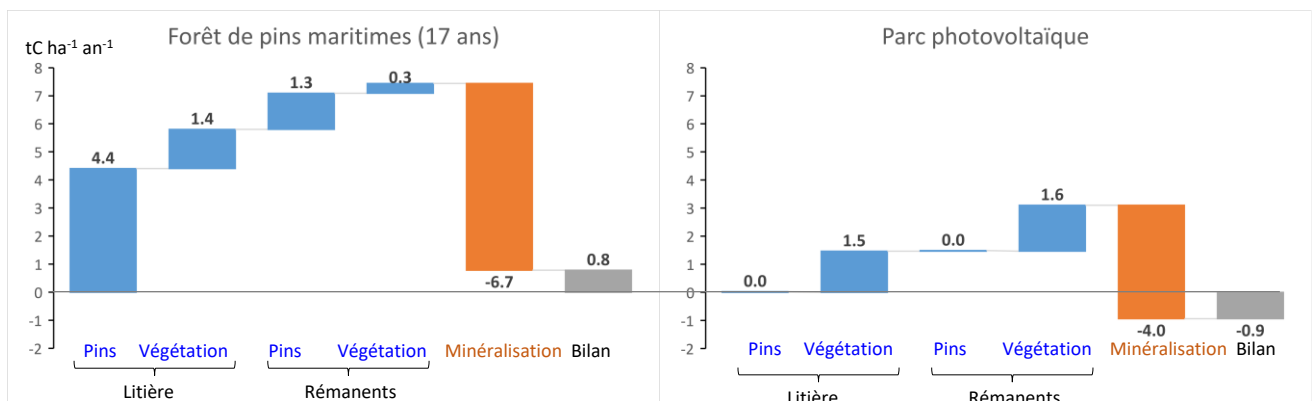


Figure 18. Composantes du bilan de la matière organique du sol sur la période (valeurs moyennes 2020-2100 des flux et du bilan annuel pour un peuplement de pins de 17ans de 2024). Forêt à gauche et parc à droite, scénario RCP45.

- La litière correspond aux apports par les organes caduques (ex feuilles, aiguilles), la rhizodéposition et la mortalité naturelle ;
- 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 ;

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 déforestation 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 forestiers sous pinède. 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 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.

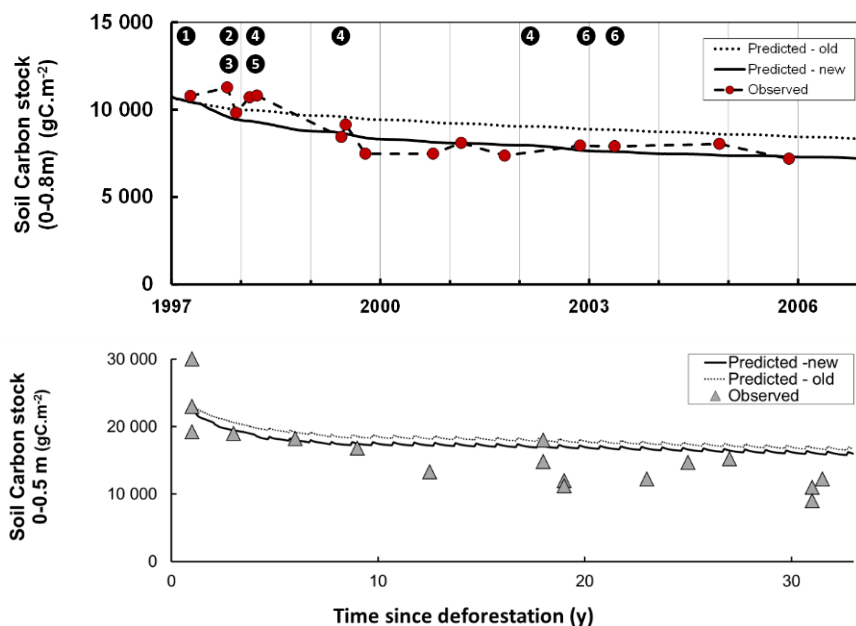


Figure 19. Évolution du stock de carbone du sol minéral après coupe rase et préparation du sol et replantation (graphe supérieur, Jolivet 2000) et après déforestation et mise en culture de maïs (graphe inférieur, Arrouays et Péliissier, 1994). Les symboles sont les données observées, les courbes montrent 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 simulée 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 défrichement 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 productivité 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 intensif.

