



**HAL**  
open science

# Simulation de la dynamique spatiale et temporelle du rayonnement transmis par une strate arborée d'une parcelle agroforestière. Confort thermique des ruminants en sylvopastoralisme

Chelton Desarmes, Marc Saudreau, Raphaël Manlay

## ► To cite this version:

Chelton Desarmes, Marc Saudreau, Raphaël Manlay. Simulation de la dynamique spatiale et temporelle du rayonnement transmis par une strate arborée d'une parcelle agroforestière. Confort thermique des ruminants en sylvopastoralisme. *Biologie végétale*. 2022. hal-03619672

**HAL Id: hal-03619672**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03619672v1>**

Submitted on 25 Mar 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.

## **Mémoire de stage**

présenté par

Chelton DESARMES

pour obtenir le diplôme de Master

Sciences et technologies de l'agriculture, de l'alimentation et de  
l'environnement (ST2AE)

Parcours : Gestion environnementale des écosystèmes et forêts  
tropicales (GEEFT)

**Sujet :**

**Simulation de la dynamique spatiale et temporelle du  
rayonnement transmis par une strate arborée d'une  
parcelle agroforestière**

**Confort thermique des ruminants en sylvopastoralisme**

Soutenu publiquement le 7 Janvier 2022

à AgroParisTech,  
Centre de Montpellier

devant le jury suivant :

Dr. Rémi VEZY

Examineur externe, Cirad

Dr. Marc SAUDREAU

Tuteur de stage, Inrae

Dr. Raphaël MANLAY

Enseignant-référent, AgroParisTech

---

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon tuteur de stage, Marc Saudreau, qui a accepté de m'accueillir dans son équipe de recherche Micro environnement et arbres (MEA) au sein du laboratoire de Physique et physiologie intégratives de l'arbre en environnement fluctuant (PIAF). Egalement, pour son encadrement du début jusqu'à la fin du stage, sa patience, ses conseils, ses remarques constructives et sa grande disponibilité.

Je remercie André Marquier et Pascal Walser qui gèrent les données du dispositif expérimental, qui les ont mis à ma disposition et qui m'ont fourni les explications nécessaires à leur utilisation.

Merci à Philippe Balandier, chercheur de l'UMR PIAF, pour ses conseils et ses partages de références bibliographiques.

Je remercie Raphaël Manlay, mon tuteur à AgroParisTech, pour sa disponibilité, ses conseils et l'organisation de la soutenance de ce mémoire.

Merci aux chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'UMR Herbivore et de l'UE Herbipole qui travaillent sur d'autres aspects du projet de recherche et avec qui j'ai souvent échangé sur l'analyse des données car ils utiliseront les indicateurs produits par cette étude.

Merci à Dominique Tiziani, documentaliste de l'UMR PIAF, pour son accueil, son aide dans la recherche bibliographique et les démarches administratives liées à ce stage. Merci pour votre bonne humeur de tous les jours !

Merci à tous les chercheurs, techniciens, doctorants et stagiaires de l'UMR PIAF, avec qui j'ai partagé mes journées au laboratoire et qui ont rendu le stage plus épanouissant.

Enfin à tous ceux que je n'ai pas cités mais qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce stage, mes plus sincères remerciements !

## RESUME

La gestion du microclimat et de l'ombrage générés par les arbres d'une parcelle agroforestière est un potentiel moyen d'adaptation des systèmes d'élevage ovins au stress thermique provoqué par des hausses de température. Cette étude vise à étudier la transmission du rayonnement incident à travers le couvert arboré et à caractériser la dynamique spatio-temporelle de l'ombrage généré. Pour ce faire, une approche par simulation via l'utilisation du modèle Heterofor hébergé sur la plateforme Capsis a été choisie. La performance du modèle a été évaluée sur deux parcelles agroforestières dont l'une avec des arbres intra-parcellaires (merisiers et érables sycomores) et des arbres de bordure, et l'autre avec des frênes en bordure en forme de haie haute. Le modèle fait des estimations satisfaisantes du rayonnement transmis (NSE: 0.75 à 0.83 et biais: -2 à 6%). Les imprécisions identifiées viennent à la fois du modèle et des données. A partir des simulations, des indicateurs d'ombrage (surface ou durée) horaires ou moyennés, ont été calculés et spatialisés sous forme de cartographies géoréférencées. La sensibilité de ces indicateurs à la configuration des arbres, la pente et l'exposition a ensuite été investiguée. Les indices de charge thermique (HLI), calculés à partir du rayonnement transmis, montrent que les arbres ont un effet tampon localisé sur l'ambiance thermique des parcelles.

## ABSTRACT

Management of the microclimate and shading generated by trees in an agroforestry plot is a potential means of adapting sheep farming systems to thermal stress caused by temperature increases. This study aims to investigate the transmission of incident radiation through the tree canopy and to characterize the spatio-temporal dynamics of the generated shading. To do so, a simulation approach using the Heterofor model hosted on the Capsis platform was chosen. The performance of the model was evaluated on two agroforestry plots, one with intra-plot trees (cherry and sycamore) and border trees, and the other with ash trees in a high hedge. The model makes satisfactory estimates of transmitted radiation (NSE: 0.75 to 0.83 and bias: -2 to 6%). The inaccuracies identified come from both the model and the data. From the simulations, hourly or averaged shading indicators (area or duration) were calculated and spatialized in the form of georeferenced maps. The sensitivity of these indicators to tree configuration, slope and exposure was then investigated. The heat load index (HLI), calculated from the transmitted radiation, show that the trees have a localized buffering effect on the thermal environment of the plots.

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	1
RESUME .....	2
ABSTRACT.....	2
TABLE DES MATIÈRES.....	3
1. INTRODUCTION .....	6
1.1. Contexte .....	6
1.2. Problématique et objectif .....	9
2. MATERIEL ET METHODES .....	10
2.1. Site d'étude .....	10
2.1.1. Les parcelles expérimentales .....	10
2.1.2. Equipement de mesures sur les parcelles .....	11
2.2. Acquisition des données .....	12
2.2.1. Capteurs pour les brebis .....	12
2.2.2. Capteurs d'ambiance sur les parcelles .....	12
2.2.3. Autres données collectées sur les parcelles et les arbres.....	13
2.3. Analyse des données .....	14
2.3.1. Modèle et approche .....	14
2.3.1.1 Initialisation d'Heterofor .....	15
2.3.1.2 Calcul du transfert de lumière .....	16
2.3.2. Géoréférencement des données et des indicateurs spatiaux.....	17
2.3.3. Evaluation de la performance du modèle .....	18
2.3.4. Indicateurs de rayonnement et de stress thermique .....	19
2.3.4.1 Cartographie spatio-temporelle de l'ombrage .....	19
2.3.4.2 Pourcentage de surface à l'ombre par heure.....	19
2.3.4.3 Cartographie de la durée d'ombrage .....	20
2.3.4.4 Cartographie du rayonnement transmis .....	20
2.3.4.5 Indices de stress thermique « Heat load index ».....	20
2.3.5. Analyse des indicateurs .....	21
2.3.6. Parcelle A+ et AH .....	22
2.3.7. Evaluation du temps à l'ombre des brebis .....	22

3. RESULTATS.....	24
3.1. Evaluation de la performance du modèle Heterofof	24
3.2. Analyse des indicateurs de rayonnement transmis	26
3.2.1. Effets de l'orientation des rangées d'arbres (nord-sud et est-ouest) pour une pente et une exposition donnée .....	26
3.2.2. Effets combinés de la pente et de l'exposition .....	27
3.2.2.1 Effets de la pente pour une exposition constante .....	28
3.2.2.2 Effets de l'exposition pour une pente constante .....	29
3.3. Evaluation des indicateurs de R. transmis sur les parcelles A+ et AH	30
3.3.1. Parcelle A+ .....	30
3.3.2. Parcelle AH .....	34
3.4. Temps passé à l'ombre par les brebis sur les parcelles	36
4. DISCUSSION .....	38
4.1. Performance du modèle et sources d'imprécisions	38
4.1.1. Echelle temporelle (mesures vs simulations) .....	38
4.1.2. La modélisation des houppiers.....	38
4.1.3. La porosité, la LAD, k et $\Omega$ .....	38
4.1.4. Eléments de l'environnement non pris en compte.....	39
4.1.4.1 Le vent .....	39
4.1.4.2 Les variations de pente et d'exposition et les montagnes environnantes .....	39
4.1.5. Les mesures dendrométriques .....	40
4.2. Les indicateurs de rayonnement transmis et de stress thermique	40
4.2.1. La définition de l'ombrage .....	40
4.2.2. Le rayonnement transmis.....	41
4.2.3. Indices de stress thermique .....	41
4.3. Couplage des indicateurs a d'autres données spatialisées sur les parcelles	42
4.4. Evaluation des indicateurs	42
4.4.1. Orientation des rangées d'arbres .....	42
4.4.2. Pente et exposition.....	43
5. CONCLUSION .....	44
6. REFERENCES .....	45
7. LISTE DES ABREVIATIONS.....	51

8. TABLE DES TABLEAUX .....	53
9. TABLE DES FIGURES .....	53
10. ANNEXES .....	54
TABLE DES ANNEXES .....	54
Annexe 1 : Mesures sur les arbres de la parcelle A+ (bordure incluse)	55
Annexe 2: Mesures sur les arbres de la parcelle AH (bordure incluse)	56
Annexe 3: LAD et porosité des espèces	56
Annexe 4 : Interface de modélisation et simulation sur Heterofor	57
Annexe 5 : Géoréférencement de la parcelle et des indicateurs spatialisés	58
Annexe 6 : Données météo du 17 juillet 2019 sur le site expérimental à Theix	60
Annexe 7: Effets combinés de la pente et de l'exposition sur le transmis	61
Annexe 8 : Effet de l'exposition pour une pente constante	62
Annexe 9: Données météo du 20 juillet 2021 sur le site expérimental à Theix	63

# 1. INTRODUCTION

## 1.1. CONTEXTE

Le réchauffement climatique, défini comme « une augmentation de la température moyenne à la surface de la planète » fait référence au changement de la température de la surface de la planète sur une période de 30 ans par rapport à une base de référence (IPCC, 2018). Selon le sixième rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2021), la température à la surface du globe continuera d'augmenter au moins jusqu'au milieu du siècle dans tous les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) envisagés (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5). Sans politique climatique, le réchauffement planétaire de 1,5°C et 2°C sera dépassé au cours du 21e siècle et peut atteindre jusqu'à 5°C à l'horizon de 2100 (Figure 1).

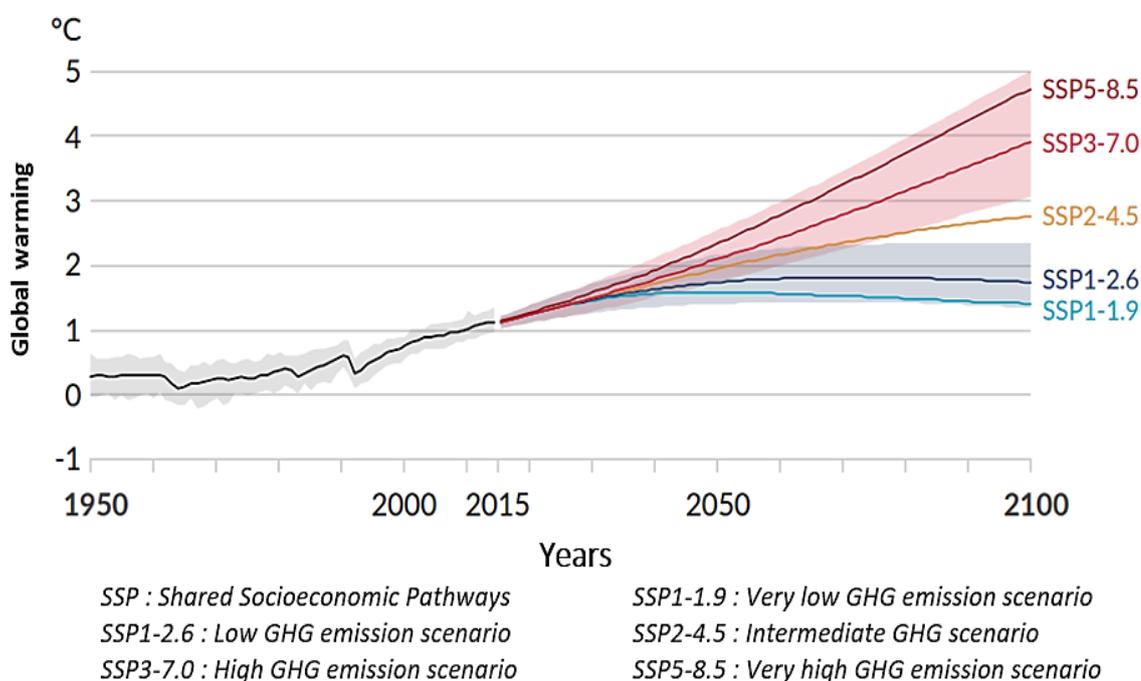


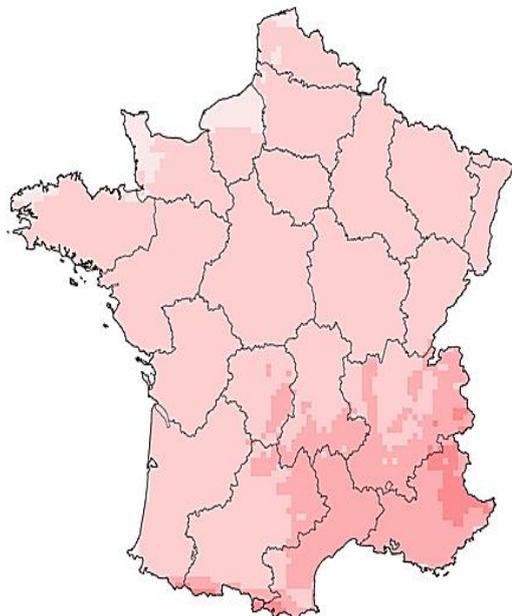
Figure 1 : Evolution de la température de la planète par rapport à 1850-1900 (IPCC, 2021)

Cette tendance de réchauffement à long terme, induite par l'homme, connaîtra des variations au niveau régional ou local en dessous ou au-dessus des seuils de changement à long terme qui sont les moyennes de température globale à différent horizon. Ceci à cause de la grande variabilité naturelle de l'environnement sur la planète (IPCC, 2021).

En France métropolitaine, les projections réalisées au niveau national (figure 2) prévoient dans un futur proche (2021-2050) une augmentation des températures moyennes de 0,6 à 1,3 °C (plus forte en été dans le Sud-Est), une augmentation du nombre de jours de canicule en été, notamment dans les régions du Sud-Est, et une diminution du nombre de jours anormalement froids en hiver, notamment dans les régions du Nord-Est. D'ici 2100, l'augmentation des températures pourrait atteindre 2,6 à 5,3 °C en été selon le scénario de croissance continue des émissions. Au niveau de la région Auvergne-Rhône-

Alpes où se situe le dispositif expérimental de cette étude, la température estivale pourrait subir une augmentation allant de 1 à 1.5 °C dans un horizon proche (2035) et de 3 à 4.5 °C dans un horizon lointain (2085) (DRIAS, 2021 ; Météo-France, 2021).

**Horizon proche (autour de 2035) –  
Moyenne estivale**



**Horizon lointain (autour de 2085) –  
Moyenne estivale**

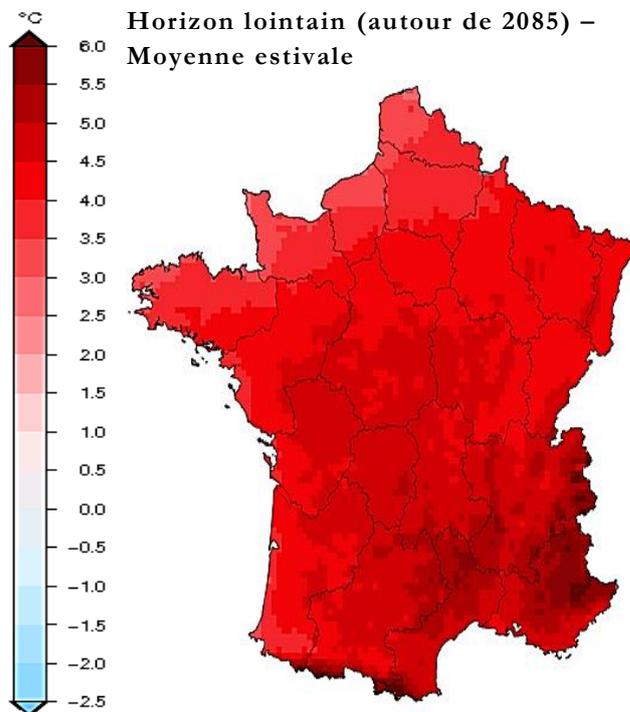


Figure 2 : Ecart de température moyenne (°C) en France par rapport à 1976-2005 pour le RCP8.5 : Scénario sans politique climatique

*Produit multi-modèles de DRIAS-2020 : médiane de l'ensemble (DRIAS, 2021)*

En relation directe avec l'augmentation de la température de la planète, de nombreux changements dans le système climatique continueront de s'amplifier. Ils incluent l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des extrêmes de chaleur, des vagues de chaleur marines, de fortes précipitations, des précipitations abondantes. Dans certaines régions, les changements se manifesteront également par des sécheresses agricoles et écologiques, des cyclones tropicaux intenses et la réduction de la glace de mer, de la couverture neigeuse et du pergélisol dans l'Arctique (IPCC, 2021). Le réchauffement planétaire affectera tous les systèmes terrestres y compris les systèmes naturels et ceux de production humaine, notamment les systèmes d'élevages (IPCC, 2019).

Ce réchauffement climatique constitue une menace pour la production animale en raison de son impact sur la qualité des cultures fourragères, la disponibilité de l'eau, les maladies du bétail, la reproduction animale, la biodiversité et le bien-être général des animaux (Das *et al.*, 2016 ; Rojas-Downing *et al.*, 2017 ; Becker *et al.*, 2020). Car, même étant dotés de capacités de thermorégulation, les ruminants ne peuvent pas maintenir une stricte homéothermie en conditions de stress thermique. Le niveau de stress thermique (heat stress) étant défini comme la somme des forces externes à l'animal telles : la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire qui agissent pour augmenter sa température corporelle à un niveau qui évoque une réponse physiologique (Dikmen et Hansen, 2009). Il se traduit par une baisse de consommation en fourrage, une

baisse de la production et de la qualité du lait (Silanikove, 2000 ; Finocchiaro *et al.*, 2005 ; Pragna *et al.*, 2017). En se référant aux projections climatiques du GIEC, le secteur de l'élevage des ruminants doit développer des solutions à la fois pour réduire sa contribution au réchauffement climatique et pour faire face aux changements en cours et à venir.