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 canadien¹². 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.

¹² (<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. L'équivalent en CO₂ est calculé 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 tardive 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, 50 ou 76 ans. Le déficit annuel par hectare est compris entre 0.52 et 2.48 tC ha⁻¹ an⁻¹ pour la biomasse et le sol et entre 1.48 et 3.53 tC 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 non forestières sur des sols appauvris en carbone (friches agricoles) par des peuplements forestiers ayant une productivité moyenne de 12m³ ha⁻¹ an⁻¹, correspondant à une séquestration de carbone atmosphérique estimée à 2.5 – 3.5 ha⁻¹ an⁻¹, serait théoriquement à même de compenser un tel déficit avec un ratio de superficie¹³ compris entre :

- 0.14 (0.50/3.5) pour l'option la plus basse (forêt de référence en sylviculture intensive, amortissement sur 76 ans, reboisement compensateur sur sol productif, climat RCP 4.5), correspondant à un reboisement de 253 ha ;
- 0.98 (2.46/2.5) pour l'option la plus élevée (forêt de référence en sylviculture standard, amortissement sur 30 ans, reboisement compensateur peu productif, climat RCP 8.5) correspondant à un reboisement de 1742 ha.

¹³ Le rapport superficie compensatrice / superficie du périmètre pris en compte (1799 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. Les superficies à prévoir pour une compensation carbone serait donc augmentées d'autant. On remarque que 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 1.5 et 2.5tC ha⁻¹. Il semble réalisable de compenser un tel déficit par un reboisement à croissance rapide sur un sol pauvre en carbone et d'une superficie équivalente au parc.

La compensation du bilan en carbone de la mise en œuvre du projet de parc suppose d'atteindre un équilibre entre les émissions provoquées par l'installation et l'exploitation du parc et la séquestration liée à un boisement compensateur par exemple. Suivant le type de mesures compensatoires adoptées, la durée nécessaire est plus ou moins importante. À titre d'illustration, la figure 20 montre une projection comparée de la dynamique des émissions du projet HORIZEO, et d'options de reboisement de terres agricoles: plantations de pins, taillis de chênes, et mix chênes-pins. Ces reboisements s'effectuant sur terres ou friches non boisées, scénario RCP4.5, sur une superficie totale de 2000 ha. Seules les composantes biomasse et sol sont prises en compte ci. L'évolution du déficit en carbone du projet (aires colorées, diagramme supérieur, fig. 20) est une augmentation progressive entrecoupée d'épisodes de diminution marquée correspondant aux coupes et récoltes forestières des peuplements de référence. La fixation nette de carbone par les boisements en croissance (courbes bleu, noire et rouge, diagramme supérieur) montre une dynamique elle aussi fortement contrôlée par les interventions (éclaircies, coupes). La fixation nette de carbone par le mix chênes-pins (courbe en rouge) atteindrait 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. Dans cet exemple purement illustratif, un taillis de chênes atteindrait quant à lui cet équilibre en 2039, une futaie de pins maritimes en 2053. Ce laps de temps est dû au fait qu'une plantation jeune ne séquestre peu ou pas de carbone et peut même être une source de CO₂¹⁴. Une « dette carbone » (en rouge, diagramme inférieur) 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 montrent que la durée d'amortissement, la superficie et le type de terres consacrés à une compensation doivent donc être prises en compte.

¹⁴ 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)

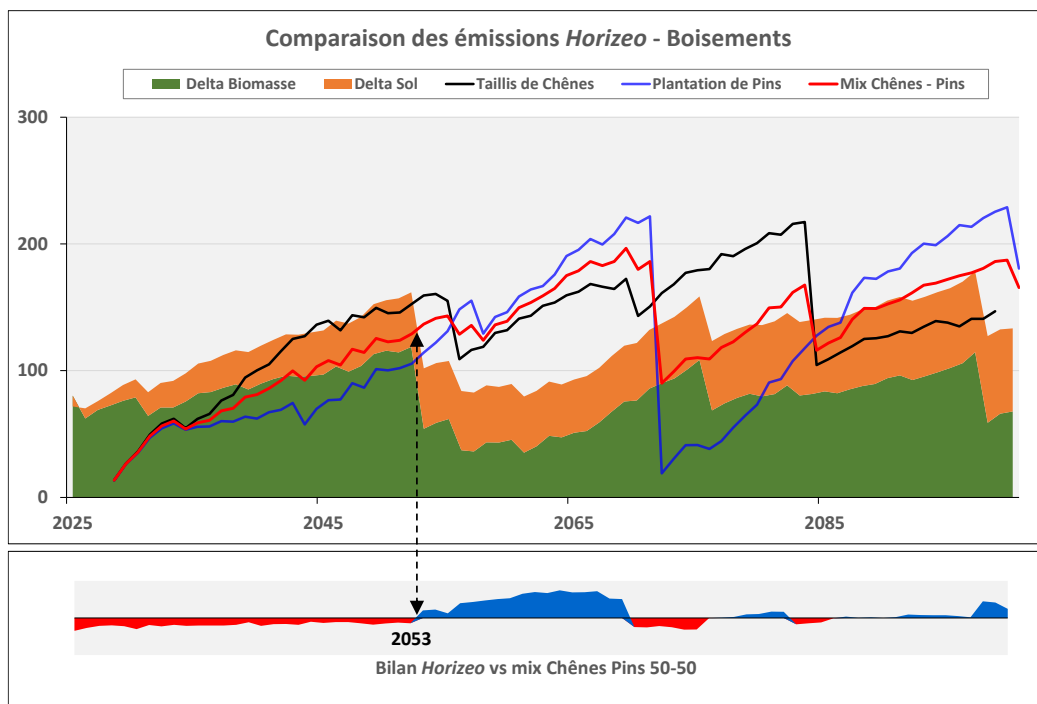


Figure 20. Dynamique des émissions de carbone du projet *Horizeo* (1771 ha) et de plantations de chênes pédonculés et pins maritimes conduits en taillis et en futaie respectivement, en sylviculture standard. Ces projections correspondent à l'option représentée dans le tableau 4c.

- Les aires colorées (diagramme supérieur) sont les pertes en carbone de la biomasse (bleu) et du sol (orange) du projet *Horizeo* (forêts de référence - parc photovoltaïque, périmètre de 1771 ha).
- Les 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 2000 ha.
- Le diagramme inférieur indique l'évolution du bilan global *Horizeo* et du reboisement avec un mix chênes-pins sur 2000 ha.

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-Raguenes, D. Guyon, P. Trichet, F. Delerue, S. Niollet, F. Andreasson, D. L. Achat and M. R. Bakker (2013). "Contribution of understorey 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 Adeh 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., Merkisz, J., Fuć, P., Ziólkowski, 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 Cauria, 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. Hogg 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