Dans l'élevage ovin en France, l'agroforesterie a été explorée par le projet Parasol (2015-2018) en tant que potentiel moyen d'adaptation au changement climatique. Ce projet avait pour objectif la caractérisation des bénéfices de l'arbre pour les herbivores au pâturage en matière de bien-être animal, de production animale et de production prairiale (Béral *et al.*, 2018). En effet, les arbres agroforestiers peuvent améliorer les caractéristiques climatologiques extrêmes en réduisant la vitesse du vent et l'évapotranspiration, et en atténuant les températures extrêmes créant ainsi un microclimat localisé sur la parcelle (Benavides *et al.*, 2008). Les études du projet Parasol ont montré qu'en période caniculaire la différence de températures entre une parcelle agroforestière et une parcelle sans arbres peut varier de 3 à 6° C aux heures les plus chaudes de la journée (Béral *et al.*, 2018).

Pour faire suite au projet Parasol, un nouveau projet sur les agroécosystèmes dans le cadre du projet structurant I-Site/Clermont Auvergne Project (CAP) 2020-2025 a été mis en place en 2020. Le challenge 1 de ce projet a pour but ultime d'optimiser l'intégration des systèmes agricoles dans leur environnement et leur territoire. Cela consiste à augmenter leur résilience et leur durabilité, tout en prenant en compte leurs performances en termes de production, de protection de l'environnement et les attentes de la société en termes de qualité de produits et de bien-être animal (Benquet, 2020). En effet, le projet s'intéresse à l'étude des systèmes agroforestiers d'élevage ovin pour répondre à des enjeux de (Saudreau *et al.*, 2021) :

- Valorisation de ressources fourragères locales, non concurrentes avec l'alimentation humaine ;
- Adoption de pratiques agroécologiques dans l'élevage ovin pour contribuer à la transition agroécologique ;
- Adaptation au réchauffement climatique (forte chaleur, sécheresse, irrégularités des pluies) ;
- Performance de production animale (quantité et qualité), de production herbagère des prairies et de bien-être animal ;
- Règlementation (Directive 98/58/CE) qui exige un abri pour les animaux conduits à l'extérieur (Molterer, 1998)

Dans ce contexte, le projet mène une action de recherche sur les systèmes agroforestiers et notamment sur l'impact des arbres sur la prairie et le rôle de l'ombrage généré pour la protection des ruminants en cas de forte chaleur. Il s'agit de caractériser l'ombrage généré par les arbres, de comprendre les motivations de l'animal quant à l'utilisation des arbres et de quantifier cette utilisation afin d'établir des règles de décisions techniques en fonction des conditions et des paramètres environnementaux. Cette action est divisée en plusieurs volets de recherche et cette étude qui porte sur l'un des volets a donc été réalisée pour analyser les données collectées sur le site expérimental du projet en vue de caractériser et de faire un bilan radiatif sur les parcelles.

## 1.2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF

Pour pouvoir étudier l'impact des arbres sur la prairie, le comportement et le bien-être des animaux au pâturage, il faut d'abord réussir à caractériser le mécanisme de transfert de radiation, source de lumière et de chaleur, à travers la canopée des arbres et en faire un bilan. Cette caractérisation doit permettre de développer des indicateurs de suivi de l'évolution temporelle (au moins horaire) et spatiale du rayonnement qui parvient au sol de la parcelle en traversant les houppiers de arbres (rayonnement transmis). Or, même avec un grand nombre de mesures, il est difficile de réaliser une estimation exhaustive du rayonnement au sol d'une parcelle dans l'espace et dans le temps (Leroy, 2005). Alors, quelle approche faut-il adopter pour étudier de manière exhaustive, la dynamique spatiale et temporelle du rayonnement transmis à travers le couvert arboré d'une parcelle agroforestière ?

Le projet a opté pour la simulation à partir d'un modèle de transfert radiatif sous couvert arboré. De cette problématique, découle deux grandes interrogations à savoir :

- Le modèle est-il performant dans le contexte agroforestier ?
- Quels indicateurs pertinents pour l'étude de l'impact des arbres sur la prairie et les animaux sera-t-il possible de développer à partir des simulations du modèle ?

Ces interrogations constituent les deux objectifs principaux de ce travail :

Objectif 1 : Evaluer la performance du modèle à estimer le transfert radiatif dans un contexte agroforestier.

Objectif 2 : Calculer des indicateurs temporels et spatialisés d'ombrage pertinents pour l'étude de l'impact des arbres sur la prairie et les animaux.

## 2. MATERIEL ET METHODES

### 2.1. SITE D'ETUDE

Le site d'étude est situé à Theix sur la commune de Saint Genès Champanelle (63122) à environ 835 m d'altitude (coordonnées 45°43'4.88"N et 3° 1'21.57"E). Il a été déjà utilisé dans le cadre du projet Parasol pour mener les études sur les systèmes agroforestiers (Béral *et al.*, 2018). Il est constitué de trois parcelles (A+, A0, AH) qui offrent trois conditions de couverture arborée pour étudier l'impact de l'ombrage des arbres sur l'ambiance dans la parcelle, sur la prairie et le comportement des brebis qui y pâturent (Figure 3).



Figure 3 : Dispositif expérimental à Theix : parcelle A+ (arbres intra-parcellaires) ; parcelle A0 (un arbre) ; parcelle AH (arbres en haie haute)

#### 2.1.1. LES PARCELLES EXPERIMENTALES

- **Parcelle A+** : Elle a été plantée en 1989 d'érables sycomore (*Acer pseudoplatanus* L.) et de merisiers (*Prunus avium* L.) à une densité de 100 tiges à l'hectare. En 2018, elle a été réduite à 60 tiges/ha dont 2/3 sont des merisiers. Elle est limitée sur son côté ouest par une rangée d'arbres en forme de haie haute. L'ensemble est constitué de 7 espèces (Tableau 1).
- **Parcelle A0** : Elle contient un arbre isolé. Il s'agit d'un frêne (*Fraxinus excelsior* L.) âgé d'environ 50 ans en 2018. L'arbre a été gardé pour obéir aux réglementations du code rural (artR214-18) sur l'élevage à l'extérieur recommandant d'avoir un abri pour le bien-être de l'animal (Béral *et al.*, 2018). Il y a également des arbres sur les bordures.

- **Parcelle AH** : Il n'y a pas d'arbre sur cette parcelle et elle est limitée sur sa bordure ouest par une double rangée de frênes (*Fraxinus excelsior* L.) en forme d'une haie haute et de quelques arbres sur la bordure sud.

Tableau 1 : Espèces d'arbres présentes sur et en bordure des parcelles

Parcelle	Noms vernaculaires	Noms scientifiques (INPN, 2021)
A+	Merisier	<i>Prunus avium</i> (L.) L.
A+, AH	Erable sycomore	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.
A+, AH bordure	Frêne	<i>Fraxinus excelsior</i> L.
A+ bordure	Noisetier	<i>Corylus avellana</i> L.
A+ bordure	Saule	<i>Salix caprea</i> L.
A+ bordure	Chêne	<i>Quercus sessiliflora</i> (M.) L.
A+ bordure	Châtaigner	<i>Castanea sativa</i> M.

### 2.1.2. EQUIPEMENT DE MESURES SUR LES PARCELLES

Des appareils de mesures (capteurs) ont été installés sur les parcelles pour collecter des données sur l'ambiance météorologique mais également sur la position et l'activité des brebis sur les parcelles (Figure 4). Les équipements ont été installés progressivement entre 2018 et 2021. Ajouté à des données d'inventaire sur la prairie et sur les arbres, l'ensemble des données produites par les capteurs permettent de constituer la base de données du projet I-Site/Livrable 6 sur les agroécosystèmes.

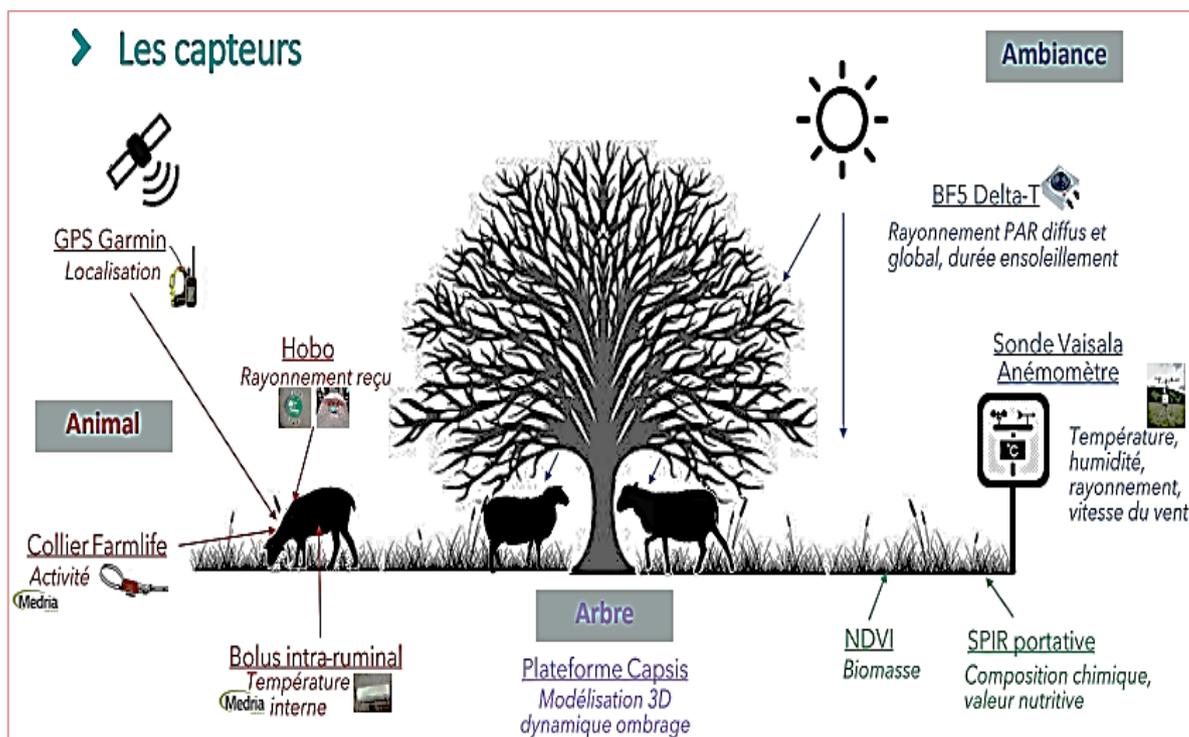


Figure 4 : Equipements de mesure sur le dispositif expérimental à Theix

(Saudreau *et al.*, 2021)

## 2.2. ACQUISITION DES DONNEES

### 2.2.1. CAPTEURS POUR LES BREBIS

Le projet de recherche mobilise 36 brebis de race Romane réparties en lots homogènes sur les parcelles. Les lots sont constitués selon la note d'état corporel (NEC), le poids et l'âge des brebis. La NEC étant une notation standardisée entre 0 et 5 de l'état d'embonpoint des animaux par évaluation visuelle de la couverture de muscles et de graisses à différents points du corps (Laurence et Pottier, 2011). Les brebis sélectionnées pour l'expérimentation sont équipées des capteurs suivants :

- **Colliers Axel de la société Médria** : placés au cou de chaque animal, ils servent à suivre les activités de l'animal: ingestion, rumination, repos, temps debout/couché (Medria, 2021) ;
- **Hobo MX2202** : placé sur le dos de l'animal, il permet de mesurer le rayonnement solaire reçu par l'animal. Le Hobo mesure des rayonnements de 0 à 167 731 lux avec une précision de  $\pm 10\%$  en rayonnement global (diffus et direct) ;
- **Bolus** : ThermoBolus fait partie du service San'Phone® de Médria pour prévenir les problèmes de santé chez les animaux. Placé dans le rumen, il mesure la température interne de la brebis toutes les 5 minutes avec une précision de  $\pm 0,1$  °C. Il peut fonctionner plus de 8 ans en autonomie mais est porté à vie par l'animal (Medria, 2021) ;
- **GPS** : un récepteur placé au cou de chaque animal, il permet de relever la position fixe toutes les 30 secondes et de suivre le déplacement de l'animal. Sa précision peut varier de 0 à 3 mètres.

### 2.2.2. CAPTEURS D'AMBIANCE SUR LES PARCELLES

Sur les trois parcelles sont installées quatre stations météo dont deux sur la parcelle A+ et une sur chacune des deux autres (Figure 5). Chaque station est constituée de :

- Un trépied CM110 ;
- Une centrale d'acquisition de mesure CR1000 alimentée par un panneau solaire de 12V ;
- Un **pyranomètre LI-COR LI-200R** qui mesure le rayonnement solaire global (direct et diffus) dans la gamme 400 à 1100 nm ( $W/m^2$ ) ;
- Un capteur quantique **LI-190R** pour mesurer le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) dans la gamme 400 à 700 nm ( $\mu mol/m^2/s$ ) ;
- Une **sonde Vaisala HMP155** qui mesure la température (°C) et l'humidité relative de l'air (%) ;

La station météorologique installée sur la parcelle A0 est équipée des capteurs supplémentaires suivant :

- Un capteur de rayonnement **BF5 Delta-T** pour la mesure du PAR direct et diffus ( $\mu mol/m^2/s$ ) ainsi que la durée d'ensoleillement ;
- Un capteur **LWS Decagon** pour mesurer la durée d'humectation de la végétation à 50 cm du sol ;

- Un **anémomètre Young** qui mesure la vitesse (m/s) et la direction du vent.



Figure 5 : Station météo sur la parcelle A+

### 2.2.3. AUTRES DONNEES COLLECTEES SUR LES PARCELLES ET LES ARBRES

- **Parcelle** : Délimitation, pente moyenne, orientation de la pente en regardant vers le bas ;
- **Arbres** : position (x, y), circonférence à 1.3 m (gbh), rayon du houppier dans les quatre directions géographiques (rnorth, rsouth, reast, rwest), hauteur totale de l'arbre (htot), hauteur où le diamètre du houppier est maximal (hlce), hauteur du tronc jusqu'à la base du houppier (hcb) (annexe 1 et 2), porosité des espèces à l'aide de photo-hémisphériques (annexe 3).

Cette étude mobilise essentiellement les données sur les quatre éléments suivant :

- **Les parcelles** : Leur position géographique et leur caractéristiques morphométriques : limite, pente, orientation de pente ;
- **Les arbres** : Toutes les données précitées pour les arbres à l'intérieur mais également les arbres de bordure ;
- **Ambiance** : Rayonnement incident, Photosynthetically active radiation (PAR), température ambiante, humidité relative, vitesse du vent ;
- **Brebis** : Position géographique toutes les 30 secondes sur la journée sur les parcelles.

## 2.3. ANALYSE DES DONNEES

Les données tirées de la base de données du dispositif expérimental ont été traitées et formatées en fichiers lisibles par le modèle (annexe 1 et 10). Elles sont ensuite importées dans le modèle qui effectue la modélisation de la parcelle et la simulation de l'interception lumineuse. Les résultats de simulations sont enfin post-traités sur R studio pour calculer les indicateurs qui sont présentés sous formes de graphiques et de cartographies (figure 6).

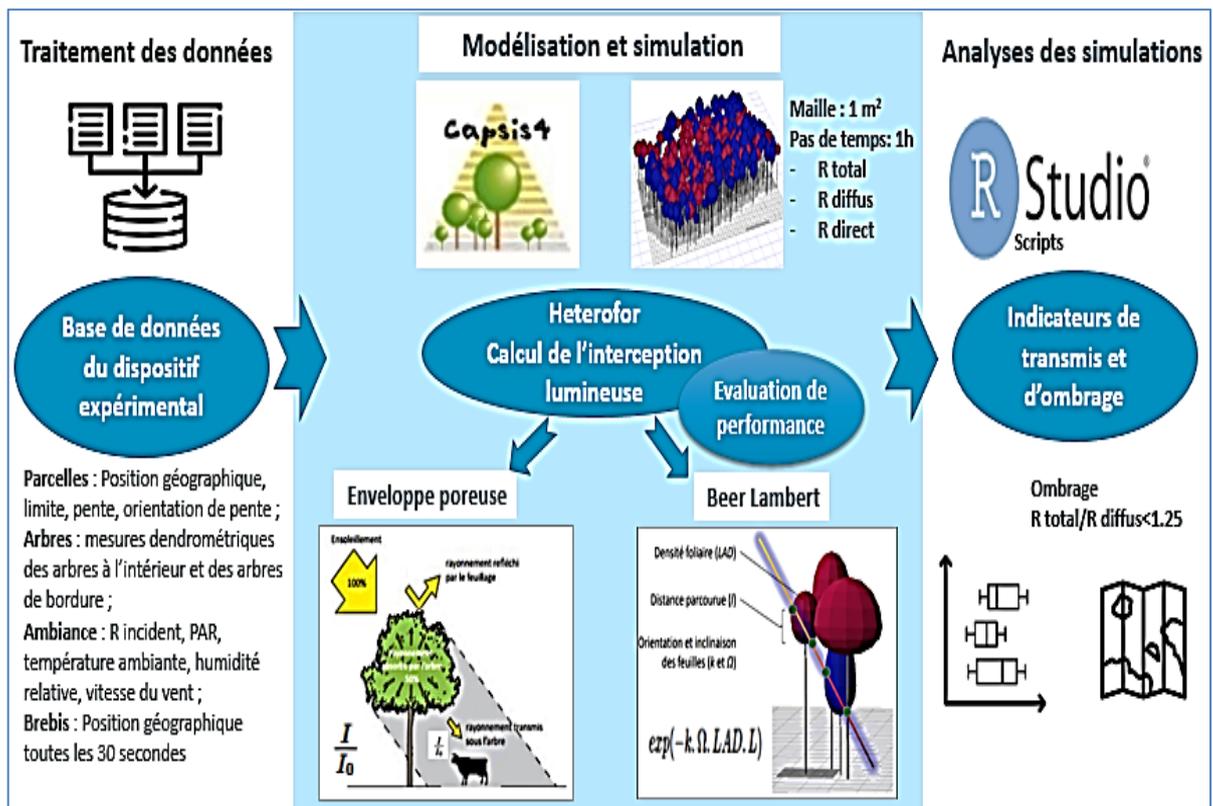


Figure 6 : Illustration de la procédure de traitement et d'analyse des données

### 2.3.1. MODELE ET APPROCHE

Pour simuler le rayonnement transmis sur les parcelles A+ et AH les données sont analysées à l'aide du modèle Heterofor (HETEROgeneous FORest, version 1.0) implémenté sur le logiciel « Computer-Aided Projection of Strategies In Silviculture (CAPSIS, version 4.2.6) » développé en 1999 par le laboratoire AMAP au CIRAD à Montpellier (Coligny, 2021). Ce logiciel ouvert est dédié à la sylviculture et il permet d'implanter tous types de modèles de croissance (MAID : arbres indépendants des distances, MADD : arbres dépendants des distances) avec ou sans spatialisation pour tous types de peuplement (mixte, homogène, régulier ou irrégulier). La plateforme est en construction permanente et les modèles développés sont de plus en plus variés. Les modèles prennent en compte les principaux processus (croissance, compétition, mortalité et régénération/recrutement), les différents niveaux d'organisation spatiale (arbres en peuplement, mosaïque de collectifs d'arbres ou de peuplement-types) et les principales interventions sylvicoles (Dufour-Kowalski *et al.*, 2012).

Heterofor est un modèle développé par M. Jonard et al (Jonard *et al.*, 2020) qui permet de simuler la croissance des arbres individuels en prenant en compte les interactions pour le partage de la lumière, de l'eau et des nutriments et les effets des changements globaux sur des peuplements hétérogènes. Il a été élaboré progressivement sur Capsis en intégrant plusieurs modules : interception de la lumière, phénologie, cycle de l'eau, photosynthèse et respiration, allocation du carbone, nutrition minérale et cycle des nutriments. Notamment, il intègre la librairie Samsaralight de Capsis qui permet d'évaluer l'interception lumineuse par chaque arbre. Ce modèle offre également la possibilité de placer des capteurs virtuels sous les arbres à partir du fichier d'inventaire et de simuler le rayonnement reçu uniquement par ces capteurs (Jonard *et al.*, 2020 ; de Wergifosse *et al.*, 2020).

Ce modèle développé pour des peuplements forestiers hétérogènes a été choisi pour cette étude pour plusieurs raisons. Premièrement, il permet de simuler l'interception lumineuse par une couverture arborée à pas de temps horaire et calcule le rayonnement transmis au sol au mètre carré ou plus. Ce niveau de précision a été jugé suffisant pour analyser l'impact de l'ombrage sur la prairie et le comportement des brebis. Deuxièmement, son application à une situation agroforestière est possible car il permet de caractériser les arbres de manière individuelle pour différentes espèces et pour différentes tailles tout en tenant compte de la distance entre eux. Troisièmement, pour la composante interception de lumière, le modèle exige très peu de données et qui sont faciles à collecter sur le terrain. Enfin, la composante interception lumineuse du modèle a été déjà évaluée par plusieurs études sur les forêts et les résultats sont très convaincants (Ligot *et al.*, 2014b).

### 2.3.1.1 Initialisation d'Heterofor

Cette étude ne s'intéresse qu'à la simulation du rayonnement transmis et ne mobilise donc que le module interception lumineuse du modèle Heterofor. Ainsi, pour modéliser la parcelle et simuler l'interception lumineuse, il a fallu renseigner cinq fichiers :

- Deux fichiers contenant des paramètres de bases du modèle pour la modélisation des arbres;
- Un fichier d'inventaire : caractéristiques dendrométriques de chaque arbres, position, porosité et la densité foliaire (LAD pour Leaf area density en anglais) par espèce, limite et localisation géographique de la parcelle, pente, exposition ;
- Un fichier de données météorologique où figure le rayonnement incident par heure ;
- Un fichier de caractéristiques de sol (optionnel si on ne s'intéresse pas aux échanges de nutriments comme dans notre cas).

Heterofor utilise ces données pour modéliser les arbres qui sont divisés en trois compartiments (houppier, tronc et racines) et simuler le transfert lumineux au sol (annexe 4). Dans notre cas, seuls les compartiments houppier et tronc sont pris en compte. Parmi les données météorologiques seul le rayonnement incident est utilisé par le modèle pour calculer la partie qui est interceptée par le houppier et le tronc de chaque arbre et la partie qui parvient jusqu'au sol. Le modèle divise la surface de la parcelle en cellule de dimension supérieure ou égale à un mètre carré. Cela donne donc une grille où chaque cellule est identifiée par un identifiant unique (ID) et par les coordonnées de son centre (x, y, z). Z est

l'altitude de la cellule. En sortie, le modèle calcule pour chaque capteur ou pour chaque cellule ( $1\text{m}^2$  dans notre cas) les rayonnements direct, diffus et global (direct + diffus) reçus au sol au pas de temps horaire.

### 2.3.1.2 Calcul du transfert de lumière

L'approche Samsaralight sur laquelle se base Heteroform considère le tronc des arbres comme un milieu opaque ne laissant passer aucun rayon lumineux tandis que le houppier est considéré comme un milieu poreux qui laisse passer une partie du rayonnement incident. Le modèle propose deux méthodes pour évaluer la transmission du rayonnement à travers le houppier des arbres individuels (Courbaud *et al.*, 2012) :

- **Beer Lambert ou Turbid Medium (TM)** : basée sur la loi de Beer Lambert, cette méthode prend en compte la densité foliaire (LAD), l'orientation et l'inclinaison des feuilles ( $k$ ,  $\Omega$ ), la distance parcourue ( $L$ ) par le rayon lumineux dans le houppier (Figure 7). La LAD est la surface foliaire (LAI pour Leaf area index en anglais) unilatérale du houppier divisée par le volume de celui-ci (Gersonde *et al.*, 2004).  $\Omega$  décrit le modèle agrégatif des branches et des feuilles dans la canopée. Cette méthode, un peu difficile à calibrer à cause du manque de données précises sur les paramètres  $k$ ,  $\Omega$  et LAD est considérée comme la plus exacte et est la plus utilisée dans les études sur l'interception lumineuse par une couverture arborée (Ligot *et al.*, 2014b). Ce modèle considère que la LAD est homogène dans le houppier ou dans les compartiments du houppier (supérieur, intermédiaire et inférieur) et est identique pour tous les arbres d'une espèce.

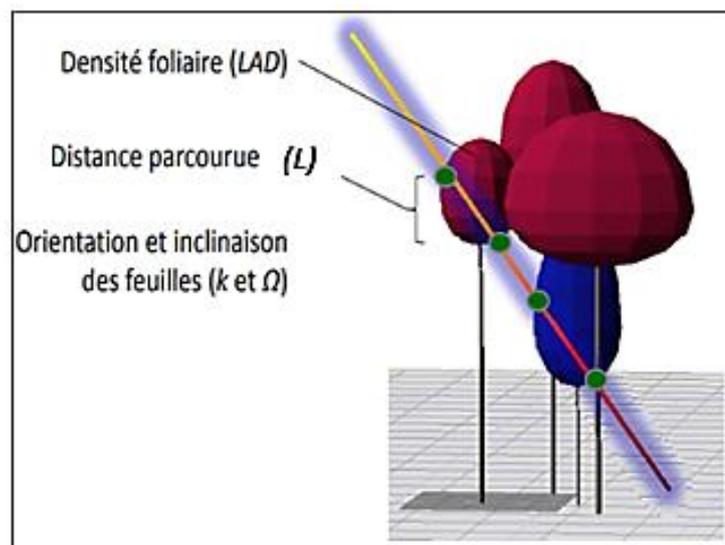


Figure 7 : Interception lumineuse selon l'approche Beer Lambert

- **Enveloppe poreuse** : Alternative à la méthode Beer Lambert, le houppier est considéré comme un milieu poreux homogène en tout point et caractérisé par un coefficient de transmission lumineuse ( $I/I_0$ ). Ce coefficient est défini comme la fraction visible du ciel en dessous de la canopée (Canham *et al.*, 1999). Dans ce modèle, il est considéré identique pour tous les arbres d'une espèce. Cette méthode

ne prend pas en compte la distance parcourue par le rayon lumineux dans le houppier.

La correspondance entre les deux méthodes est traduite par la relation :

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-k \cdot \Omega \cdot LAD \cdot L) \quad \text{eq.1}$$

- **I/I<sub>0</sub>** : Dans notre cas, il est calculé à partir des photos hémisphériques pour les principales espèces sur la parcelle (annexe 3). Pour une espèce, plusieurs mesures sur des individus différents ont été réalisées et la moyenne a été retenue pour l'espèce.
- **k, Ω** : Difficiles à mesurer, il existe très peu de littérature sur ces deux paramètres. Nous utilisons k=0.5 et Ω=1, proposés par les modèles de transfert basés sur l'équation de Beer Lambert (Courbaud *et al.*, 2003 ; Ligot *et al.*, 2014b ; Jonard *et al.*, 2020).
- **LAD** : Les valeurs rapportées de LAD utilisées avec les modèles 3D-TM vont de 0,3 à 6 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> et cette variation est aussi importante même pour des individus d'une même espèce. Cette grande variation rend difficile sa mesure exhaustive sur le terrain. En plus, pour des arbres de grande taille et hétérogènes, mesurer la LAD devient encore plus compliqué. Les auteurs ont généralement recouru à des méthodes d'estimations simplifiées (Ligot *et al.*, 2014b). Pour cette étude, elle est estimée à partir de l'équation (eq.1) ci-dessus pour I/I<sub>0</sub> connue et une L moyen du houppier. Elle est ensuite ajustée à partir des tests qui comparent le R. transmis mesuré et le R. transmis estimé (annexe 3).
- **L** : C'est la distance parcourue par le rayon lumineux dans le houppier. Elle est variable selon l'individu et est calculée par le modèle en fonction de la dimension et de la forme du houppier de chaque arbre.

Les données de sortie Heterofor sont post-traitées sur R studio (version 1.4.1717) à l'aide de scripts élaborés spécifiquement à cet effet. Le post-traitement consiste à réaliser des tests statistiques, à calculer des indicateurs et à réaliser des graphiques et des cartographies pour les indicateurs spatiaux.

### 2.3.2. GEOREFERENCMENT DES DONNEES ET DES INDICATEURS SPATIAUX

Dans le cadre du projet il était important d'être capable de géoréférencer les résultats issus du modèle Heterofor afin de les coupler à d'autres données spatialisées du site d'étude. Or à la base Heterofor n'est pas conçu pour lire des données géo-localisées pour la délimitation de la parcelle ainsi que la position des arbres. De ce fait, les résultats de simulation ne sont pas géoréférencés. Pour pallier cette contrainte, nous avons eu recours aux coordonnées projetées Lambert 93 et testés deux méthodes différentes.

Comme elles sont en mètres, une première méthode consiste à faire lire par Heterofor les distances établies en coordonnées projetées Lambert 93. Pour cela, à partir d'un point de référence connu, les coordonnées Lambert des arbres à l'intérieur et en bordure des parcelles A+ et AH ont été calculées connaissant la distance et l'azimut par rapport au point de référence.

Une deuxième méthode consiste à utiliser des coordonnées non-projetées pour la simulation et à réaliser la projection spatiale en post-traitement des sorties de Heteroform par translation.

Pour comparer les deux méthodes, une parcelle prédéfinie a été simulée avec d'une part des coordonnées en Lambert93 et d'autre part, des coordonnées normales calculées par translation à un repère d'origine (0,0). Les rayonnements directs, diffus et totaux ont été comparés à l'aide de graphiques de régression linéaire. La deuxième méthode a été retenue pour cette étude car la première entraîne certaines irrégularités (annexe 5).

### 2.3.3. ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DU MODELE

Le module interception de lumière a été déjà validé par plusieurs études mais sur situations forestières. Pour cette étude qui porte sur des parcelles agroforestières, il a été jugé important de vérifier son adaptabilité à ce contexte.

L'évaluation des modèles de transfert de lumière consiste généralement en la comparaison du R. transmis mesuré au R. transmis simulé sur un site donné (Ligot *et al.*, 2014b). Pour cette étude, 36 capteurs de PAR (PAR/CBE 80 de chez Solems) ont été placés sur la parcelle A+ à 0.88 mètre du sol pour éviter le contact avec l'herbe et 17 autres sur la parcelle AH à 0.99 mètre du sol. Ces capteurs mesurent le PAR total reçu toutes les 5 minutes pendant une journée. Pour mieux se rendre compte du transfert lumineux par le modèle, le choix s'est porté sur une journée bien ensoleillée de la saison estivale (conditions météo à l'annexe 6). Le PAR mesuré a été moyenné au pas de temps horaire pour correspondre au pas de temps du modèle. Des capteurs virtuels correspondant aux capteurs de PAR ont été placés sur les fichiers inventaires en respectant leur position exacte sur les parcelles réelles (Figure 8). Avec l'option « SensorOnly » du modèle, la même journée a été simulée pour estimer le PAR reçu par ces capteurs.

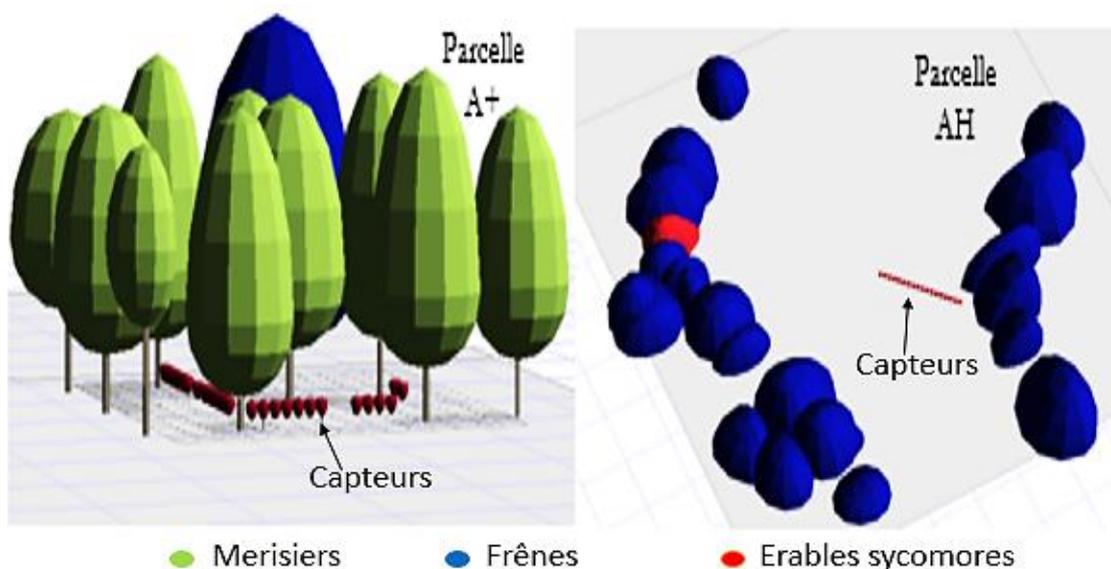


Figure 8 : Visualisation des capteurs sur les parcelles à partir d'une représentation 3D d'une scène issue de Capsis-Heteroform

Pour évaluer la performance des modèles de transfert de lumière les auteurs estiment généralement par régression linéaire entre les données estimées et les données mesurées la précision du modèle définit par le coefficient de détermination ( $R^2$ ) (Ligot *et al.*, 2014b). Dans cette étude, elle a été évaluée à partir du critère « Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) ». Cet indicateur de performance est construit à partir de la normalisation du « mean square error (MSE) », dont les valeurs sont comprises dans l'intervalle  $]-\infty;1]$ . Il permet d'estimer la capacité d'un modèle à reproduire un comportement observé. Il est généralement admis que le critère de Nash-Sutcliffe doit être supérieur à 0,7 pour pouvoir affirmer qu'un modèle est satisfaisant c'est à dire que le modèle et les valeurs observées sont cohérents (Bennett *et al.*, 2013). Il se calcule comme suit :

$$NSE = 1 - \frac{MSE}{\sigma_x^2} \rightarrow NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs\ i} - X_{sim\ i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs\ i} - \bar{X}_{obs})^2} \quad \text{eq.2}$$

Une première condition souhaitée dans la validation d'un modèle est que la moyenne de tous les écarts  $\epsilon_i$  se rapproche le plus possible de zéro c'est à dire un modèle sans biais. Le biais moyen est calculé par la relation tirée de (Davydenko et Goodwin, 2021) :

$$Biais\ moyen = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{obs} - X_{sim}) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \epsilon_i \quad \text{eq.3}$$

## 2.3.4. INDICATEURS DE RAYONNEMENT ET DE STRESS THERMIQUE

### 2.3.4.1 Cartographie spatio-temporelle de l'ombrage

Une des difficultés rencontrées est la formalisation mathématique d'une définition de l'ombrage. Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur la définition utilisée par le capteur BF5. En effet le capteur BF5 a été calibré par le fabricant pour signifier l'ombrage lorsque :  $R_{total}/R_{diffus} < 1.25$  et  $R_{total} < 24 \text{ W/m}^2$  (Wood *et al.*, 2003). La seconde partie de l'algorithme est un critère restrictif pour préciser qu'il s'agit d'ombrage à découvert. Pour cette étude, seulement la première partie de l'algorithme de BF5 ( $R_{total}/R_{diffus} < 1.25$ ) pour définir l'ombrage sous couvert a été retenue. Cette définition correspond aux résultats d'un test non publié qui a été réalisé en 2019 sur des brebis sur les parcelles A+ et AH qui définit l'ombrage lorsque  $R_{diffus}/R_{total}$  varie de 0.8 à 0.9 (Saudreau *et al.*, 2021).

Cette définition a été utilisée pour déterminer lorsque la cellule de  $1\text{m}^2$  de la grille de sortie Heterofor est à l'ombre ou pas. Les cellules étant géoréférencées, des cartographies horaires de l'ombrage ont pu être produites en post-traitement sur R Studio. Les cartographies générées peuvent être ainsi importées dans un outil SIG et couplées à d'autres données sur la parcelle comme, par exemple, la position des brebis.