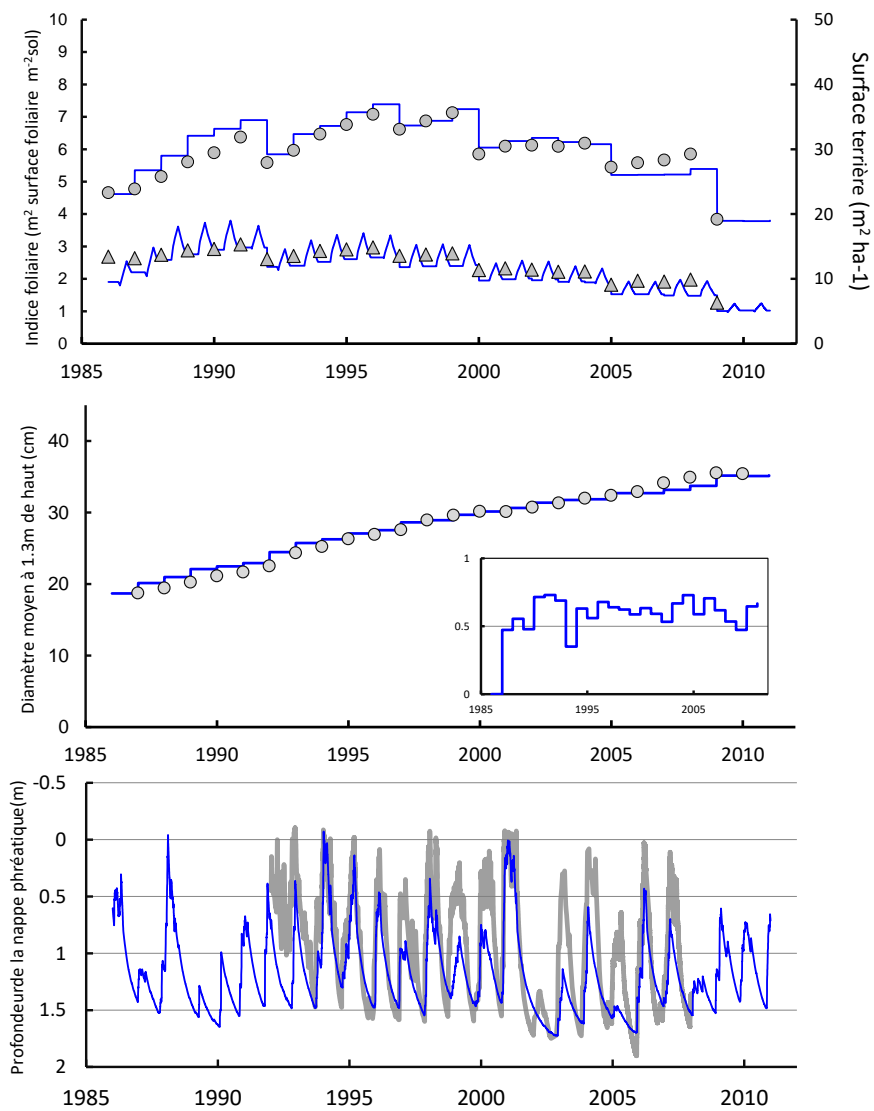


Figure A1. Comparaison de séries temporelles de valeurs prédites par le modèle GO+ v3.1 (courbes bleues) avec les valeurs observées sur le site du Bray de 1987 à 2010 (symboles et courbe en gris). L'insert est l'indice de stress hydrique calculé par le modèle.