### 2.3.4.2 Pourcentage de surface à l'ombre par heure

Le pourcentage de surface à l'ombre par heure est la part de la surface totale de la parcelle qui se trouve à l'ombre à chaque heure de la journée. Il est calculé à partir de la cartographie horaire de l'ombrage réalisé précédemment et est défini par la relation suivante :

$$A = \left( \frac{\text{Superficie à l'ombre à } H_i}{\text{Superficie totale de la parcelle}} \right) * 100 \quad \text{eq.4}$$

$A$  : % de surface à l'ombre à  $H_i$

$H_i$  : Heure  $i$  de la journée

Cet indicateur permettra d'évaluer l'ombrage disponible (suffisant, insuffisant, en excès) par rapport à la quantité d'animaux à pâturer sur la parcelle.

### 2.3.4.3 Cartographie de la durée d'ombrage

Pour chaque cellule de la grille, le nombre d'heures qu'elle passe à l'ombre sur une journée du lever au coucher du soleil est calculé. Seule la période où le soleil est encore visible dans le ciel est prise en compte. Cette cartographie, géoréférencée, permet d'identifier les endroits de la parcelle ayant passé le plus de temps à l'ombre. Elle peut être mobilisée pour étudier l'impact de l'ombrage sur le comportement des brebis ou sur la strate herbacée en termes de distribution et de composition floristique, de croissance, de digestibilité, etc.

### 2.3.4.4 Cartographie du rayonnement transmis

Le rayonnement transmis est la part du rayonnement incident qui arrive au sol en traversant la canopée. Le coefficient de rayonnement transmis est traduit par la relation :  $R_{\text{transmis}}/R_{\text{Incident}}$ . Ce coefficient est calculé pour chaque cellule de  $1\text{m}^2$  de la grille qui représente la surface de la parcelle. Spatialisé sous forme de cartographie géoréférencée, cet indicateur permet visualiser la répartition de la lumière au sol de la parcelle. Il est d'autant plus intéressant pour étudier les caractéristiques des cultures ou de la strate herbacée en fonction de la quantité de lumière reçue.

### 2.3.4.5 Indices de stress thermique « Heat load index »

Appelé également « indice de charge thermique », le heat load index (HLI) prend en compte la température, l'humidité relative, le vent et le rayonnement solaire. Il est calculé en fonction d'un autre indice qu'est le BGT (Black Globe Température) ou température de globe noir. Le BGT peut être prédit par la formule suivante (Gaughan *et al.*, 2008) :

$$\text{BGT } (^\circ\text{C}) = 1,33 \times TA - 2,65 \times TA^{0,5} + 3,21 \times \log_{10} (\text{Rad} + 1) + 3,5 \quad \text{eq.5}$$

$TA$  : Température Ambiante en  $^\circ\text{C}$  (sur la parcelle)

$Rad$  : Rayonnement Solaire en  $\text{W}/\text{m}^2$  ( $R_{\text{transmis}}$  dans notre cas)

Deux formules pour calculer HLI en fonction du seuil de BGT de  $25^\circ\text{C}$  :

$$\text{BGT} > 25 : \text{HLI} = 8,62 + 0,38 \text{ HR} + 1,55 \text{ BGT} - 0,5 \text{ Vent} + e^{(2,4 - \text{Vent})} \quad \text{eq.6}$$

$$\text{BGT} < 25 : \text{HLI} = 10,66 + 0,28 \text{ HR} + 1,3 \text{ BGT} - \text{Vent} \quad \text{eq.7}$$

$HR$  : Humidité relative en % (sur la parcelle)

$Vent$  : Vitesse du vent en  $\text{m}/\text{s}$  (sur la parcelle)

Quatre seuils de stress thermique ont été fixé pour les bovins à l'engraissement « Feedlot cattle » (Gaughan *et al.*, 2008) :

- HLI < 70 : pas de risque de stress pour les animaux
- 70 < HLI < 77 : état de stress léger
- 77 < HLI < 86 : état de stress modéré
- HLI > 86 : état de stress marqué

Le rayonnement transmis étant disponible pour chaque mètre carré de la surface de la parcelle, cela offre la possibilité de cartographier la répartition spatiale du HLI sur toute la parcelle. Il est donc calculé à partir du rayonnement transmis (spatialisé) simulé par le modèle, de la température, de l'humidité relative et du vent (non spatialisés) enregistrés par une station météo placée sur la parcelle correspondante.

### 2.3.5. ANALYSE DES INDICATEURS

Les parcelles agroforestières diffèrent selon la pente, l'exposition (orientation de la pente) et la configuration des arbres. Il nous est paru ainsi important d'analyser les effets de la variation de ces paramètres sur le rayonnement qui arrive au sol d'une parcelle. Cela permettra de mieux comprendre le comportement des indicateurs développés. Pour tester ses effets, deux parcelles fictives de 0.67 ha ont été créées. La première avec des rangées d'arbres orientées Est-Ouest, plantées selon une distance de 8 mètres entre les arbres d'une même rangée et de 12 mètres entre les rangées (Figure 9a). La seconde parcelle a les mêmes caractéristiques sauf que les rangées d'arbres sont orientées Nord-Sud (Figure 9b). Les dimensions des arbres sont considérées identiques partout sur la parcelle pour éliminer l'effet de l'hétérogénéité spatiale interindividuelle.

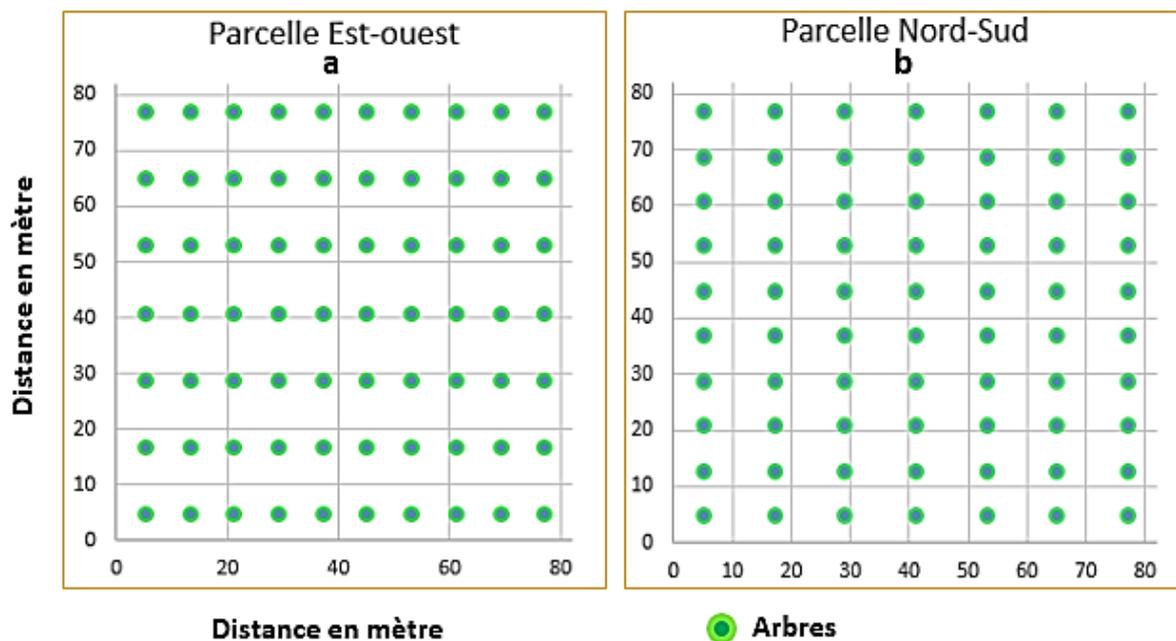


Figure 9 : Parcelles fictives pour tester la sensibilité des indicateurs

Dans un premier temps, le transfert radiatif sur les deux parcelles a été simulé pour une pente nulle. Après simulation et post-traitement, les indicateurs ont été comparés pour faire ressortir les effets de l'orientation des rangées d'arbres.

Dans un deuxième temps, l'intensité et l'orientation de la pente ont été combinées à l'orientation des rangs. Pour chacune des deux parcelles, quatre orientations de pente (OP) couplées à quatre intensités de pente (P) ont été simulées (Tableau 2). Post-traités sur R, les indicateurs ont été comparés entre eux pour faire ressortir les effets de la pente et de l'exposition sur le rayonnement qui arrivent au sol de la parcelle.

Tableau 2 : Matrice de test de sensibilité des indicateurs aux effets de la pente et de l'exposition

<b>Exposition</b>	<b>Parcelle Rangées Est-Ouest</b>	<b>Parcelle Rangées Nord-Sud</b>
<b>Nord (OP0)</b>	Pente : 0%, 10%, 20%, 30%	Pente : 0%, 10%, 20%, 30%
<b>Est (OP90)</b>	Pente : 0%, 10%, 20%, 30%	Pente : 0%, 10%, 20%, 30%
<b>Sud (OP180)</b>	Pente : 0%, 10%, 20%, 30%	Pente : 0%, 10%, 20%, 30%
<b>Ouest (OP270)</b>	Pente : 0%, 10%, 20%, 30%	Pente : 0%, 10%, 20%, 30%

### 2.3.6. PARCELLE A+ ET AH

Les parcelles A+ et AH constituent l'objet principal de cette étude. Tous les indicateurs précités ont été évalués pour ces parcelles pour la journée du 20 juillet 2021 et nos estimations sont valables pour la période de l'été. Nous nous limitons à cette période car : i) les données dendrométriques et surtout la porosité des arbres ont été collectées pendant cette saison de l'année où les arbres ont déjà toutes leurs feuilles ; ii) c'est la période la plus chaude et la plus ensoleillée de France où l'on observe généralement les hausses de température (Météo-France, 2021) pouvant induire des stress thermiques chez les animaux.

Entre autre, la journée du 20 juillet 2021 offre les conditions météorologiques nécessaires (ensoleillée, très peu nuageuse et sans pluie) pour bien se rendre compte de l'interception lumineuse par les arbres. C'est également une journée où les brebis étaient pâturées sur les parcelles et que cette concordance temporelle est nécessaire pour le couplage de données de positionnement des brebis et des cartographies d'ombrage.

### 2.3.7. EVALUATION DU TEMPS A L'OMBRE DES BREBIS

A titre de test, les cartographies horaires d'ombrage sur la journée du 20 juillet 2021 ont été couplées aux données de positionnement (figure 10) de quelques brebis sur cette même journée. L'objectif étant de prouver la possibilité de coupler les données, nous avons choisi au hasard 6 brebis parmi le lot de 12 pâturées sur la parcelle A+. Le temps passé à l'ombre par heure par animal a été calculé à partir de cette jointure spatiale.



Figure 10 : Exemple de positionnement toutes les 30 secondes de 3 brebis sur leur parcelle respective

### 3. RESULTATS

#### 3.1. EVALUATION DE LA PERFORMANCE DU MODELE HETEROFOR

Selon le critère «Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE)», pour les deux méthodes (Beer Lambert et Enveloppe poreuse), le modèle Heterofor permet de faire une bonne représentation du rayonnement transmis sur les deux parcelles agroforestières (NSE>0.75, figure 11). Chaque point sur les graphiques représente une couple de données (simulée et observée) pour un capteur à une heure donnée. Toutefois et dans tous les cas, de mauvaises estimations non négligeables sont présentes sur les graphiques (points très éloignés de la droite 1:1). Comme tout modèle, Heterofor présente des imprécisions et les sources peuvent être multiples (voir la discussion).

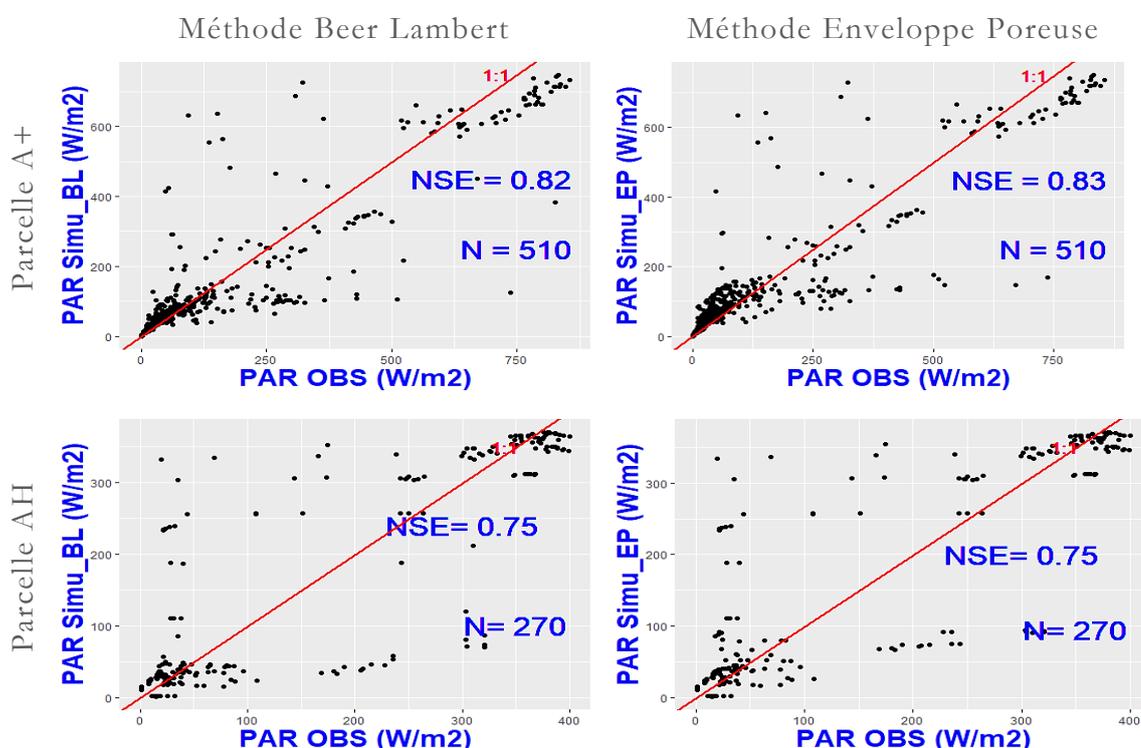


Figure 11 : PAR mesuré versus PAR simulé sur les parcelles A+ et AH

De manière complémentaire au NSE, les deux méthodes sont jugées assez fidèles à partir du biais moyen variant de  $-2.45$  à  $10.13 \text{ W/m}^2$ , respectivement de  $-2$  à  $6\%$  sur les deux parcelles. Sur la parcelle A+ le biais représente  $10.13 \text{ W/m}^2$  pour la méthode Beer Lambert et  $3.32 \text{ W/m}^2$  pour la méthode enveloppe poreuse soit respectivement  $6$  et  $2\%$  des mesures. Sur la parcelle AH le biais représente  $-2,45 \text{ W/m}^2$  pour la méthode Beer Lambert et  $-5.94 \text{ W/m}^2$  pour la méthode enveloppe poreuse soit respectivement  $-2$  et  $-4\%$  des mesures. La comparaison des deux méthodes laisse remarquer qu'elles sont quasiment identiques sur les deux parcelles lorsque le rayonnement est élevé donc à découvert. Elles diffèrent en cas de faible rayonnement donc en présence du couvert (Figure 12). Cette dernière différence tient au fait que les deux méthodes ne caractérisent pas le houppier de la même façon.

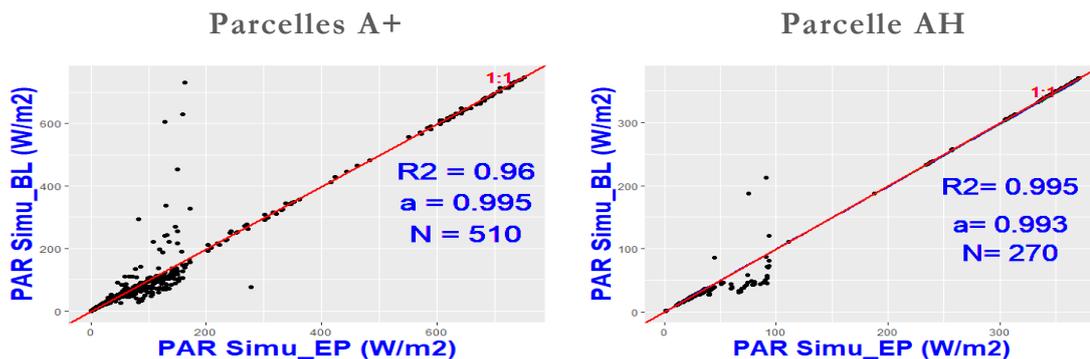


Figure 12 : Comparaison du PAR estimé par les deux méthodes sur les deux parcelles

Comme le montre le NSE et le biais, la comparaison des mesures aux simulations sur des graphiques en courbe laisse remarquer que les deux méthodes permettent de faire une assez bonne représentation de la réalité étudiée en suivant la tendance des mesures (Figures 13 et 14). Toutefois, nous pouvons également constater que sur les deux parcelles, les deux méthodes sous-estiment systématiquement le PAR pour les valeurs les plus élevées au milieu de la journée (les pics sur les graphiques 13 e 14).

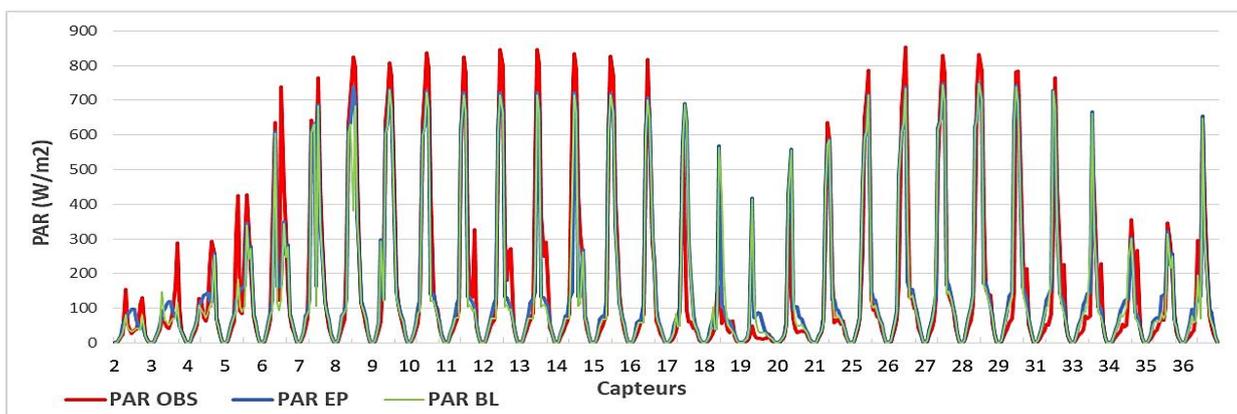


Figure 13 : Tendence du PAR mesuré et simulé par capteur sur la parcelle A+

La tendance des simulations est plus proche des mesures sur la parcelle AH (Figure 14). Cela tient au fait que c’est une parcelle très peu couverte et que normalement les simulations sont plus précises à découvert car moins influencées par les arbres.

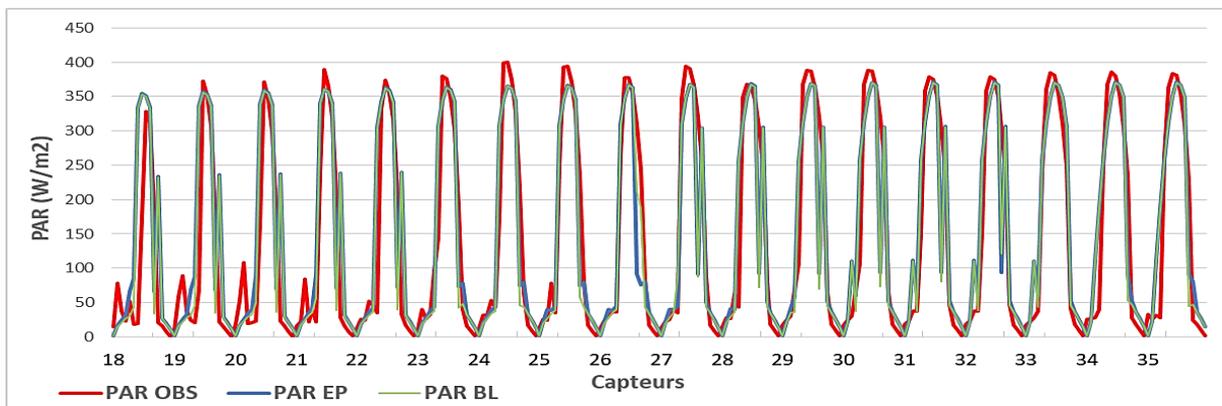


Figure 14 : Tendence du PAR observé et simulé sur la parcelle AH

## 3.2. ANALYSE DES INDICATEURS DE RAYONNEMENT TRANSMIS

Cette section présente les résultats de la sensibilité des indicateurs de R. transmis à la structure des arbres (orientation des rangées) sur une parcelle ainsi qu'à certaines caractéristiques morpho métriques de la parcelle comme la pente et l'exposition.

### 3.2.1. EFFETS DE L'ORIENTATION DES RANGEES D'ARBRES (NORD-SUD ET EST-OUEST) POUR UNE PENTE ET UNE EXPOSITION DONNEE

L'orientation des rangées d'arbres influence la quantité et la répartition spatio-temporelle du R transmis et de l'ombrage sur la parcelle. Les figures 15 présentent les différences simulées pour deux parcelles de merisiers plantées en 8X12 sur une pente nulle.

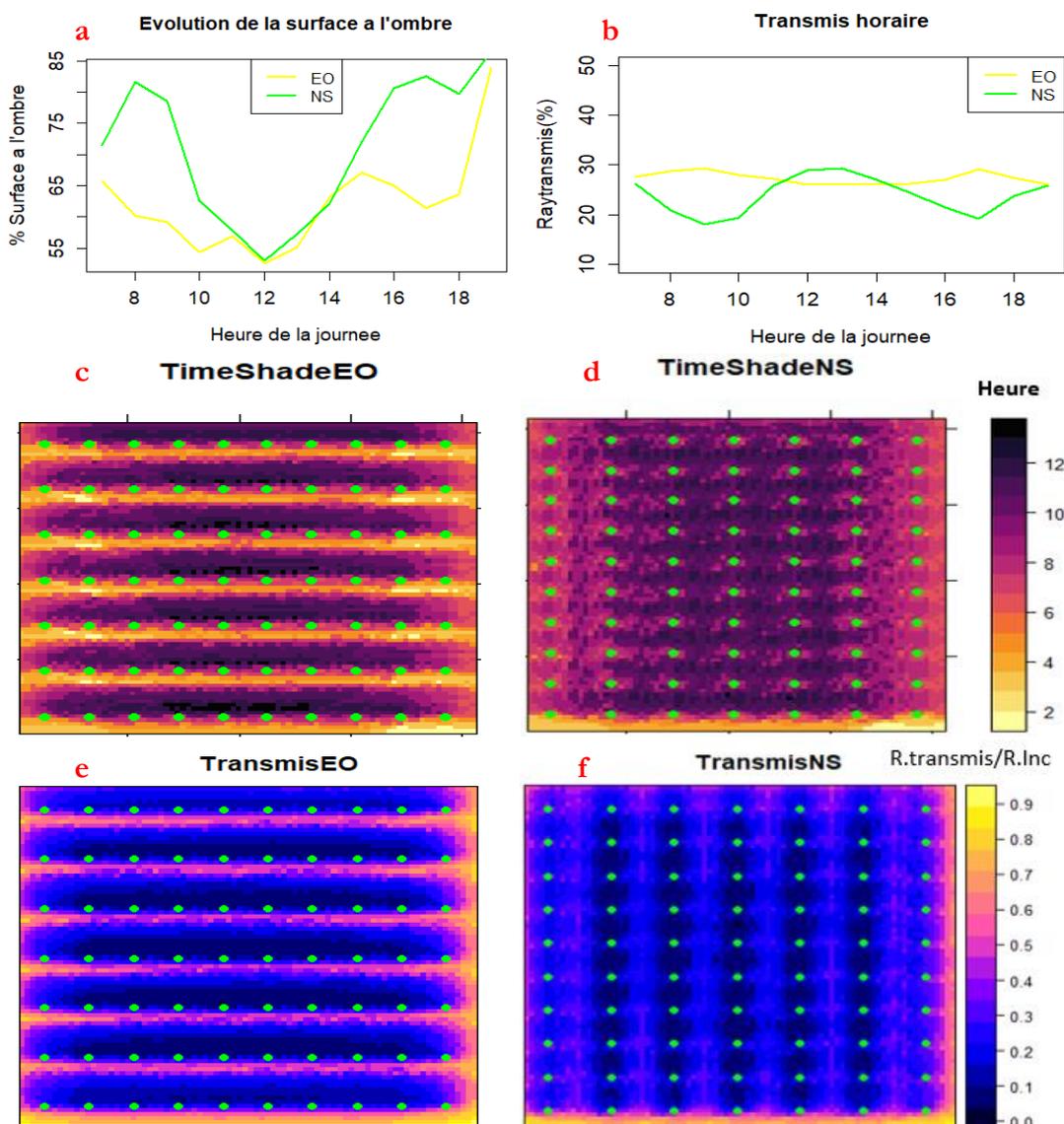


Figure 15 : Comparaison des indicateurs selon l'orientation des rangées d'arbres

a) évolution horaire de l'ombrage ; b) évolution horaire du R. transmis ; c) répartition spatiale de la durée à l'ombre (en heure) sur la parcelle Est-Ouest (EO); d) répartition spatiale de la durée à l'ombre (en heure) sur la parcelle Nord-Sud (NS); e) répartition spatiale du R. transmis sur la parcelle Est-Ouest ; f) répartition spatiale du R. transmis sur la parcelle Nord-Sud.

L'évolution temporelle du R. transmis et donc de l'ombrage au sol diffère fortement selon l'orientation des arbres. Les plus grands écarts entre les deux dispositions s'observent le matin entre 8h et 10h et dans l'après-midi entre 15 et 19h et peuvent atteindre jusqu'à 20% de surface à l'ombre à certaines heures de la journée (Figure 15a, 15b). Les endroits les plus ombragés forment une trame continue dans les inter-rangs sur la parcelle Est-ouest (Figure 15c) tandis que sur la parcelle Nord-Sud, les endroits les plus ombragés se trouvent entre les arbres dans les rangs (Figure 15d). Le sol de la parcelle avec des rangs Est-Ouest reçoit légèrement plus de lumière (transmis moyen journalier=27%) que la parcelle Nord-Sud (transmis moyen journalier 24%) mais la répartition spatiale de ce transmis et donc de l'ombre varie fortement entre les deux configurations. La distribution spatiale du R. transmis est plus homogène dans les inter-rangs de la parcelle Nord-Sud (Figure 15f). Elle est très contrastée sur la parcelle Est-Ouest avec certaines zones recevant moins de 10% et d'autres plus de 50 % du rayonnement incident dans un inter-rang (Figure 15e).

### **3.2.2. EFFETS COMBINES DE LA PENTE ET DE L'EXPOSITION**

La quantité et la répartition temporelle du rayonnement qui arrivent sur la parcelle sont influencées par la pente et l'exposition. Les figures ci-dessous comparent le pourcentage de surface à l'ombre pour quatre (4) valeurs de pente (0%,10%,20%,30%), pour quatre orientations de pente (Nord-OP0, Est-OP90, Sud-OP180, Ouest-OP270) et pour deux configurations des arbres sur la parcelle. Les résultats sont présentés en deux parties pour faciliter la lecture des effets.

### 3.2.2.1 Effets de la pente pour une exposition constante

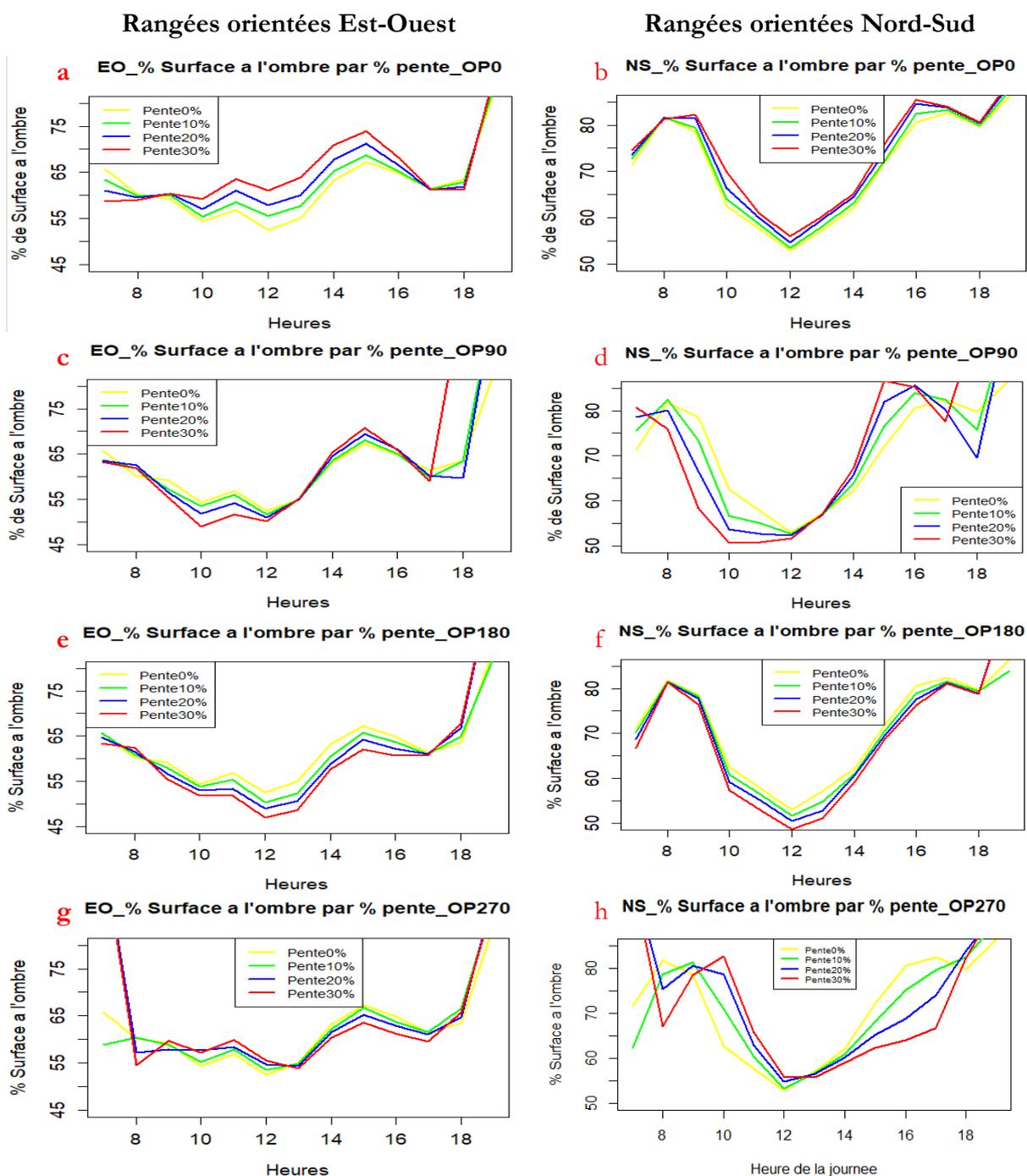


Figure 16 : Variation du pourcentage de surface à l'ombre en fonction de la pente, de l'exposition et de l'orientation des rangées d'arbres

Pour les deux orientations de rangées et lorsque la pente est orientée vers le Nord (16a et 16b), le pourcentage de surface à l'ombre augmente avec l'augmentation de la pente entre le début et la fin de la journée (8-17h). C'est la situation inverse lorsque la pente est orientée vers le Sud (16e et 16f). Dans le cas où les rangées sont orientées Nord-Sud et la pente vers l'Est, le pourcentage de surface à l'ombre est plus élevé pour les faibles pentes dans la première moitié de la journée jusqu'à 13 et cette situation s'inverse sur le reste de la journée (16d). Une pente orientée vers l'ouest conduit à une évolution inverse (16h). Pour les deux

configurations d'arbres, la pente a moins d'influence sur la quantité d'ombrage lorsque les rangées sont orientées dans le même sens que la pente (Figures 16b, 16c, 16f, 16g). Lorsque la pente orientée vers l'Est est élevée (30%), le soleil n'atteint plus la parcelle environ une heure plus tôt dans l'après-midi (16c, 16d) et dans le cas contraire (exposition ouest, pente 20 et 30%), le soleil atteint la parcelle environ une heure plus tard dans la matinée (16g, 16h).

Si dans certains cas les écarts liés à la pente peuvent être considérés comme faibles, ils sont en général plus élevés dans la configuration Nord-Sud et peuvent atteindre jusqu'à 30% à certaines heures de la journée (16d et 16h). En somme, la répartition temporelle du rayonnement transmis subit les mêmes effets mais à l'inverse (annexe 7).

### 3.2.2.2 Effets de l'exposition pour une pente constante

Comme on l'a aperçu précédemment, l'exposition peut également influencer la quantité et la répartition spatio-temporelle du rayonnement qui arrive sur la parcelle. Afin de mettre en exergue cet effet, les résultats sont tracés pour une valeur de pente donnée et pour deux orientations des rangées d'arbres selon 4 orientations de la pente : OP0(Nord), OP90(Est), OP180(Sud), OP270(Ouest).

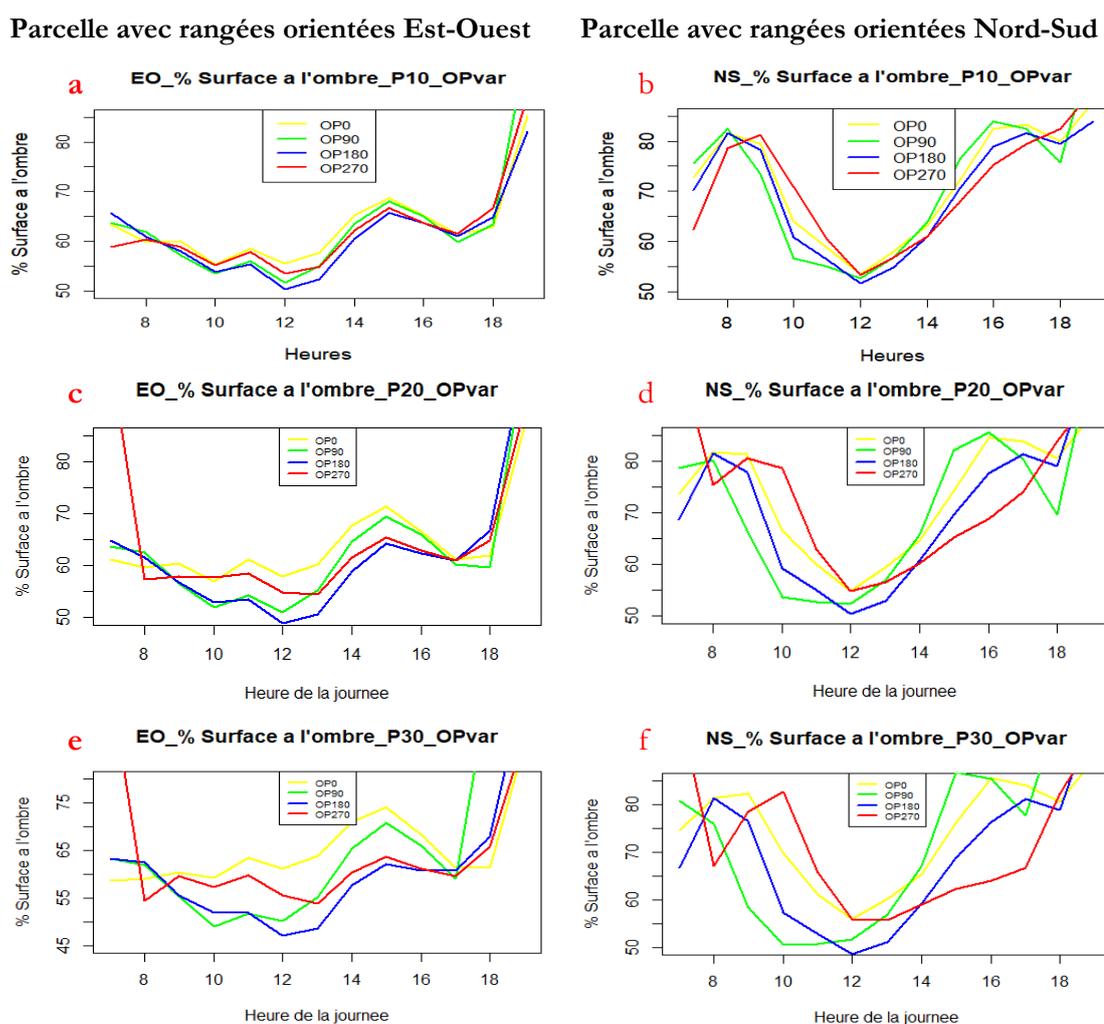


Figure 17 : Variation du pourcentage de surface à l'ombre en fonction de l'exposition pour une pente fixe

Dans tous les cas, sauf lorsque la pente est nulle, pour une même valeur de pente, il y a en moyenne sur la journée, plus d'ombrage sur la parcelle quand la pente est orientée vers le nord (OP0). La situation s'inverse lorsque la pente est orientée vers le sud (OP180). Ainsi et pour les deux configurations, plus la pente est élevée, plus l'effet de l'orientation de la pente est marquant. Cet effet est plus élevé pour des parcelles dont les arbres sont orientés Nord-Sud. Par exemple, pour une parcelle de configuration Nord-Sud et de pente de 30%, l'orientation de la pente peut conduire à des écarts de plus de 30% de surface à l'ombre à certaines heures de la journée (Figure 17f). L'effet inverse est observé sur le R. transmis (annexe 8).