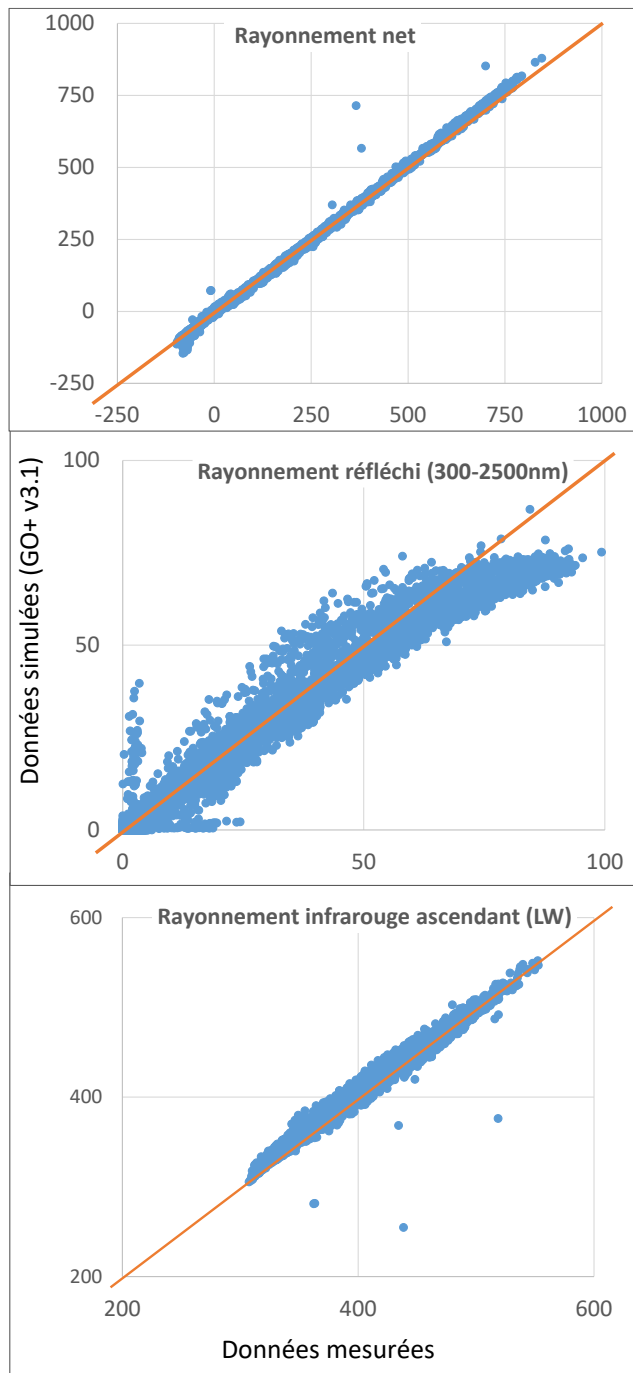


Figure A2. Evaluation des simulations de composantes du bilan radiatif du modèle GO+ v3.1 avec des données observées mesurées en juillet 2020 sur la station ICOS de Salles (Fr-Bil). Les données sont des valeurs moyennes demi horaires en $W m^{-2}$. Les mesures ont été effectuées à 16m au-dessus d'un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

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

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

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 ($> 3000\text{nm}$) emissivity
Clump_f or Clump_w	Clumping factor of the foliage the stems+branches

New variables added:

k_b or k_w	$= K(\theta)$, beam shortwave extinction coefficient for foliage = average projection of foliage elements on to an horizontal surface
k_{dprime} or k_{dprime_w}	extinction coefficient for diffuse shortwave (300-2500nm)
k_{bprime} or k_{bprime_w}	extinction coefficient for direct shortwave (300-2500nm)
ρ_{cb} or ρ_{cb_w}	reflection coefficient for direct shortwave (300-2500nm)
ρ_{cd} or ρ_{cd_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) m ³ ha ⁻¹ y ⁻¹
PROD_VOLTOT	mdlTreeStand (calculated in mdlMngt_Operations)	Annual production of stem + branches m ³ ha ⁻¹ y ⁻¹
Stem_VOL	mdlTreeStand	Standing stem volume (above 7cm diameter for only Douglas fir) m ³ ha ⁻¹
Stem_VOL_pt	mdlTreeStand (calculated in mdlMngt_Operations)	Same after thinning m ³ ha ⁻¹
Tree_VOL	mdlTreeStand	Standing Stem + branches volume m ³ ha ⁻¹
Tree_VOL_pt	mdlTreeStand (calculated in mdlMngt_Operations)	Same after thinning m ³ ha ⁻¹
Cut_VOL	mdlMngt_Operations	Stem volume cut that may be harvested or left on site m ³ 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 m ² 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 ⁻²)	Classe	Parc PV	Forêt	Agriculture	datacenter	Electrolyseur	piste	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 pédonculé	12	taillis	-	12		0.0					
Chêne pédonculé	12	taillis	250	13		4.6					
Chêne pédonculé	45	taillis	250	14		1.2					
				Total	0.0	1771.0					
				Grand total							1771.0

APRES

Classe	Parc PV	Forêt	Agriculture	datacenter	Electrolyseur	piste	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

Annexe 5.

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

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

Année 2: Double débroussaillage juste avant le labour/plantation. Plantation à 1250 tiges / ha. Les plants utilisés ont 2ans.

Année 5 (âge des pins : 5 ans) : 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 621tiges / 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.