### 3.3. EVALUATION DES INDICATEURS DE R. TRANSMIS SUR LES PARCELLES A+ ET AH

Les résultats présentés ci-dessous ont été simulés selon la méthode Beer Lambert pour la journée du 20 juillet 2021. La méthode Beer Lambert a été choisie car c'est la plus utilisée dans la littérature et elle donne de meilleurs résultats.

Selon les données enregistrées sur la station de référence sur la parcelle A0, c'est une journée ensoleillée sans pluie avec une température moyenne de  $20.25 \pm 1.03^\circ\text{C}$  (Figure 18), d'humidité relative moyenne de  $62.3 \pm 3.55\%$  et un vent moyen de  $0.85 \pm 0.05$  m/s (annexe 9). Elle suit deux journées consécutives légèrement plus ensoleillées (18 et 19 juillet 2021).

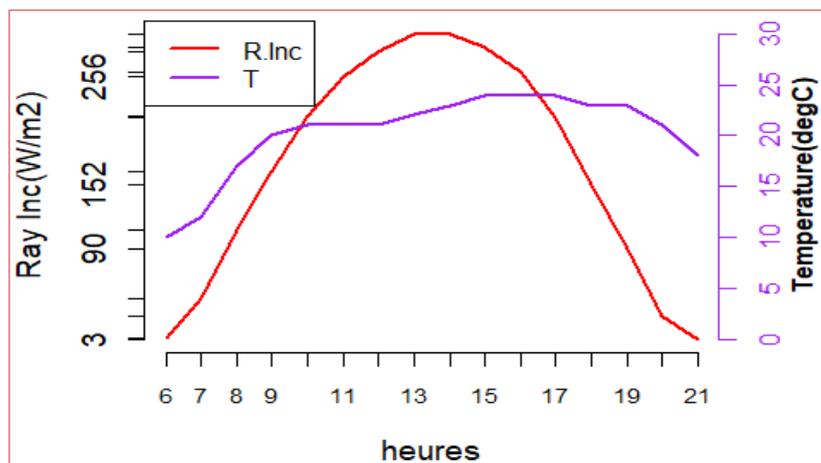


Figure 18 : Rayonnement incident et température sur la station de référence (20/07/2021)

#### 3.3.1. PARCELLE A+

Les indicateurs de rayonnement ont été calculés pour la parcelle A+ (0.80 ha) qui pour rappel est plantée de merisiers et d'érables sycomores à une densité de 60 tiges/ha. Sa pente moyenne orientée à  $215^\circ$  vers le Sud-ouest est de 12%. Les arbres de bordure ont été pris en compte car ils projettent de l'ombre sur la parcelle à certains moments de la journée.

### A. L'ombrage et le temps à l'ombre

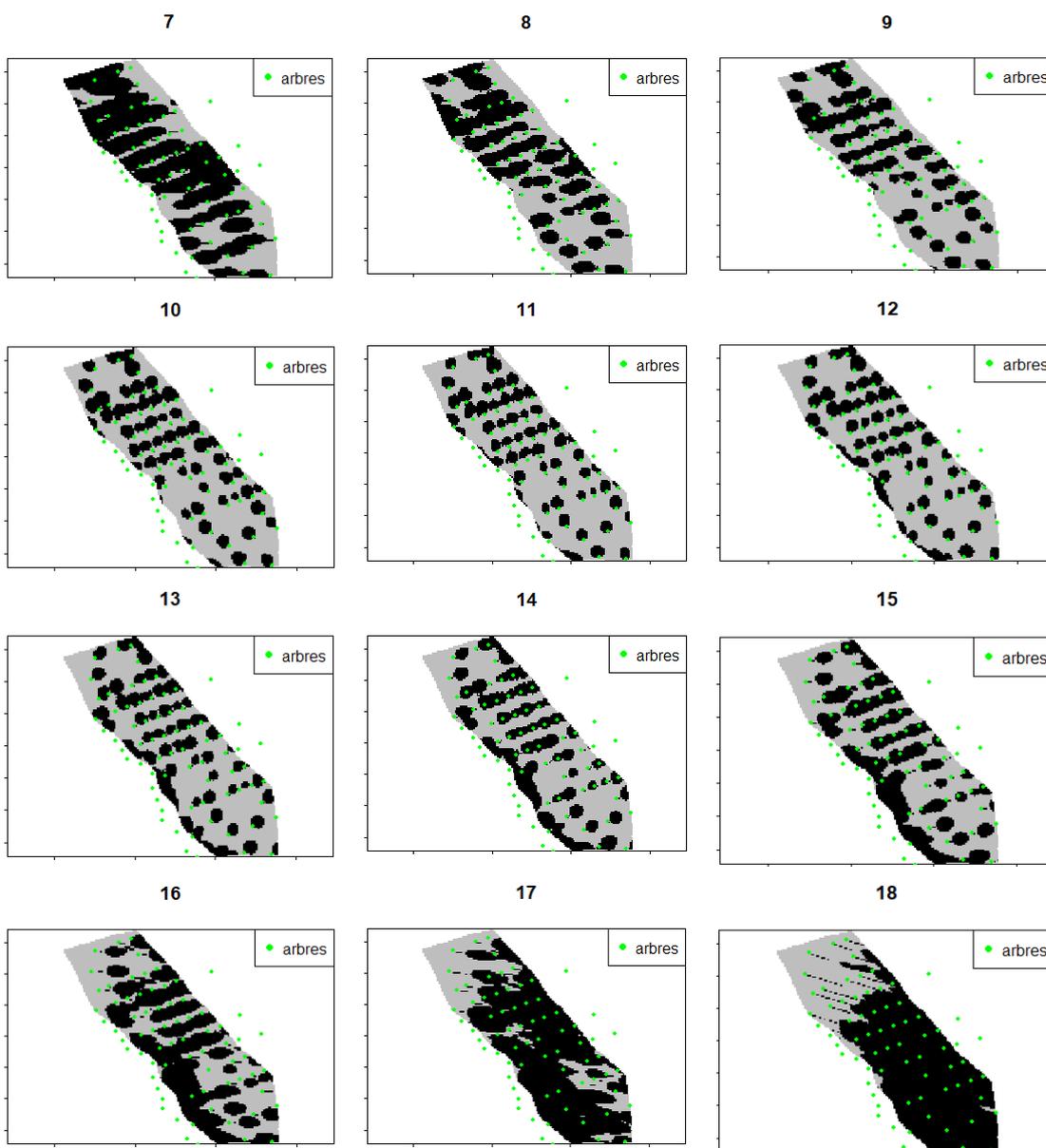


Figure 19 : Cartographie horaire (7h-18h) de l'ombrage sur A+ (20 juillet 2021)

L'analyse des données d'Heterofor a permis de faire une cartographie horaire de l'ombrage sur la parcelle (Figure 19). L'ombre des arbres est projetée généralement dans les inter-rangs. Cette situation est due à l'orientation proche Est-Ouest des rangées d'arbres comme il a été démontré dans la partie 3.3.1.

Le pourcentage de surface à l'ombre a été calculé par rapport à la superficie totale de la parcelle. Les pourcentages les plus bas s'observent en milieu de journée (12-13h) avec 32-33% de surface à l'ombre soit 2586-2666 m<sup>2</sup> (Figure 20a). Les endroits ayant passés le plus de temps à l'ombre (jusqu'à 10 heures sur la journée) se trouvent dans les inter-rangs (Figure 20b).

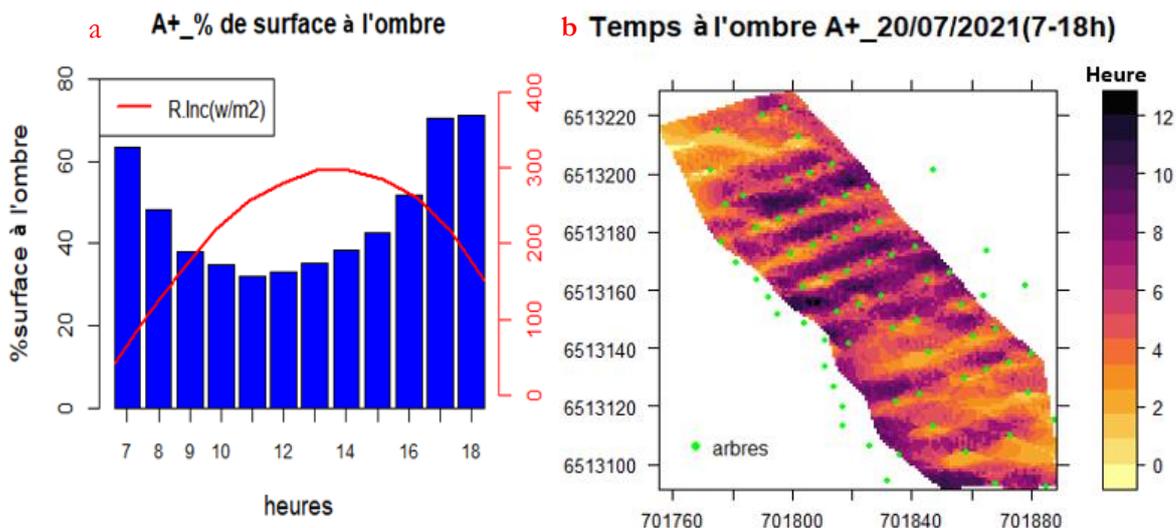


Figure 20 : Pourcentage de surface à l'ombre (a) et cartographie de la durée à l'ombre (b) sur la parcelle A+ pour la journée du 20 juillet 2021

### B. Le rayonnement transmis

La répartition du R. transmis sur la parcelle A+ est très hétérogène car le couvert arboré l'est aussi. Les endroits où les arbres sont absents reçoivent plus de lumière et sont donc moins ombragés. Les endroits ayant reçu moins de lumière et donc plus d'ombrage sur la journée se trouvent dans les inter-rangs avec un gradient décroissant vers le nord (Figure 21). Plus de 80% de la superficie de cette parcelle reçoivent moins de 50% de lumière sur la journée.

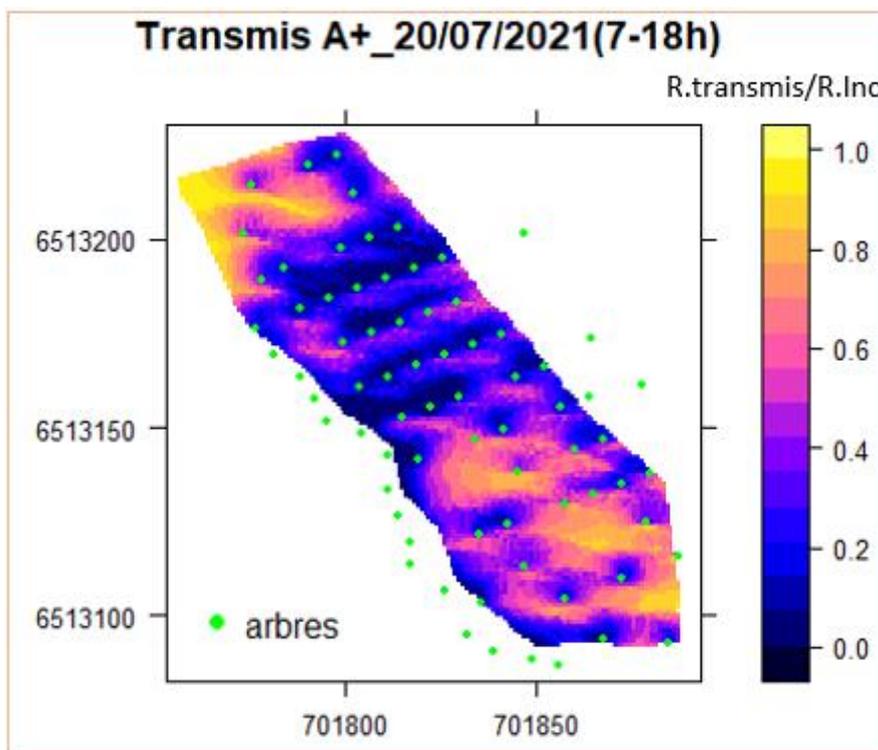


Figure 21: Cartographie du coefficient de transmis sur la parcelle A+ (20/07/2021-7-19h)

### C. Indices de stress thermique (HLI) sur la parcelle A+

Le HLI a été calculé et cartographié pour la journée du 20 juillet 2021 de 6 à 21h pour la parcelle A+. Combinant la température et le rayonnement transmis, il fait ressortir l'impact des arbres sur le niveau de stress thermique sur la parcelle. De 8 à 20h le HLI est en général inférieur sous l'ombre des arbres. Sans la présence des arbres le HLI serait au-dessus de 80 (stress modéré à élevé) sur toute la parcelle entre 9 et 19h (Figure 22).

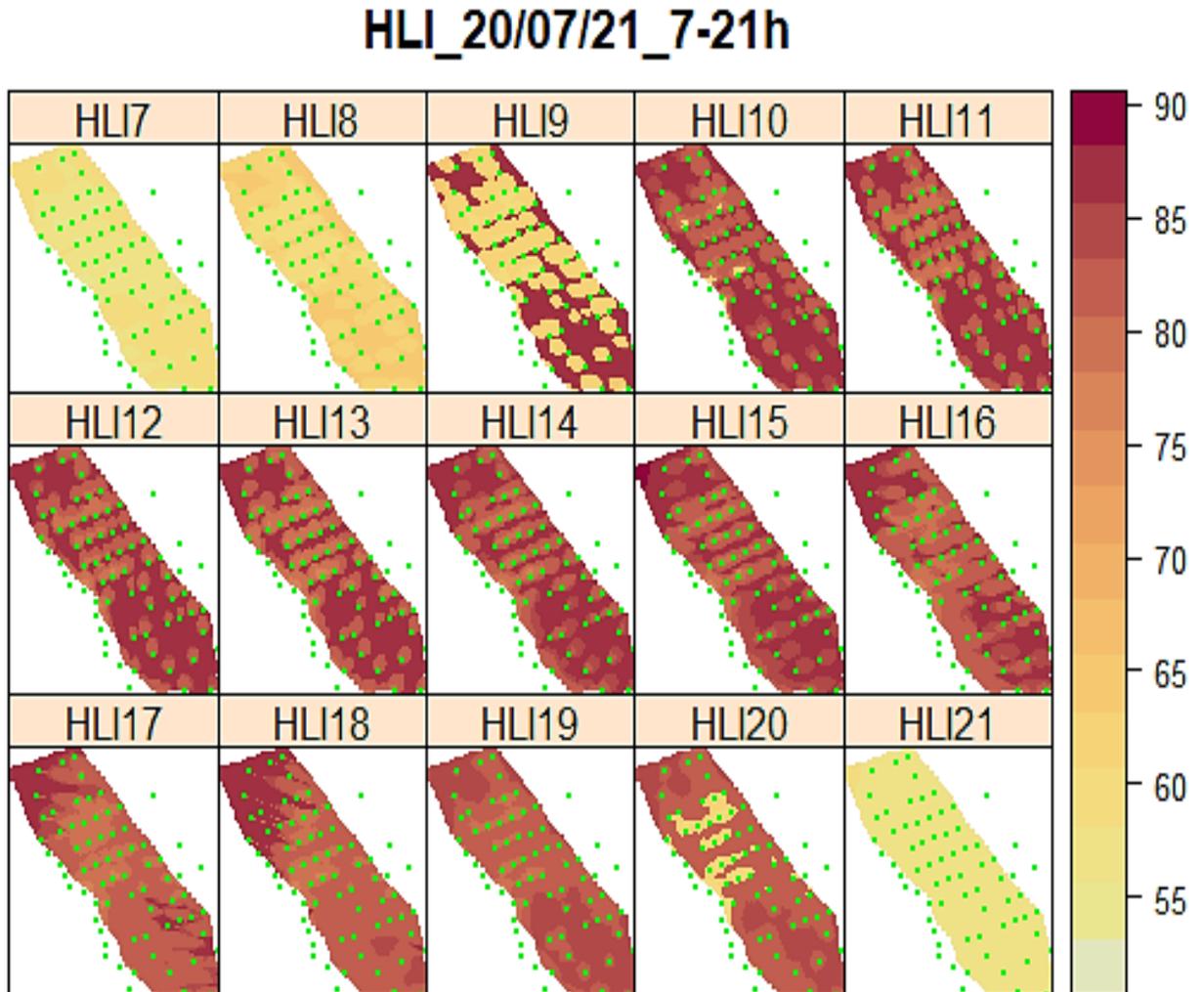


Figure 22 : Cartographie horaire du HLI sur la parcelle A+ (20 juillet 2021)

### 3.3.2. PARCELLE AH

La parcelle AH d'une superficie de 0.78 ha est limitée sur sa bordure ouest par une double rangée d'arbres dont une sur la limite de la parcelle et l'autre à l'extérieur. Sa pente moyenne de 11 % est orientée à 90° (plein Est). D'autres arbres sur la parcelle limitrophe A0 ont été matérialisés car ils projettent de l'ombre sur la parcelle.

#### A. L'ombrage et le temps à l'ombre

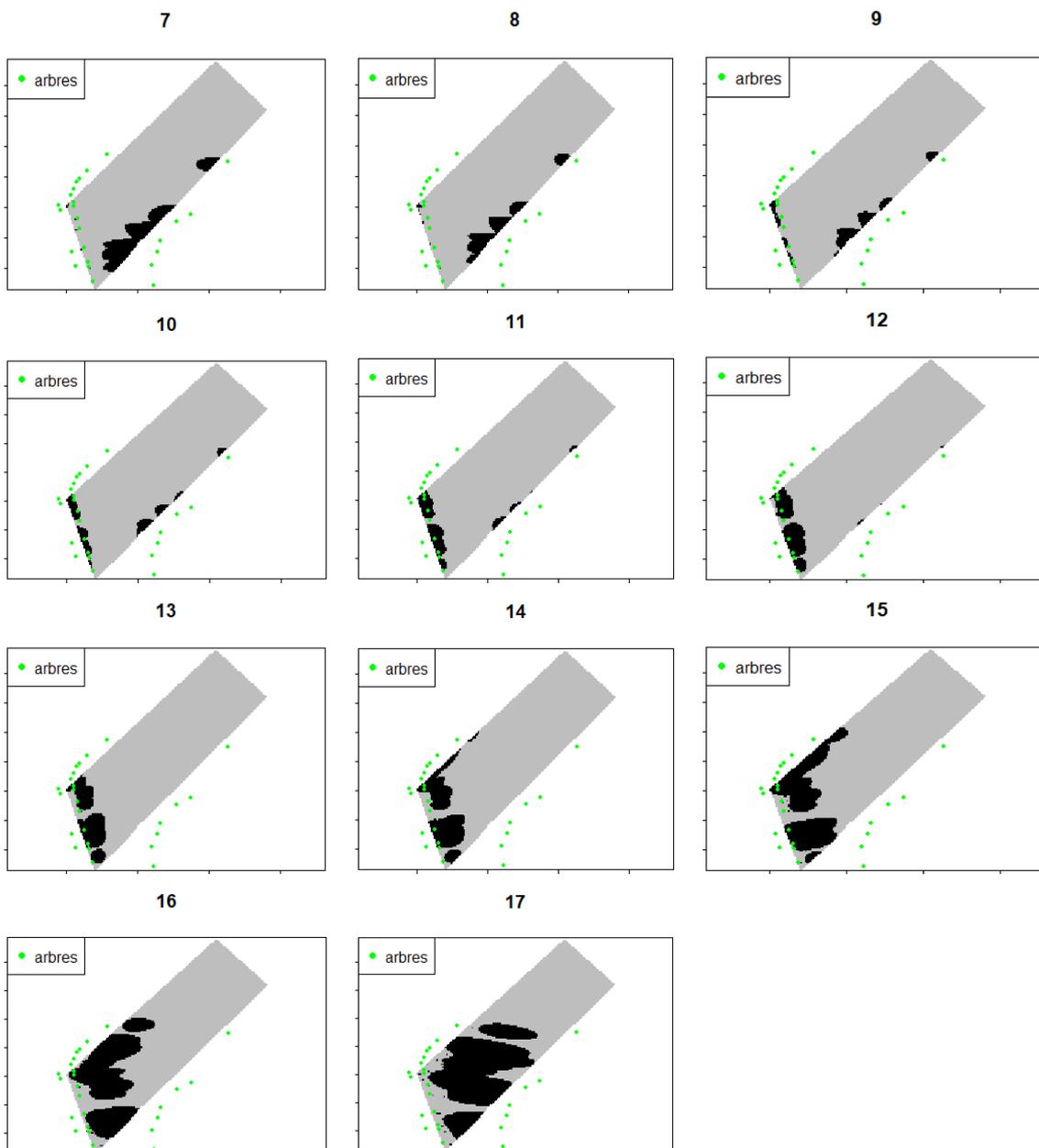


Figure 23 : Cartographie horaire de l'ombrage sur la parcelle AH (20 juillet 2021)

L'effet des arbres de la parcelle A0 (au sud) dans la matinée est bien marqué mais d'une manière générale, la parcelle est très peu ombragée et particulièrement jusqu'à 13h (Figure 23).

De 8 à 13h, moins de 10% (780m<sup>2</sup>) de la surface de parcelle se trouve à l'ombre. Il y a plus d'ombrage sur la parcelle dans l'après-midi pourtant à cette période le rayonnement incident y est plus élevé (Figure 24a). Ceci est dû à la configuration des arbres qui forme une haie haute sur la bordure ouest du côté de la position du soleil dans l'après-midi. Le peu d'endroit ayant passé le plus de temps à l'ombre se trouvent sous les arbres de bordure (Figure 24b)

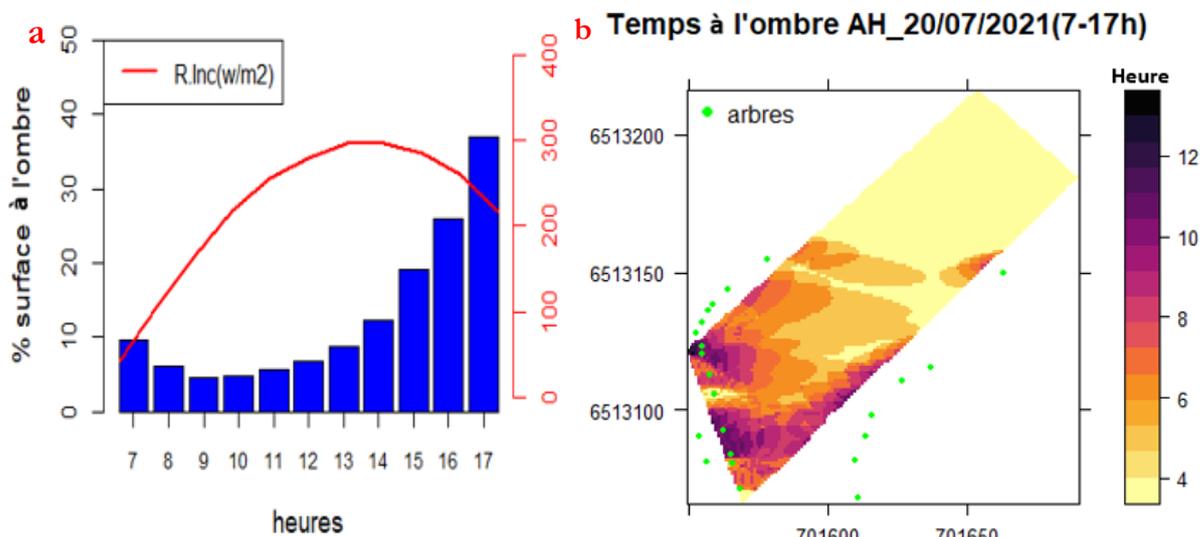


Figure 24 : Pourcentage de surface à l'ombre (a) et cartographie de la durée à l'ombre (b) sur la parcelle AH pour la journée du 20 juillet 2021

### B. Le rayonnement transmis

Sur cette parcelle, les endroits ayant reçu moins de R. transmis et ayant passé plus de temps à l'ombre se trouvent sous les arbres à la bordure ouest (Figure 25). C'est une parcelle assez éclairée car seulement 8% de sa superficie reçoit moins de 50% de lumière.

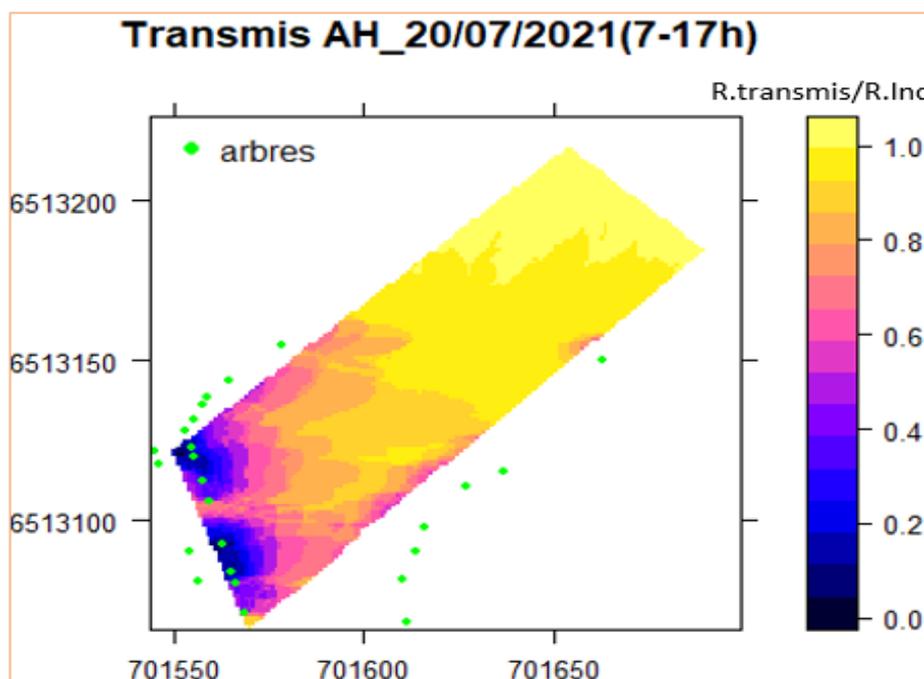


Figure 25: Cartographie du transmis sur la parcelle AH (20/07/2021\_7-17h)

### C. Indices de stress thermique (HLI) sur la parcelle AH

La cartographie horaire du HLI montre bien l'ambiance thermique stressante qui règne sur cette parcelle très peu couverte. De 9h à 15h, le HLI est au-dessus de 80 sur la quasi-totalité (plus de 98%) de la surface de la parcelle. En général, la parcelle est sous condition de stress modère à forte de 8h jusqu'à 17h sur cette journée (Figure 26). Ce n'est pas pourtant la journée la plus ensoleillée et la plus chaude déjà enregistrée sur le site.

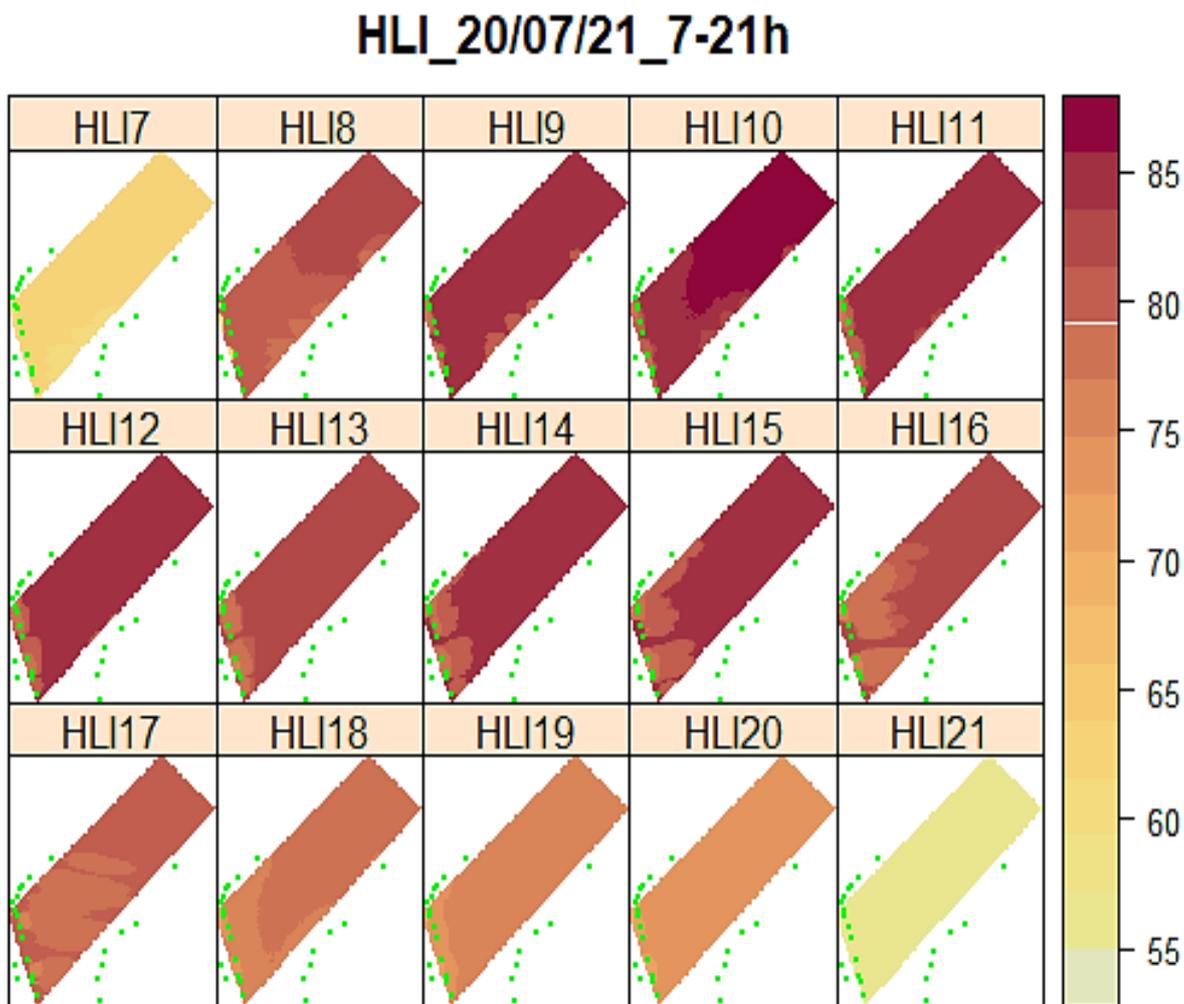


Figure 26 : Cartographie horaire du HLI sur la parcelle AH (20 juillet 2021)

### 3.4. TEMPS PASSE A L'OMBRE PAR LES BREBIS SUR LES PARCELLES

Les cartographies horaires d'ombrage ont été couplées à la position de 6 brebis (id : 92224, 92074, 92058, 92028, 92196, 87758) sur la parcelle A+ pour la journée du 20 juillet 2021 de 9h à 18h. Les brebis ne sont pas toutes à l'ombre ou au soleil au même moment mais on peut observer une tendance assez proche du temps passé à l'ombre sur la journée notamment à partir de 16h (Figure 27). Les 6 brebis passent en moyenne entre 31 et 44% de la journée (9-18h) à l'ombre. Toutefois, le couplage de ces deux données seul ne suffit pas pour expliquer les différences de comportement des brebis.

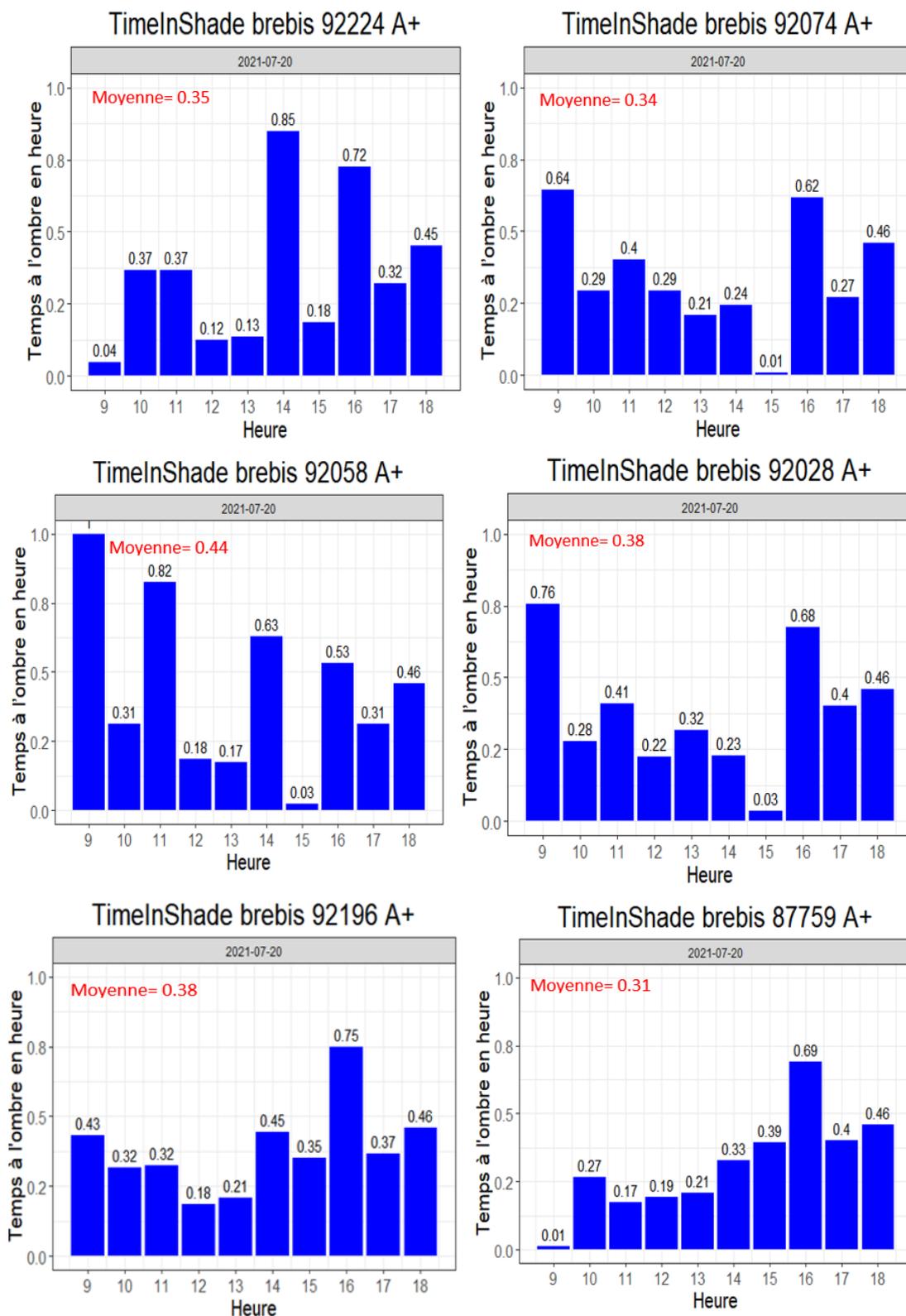


Figure 27 : Temps passé à l'ombre par 6 brebis sur la parcelle A+ le 20 juillet 2021

## 4. DISCUSSION

### 4.1. PERFORMANCE DU MODELE ET SOURCES D'IMPRECISIONS

La plupart des évaluations de modèles de transfert de lumière jugés satisfaisants rapportent un  $R^2$  entre 0.62 à 0.94 (Ligot *et al.*, 2014b). L'approche d'interception de lumière de Samsaralight qu'intègre Heterofor a été jugée satisfaisante pour l'estimation du rayonnement transmis sous une forêt hétérogène d'épicéa au Norvège (Courbaud *et al.*, 2003) et sous une forêt mixte de hêtre et de chêne en Belgique (Ligot *et al.*, 2014a). Avec un NSE variant de 0.75 à 0.83 et selon les objectifs poursuivis par le projet de recherche, le niveau de précision fournis par le modèle a été jugé acceptable. Toutefois, quelques potentielles sources des imprécisions observées ont été identifiées:

#### 4.1.1. ECHELLE TEMPORELLE (MESURES VS SIMULATIONS)

Lorsqu'on mesure une information très variable dans le temps, plus le pas de temps de mesure est petit, plus les informations sont susceptibles d'être précises. Car, cela permet de saisir le plus de variations possible sur une durée donnée. Dans le cadre de cette étude, les mesures de PAR pour tester la performance du modèle ont été réalisées toutes les 5 minutes. Il serait possible de diminuer le pas de temps pour prendre en compte plus de variations du rayonnement transmis à travers les houppiers très instables sous l'effet du vent. Cependant, comparé à la précision temporelle du modèle, les données mesurées toutes les 5 minutes sont déjà plus précises par rapport aux données simulées toutes les heures et cela peut contribuer aux écarts observés entre les mesures et les simulations.

#### 4.1.2. LA MODELISATION DES HOUPPIERS

Le houppier d'un arbre est une structure complexe avec des ramifications de branches et de disposition des feuilles très complexe qui varie selon l'individu, l'âge, l'espèce (Leroy, 2005). Dans les travaux de modélisation où l'on doit travailler à l'échelle parcellaire, il est très difficile de représenter les arbres avec leurs caractéristiques dans les moindres détails. Ils sont généralement représentés par des formes géométriques simplifiées (Boudon *et al.*, 2001). C'est aussi le cas pour Heterofor qui représente le houppier d'un arbre de manière simplifiée comme un volume continu au contour bien régulier. Pourtant dans la réalité, la distribution des branches et des feuilles dans le houppier d'un arbre n'est pas homogène et le contour du houppier n'est pas régulier. En effet, il peut avoir des trouées dans le feuillage à cause d'une branche morte par exemple ou dans le cas des contours, des branches en excroissance. Il est tout à fait possible qu'à un moment de la journée, un capteur qui ne fait que quelques centimètres de diamètre, se trouve dans une petite trouée du houppier ou sous une branche en excroissance alors que le modèle ne peut pas prendre en compte ces cas de figure.

#### 4.1.3. LA POROSITE, LA LAD, K ET $\Omega$

Heterofor utilise une porosité ou une LAD moyenne par espèce pour caractériser l'aptitude d'un arbre à laisser passer la lumière. Dans la réalité, la porosité et la LAD ne sont pas uniformes dans un arbre. La LAD varie selon l'âge (Nock *et al.*, 2008), l'espèce,

l'individu et pour un même individu d'un endroit à l'autre dans le houppier et il est très difficile de prendre en compte toutes ces variations à l'échelle d'un peuplement (Ligot et al 2014b). C'est une source d'imprécision potentielle dans notre simulation quoique la sensibilité du module interception de lumière d'Heteroform a été déclarée faible pour des variations de LAD entre 0.3 et 0.9 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (Courbaud *et al.*, 2003). Heteroform permet entre autre de définir plusieurs LAD pour une espèce en découpant le houppier en trois parties superposées (LAD inférieure, moyenne et supérieure) mais nous ne disposons pas des données nécessaires pour utiliser cette option. Des études récentes ont montré qu'il est possible de recourir au scanner laser terrestre ou aéroporté (LiDAR) pour estimer avec plus de précision le LAI (Hu, Yan, *et al.*, 2018 ; Hu, Bournez, *et al.*, 2018) qui est une composante de la LAD.

Comme pour la LAD, il existe très peu de littérature sur  $k$ ,  $\Omega$  et il est rapporté que ces deux paramètres sont très difficiles à mesurer (Courbaud *et al.*, 2003 ; Ligot *et al.*, 2014b ; Jonard *et al.*, 2020). Les études ont généralement recours à des valeurs par défaut, fixes, comme dans notre cas. Cependant en réalité, l'orientation des feuilles varient selon l'espèce et les contraintes du milieu notamment sous l'effet du stress hydrique et de la quantité de lumière disponible (Duthoit, 2006). Il est donc tout à fait possible que l'orientation des feuilles varie au milieu de la journée lorsque le rayonnement est élevé et que les arbres sont susceptibles d'être en situation de stress hydrique. En outre, la dispersion des feuilles et des branches qui définit le mode d'agrégation est rarement aléatoire dans un arbre (Duthoit, 2006 ; Ligot *et al.*, 2014b). Elle dépend aussi de l'agencement des arbres sur la parcelle. En effet, une canopée avec des éléments régulièrement espacés éléments ( $\Omega \geq 1$ ) transmet moins de lumière qu'une canopée avec des éléments dispersés de façon aléatoire ( $\Omega = 1$ ). En revanche, une canopée avec des éléments agrégés transmet beaucoup plus de lumière ( $\Omega \leq 1$ ) (Niinemets, 2010).

En observant la courbe des données mesurées et simulées, on peut remarquer que le modèle sous-estime systématiquement les données élevées du rayonnement en milieu de journée (les pics sur les figures 13 et 14 à la section 3.1). Le coefficient d'extinction et le coefficient d'agrégation sont susceptibles de contribuer à cette sous-estimation pour les raisons décrites précédemment.

#### **4.1.4. ELEMENTS DE L'ENVIRONNEMENT NON PRIS EN COMPTE**

##### **4.1.4.1 Le vent**

Un coup de vent peut faire bouger une branche et laisser passer de la lumière qui atteint un capteur qui, normalement serait à l'ombre sans le vent. La situation inverse est tout à fait possible. Le modèle ne prend pas en compte le vent. Cela peut contribuer aux écarts observés dans la comparaison des mesures aux simulations puisque les mesures prises par les capteurs au champ ont été influencées par le vent mais pas les simulations.

##### **4.1.4.2 Les variations de pente et d'exposition et les montagnes environnantes**

Heteroform tel qu'il est actuellement ne permet pas de prendre en compte les changements de pente et d'orientation de pente sur une parcelle. Le modèle utilise une

pente régulière et unidirectionnelle (Courbaud *et al.*, 2003). Or, les parcelles A+ et AH prises en compte pour la validation du modèle présentent des variations d'intensité et d'orientation de pente. La pente moyenne a été utilisée mais il est tout à fait démontré dans la partie 3.3.1, que la quantité et la répartition du rayonnement qui arrive sur la parcelle est influencée par la pente et l'exposition. Un moyen de réduire la marge d'erreur due à la pente et l'exposition, particulièrement quand on simule de grandes parcelles, serait de découper la parcelle en des parties de pente plus ou moins régulières. Toutefois cela exige de pouvoir gérer les effets de bordures de chacune des sous parcelles.

Une autre limite du modèle est de ne pas permettre de prendre en compte l'effet du relief environnant. Selon la position (particulièrement du côté Est ou Ouest) et la hauteur, des collines ou montagnes à proximité peuvent avoir un impact sur le rayonnement reçu par la parcelle cible notamment en début et en fin de journée quand le soleil se trouve proche de l'horizon. Les parcelles, en particulier A+, sont entourées de montagnes qui sont susceptibles de projeter de l'ombre au lever et au coucher du soleil.

#### **4.1.5. LES MESURES DENDROMETRIQUES**

La collecte de données dendrométriques est soumise à des erreurs dites systématiques dues à l'appareil de mesures ou à l'opérateur et des erreurs aléatoires dues aux conditions de l'environnement lors des mesures. Quoique les données aient été collectées avec le souci de réduire au minimum les erreurs il n'en demeure pas moins que certaines peuvent échapper à l'attention. C'est le cas par exemple d'un arbre qui a une branche en excroissance ou une branche en dessous de la base du houppier. Selon les données requises par le modèle, il n'y a pas moyen de gérer ces cas de figure qui pourtant auront un impact sur les résultats.

### **4.2. LES INDICATEURS DE RAYONNEMENT TRANSMIS ET DE STRESS THERMIQUE**

#### **4.2.1. LA DEFINITION DE L'OMBRAGE**

La plupart des études sur les forêts et les systèmes agroforestiers considèrent l'ombrage comme un élément visuel défini indirectement par une faible intensité de lumière sous un couvert (Messier, 1992 ; Petritan *et al.*, 2007 ; Gaudio *et al.*, 2011). D'autres le définissent comme l'absence du rayonnement direct donc 100% de diffus (Meloni et Sinoquet, 1997 ; Béral *et al.*, 2018). Cette dernière définition, quoique basée sur le rayonnement direct reçu, ne convient pas à notre étude puisque nous évaluons l'ombrage au mètre carré et qu'il serait irréaliste de considérer l'ombrage comme étant une trame parfaitement continue sous une couverture poreuse. En effet, sur 1m<sup>2</sup> d'ombrage il peut y avoir quelques taches de lumière et une brebis qui a juste une petite tache de lumière directe projetée sur son corps ne peut pas être considérée automatiquement comme n'étant pas à l'ombre. Nous avons opté pour la définition du capteur BF5 qui a été calibré par son fabricant pour signifier la présence du soleil lorsque  $(R_{total}/R_{diffus} > 1.25)$  et  $R_{total} > 24 \text{ W/m}^2$  (Wood *et al.*, 2003). L'inverse de cet algorithme  $(R_{total}/R_{diffus} < 1.25)$  et  $R_{total} < 24 \text{ W/m}^2$  correspond à l'absence du soleil et donc de l'ombre. La deuxième partie de l'algorithme restreint l'ombrage à l'absence

de rayonnement direct même à découvert ( $R_{total} < 24 \text{ W/m}^2$ ). Nous n'avons considéré que la première partie de l'algorithme pour définir l'ombrage sous couvert et cette définition correspond aux résultats d'un test non publié qui a été réalisé en 2019 sur les brebis sur les parcelles A+ et AH. Ce test a comparé les données fournies par des observateurs (brebis à l'ombre ou au soleil) aux données mesurées par un capteur placé au garrot de l'animal. Il est arrivé à la conclusion que lorsque la brebis est à l'ombre le capteur indique un  $R_{diffus}$  et un  $R_{total}$  dont le rapport varie de 0.8 à 0.9 (Saudreau *et al.*, 2021).

#### 4.2.2. LE RAYONNEMENT TRANSMIS

La lumière qui parvient au sol d'une parcelle agroforestière dépend de la taille des arbres, de leur disposition, de leur phénologie (Talbot, 2011) mais également comme nous venons de le montrer dans cette étude, des caractéristiques topographiques de la parcelle (pente et exposition ; 3.2.2). Ne disposant pas de données sur la croissance et la phénologie des arbres nous avons simulé nos parcelles pour un âge fixe et seulement pour la saison estivale où le débourrement et le développement foliaire des arbres sont complets.

De manière générale, le rayonnement transmis est un indicateur important qui peut être utilisé pour étudier l'impact des arbres sur la composition floristique, la production, la phénologie, la valeur nutritive et la digestibilité de la strate herbacée (Balandier *et al.*, 2002 ; Gaudio *et al.*, 2011 ; Béral *et al.*, 2018) ou sur le rendement et la phénologie des cultures (Talbot, 2011). Il est d'autant plus intéressant quand il est cartographié à un mètre près sur la parcelle. Le  $R_{transmis}$  peut être piloté par la configuration des arbres et des interventions sylvicoles (éclaircie, émondage, élagage...) et ces interventions dépendent de l'objectif prioritaire poursuivi : production de bois, de fourrages ou de cultures ou d'abris pour les animaux ou une combinaison de plusieurs objectifs.

Plus de 80% de la superficie parcelle A+ reçoit moins de 50% de lumière. Sur la parcelle AH c'est la situation inverse avec beaucoup de lumière disponible (plus de 50% sur 92% de la surface de la parcelle) et très peu d'ombrage disponible pour les animaux. Pour remplir le rôle de production fourragère et d'abris, il faut donc trouver un compromis optimal entre la quantité d'ombrage et de fourrage nécessaires pour un nombre donné de brebis.

#### 4.2.3. INDICES DE STRESS THERMIQUE

Un autre indice, le « thermal-humidity index (THI), est parfois utilisé dans la littérature pour évaluer le stress thermique. Cet indice ne prend en compte que la température et l'humidité et est calculé selon la formule suivante tirée de Thom (1959):  $THI = 1,8 * TA - (1 - HR) * (TA - 14,3) + 32$  (Béral *et al.*, 2018). Contrairement au HLI (Heat load index), le THI ne tient pas compte de certains variables climatiques importantes telles que la charge solaire et la vitesse du vent (Gaughan *et al.*, 2008 ; Dikmen et Hansen, 2009). En outre, ne disposant pas de données de température et d'humidité spatialisée sur les parcelles, le THI horaire calculé serait homogène sur toute la parcelle. Ce qui ne traduit pas très bien la réalité car la couverture arborée n'est pas homogène sur les parcelles et que certains endroits reçoivent plus de rayonnement que d'autres. Le projet Parasol a rapporté que pendant la journée la température à l'ombre des arbres est inférieure à celle dans les trouées ou milieu des inter-rangs (Béral *et al.*, 2018).

Ainsi le HLI paraît plus intéressant que le THI car il permet d'intégrer plus de paramètres d'ambiance sur la parcelle et en particulier le rayonnement sur la parcelle. En effet, le rayonnement solaire direct a un effet considérable sur la thermorégulation des ruminants au pâturage (Gebremedhin 1985 cité par Bellagi, 2017) et il contribue beaucoup plus à la charge thermique que la température ambiante (Yamamoto *et al.*, 1994).

Le HLI a permis de faire ressortir cet effet tampon des arbres par la prise en compte du rayonnement au sol. L'inconvénient est que les seuils de stress du HLI ont été fixés pour des bovins et que leur transposition à des ovins n'a pas été vérifiée. Il faut donc des études supplémentaires pour fixer les seuils de stress pour les ovins.

### **4.3. COUPLAGE DES INDICATEURS A D'AUTRES DONNEES SPATIALISEES SUR LES PARCELLES**

Les indicateurs spatialisés élaborés dans cette étude sont géoréférencés et peuvent être superposés à d'autres informations spatialisées sur la parcelle. La jointure entre les cartographies horaires d'ombrage et la position des brebis présentée à la section 3.4 en est un exemple. Toutefois, les données de positionnement des brebis, collectées au GPS, peuvent comporter des erreurs de positionnement de 0 à 3 mètres. Sur 3 mètres, il est possible qu'une brebis se trouve à l'ombre alors que sa position GPS indique le contraire. L'inverse est tout aussi bien possible. Il faudra donc analyser de plus près le risque d'erreur et trouver un moyen de les minimiser.

### **4.4. EVALUATION DES INDICATEURS**

Les indicateurs ont été estimés pour une journée du mois de juillet et se limitent à l'été. Il est possible de simuler l'évolution temporelle de ces indicateurs tout au long de la saison de pâturage car le modèle offre la possibilité de prendre en compte la phénologie (de Wergifosse *et al.*, 2020). Toutefois cela nécessiterait l'acquisition de données sur le processus de débournement et de développement foliaire des espèces qui ne sont pas disponibles pour l'instant.

#### **4.4.1. ORIENTATION DES RANGEES D'ARBRES**

Tout comme la présence, la configuration des arbres sur une parcelle offre des avantages et des inconvénients. Sur une parcelle avec des arbres orientés Nord-Sud, la répartition spatiale de la lumière dans les inter-rangs est plus homogène que sur une configuration Est-Ouest. Ce cas de figure a été déjà constaté dans des études sur plantation agroforestière (Leroy *et al.*, 2009 ; Montero *et al.*, 2008 ; Talbot, 2011). La parcelle Nord-Sud présente un excès d'ombrage en début et en fin de journée. La parcelle A+ présente les mêmes effets que la configuration Est-ouest car les rangées d'arbres se rapprochent de l'orientation Est-ouest.

La configuration Nord-Sud serait plus appropriée pour les systèmes avec des cultures en sous étages car dans le cas contraire (Est-Ouest), l'ombre est portée sur les inter-rangs où se trouvent les cultures. En effet, il a été démontré que sur une parcelle Est-Ouest le rendement d'une culture de blé dur est très hétérogène dans un inter-rang et le gradient

entre la zone de faible et de fort rendement est très élevé alors que pour une parcelle Nord-sud, le rendement est moins hétérogène (Talbot, 2011).

Dans les systèmes d'élevage, la configuration peut au contraire offrir deux principaux avantages : i) l'ombrage est mieux réparti sur la journée car les fluctuations sont moins élevées entre début, mi et fin de journée que la configuration Nord-Sud ; ii) l'ombrage dans les inter-rangs permet de créer une hétérogénéité et un gradient de maturation de l'herbe permettant ainsi d'augmenter la durée de la disponibilité de l'herbe sur la parcelle en été (Béral *et al.*, 2018).

#### 4.4.2. PENTE ET EXPOSITION

La pente et l'exposition influencent la quantité et la répartition spatio-temporelle du rayonnement au sol sur une parcelle agroforestière. Ce cas de figure a été également démontré pour une forêt hétérogène d'épicéa (Courbaud *et al.*, 2003). Il faut remarquer que si le transmis est moins influencé par la pente lorsque celle-ci et les rangées d'arbres sont orientées dans le même sens, il n'est pas de tout avantage d'adopter cette configuration. En effet, lorsque la pente est élevée et dans un milieu soumis au risque d'érosion hydrique, planter les rangées d'arbres dans le sens de la pente peut accélérer le processus d'érosion hydrique des sols en canalisant le ruissellement dans les inter-rangs (CTA, 1996 ; Smith Dumont *et al.*, 2021). Ne pouvant pas modifier la pente, la configuration des arbres et les interventions sylvicoles sont les leviers pour piloter le pourcentage et la répartition spatio-temporelle du rayonnement qui arrivent sur la parcelle. L'état du couvert herbacé est aussi un moyen de pallier les contraintes de configuration dans la prévention de l'érosion hydrique.

## 5. CONCLUSION

Les indicateurs ont été calculés pour la saison estivale car c'est la période d'intérêt pour le projet en raison de sa localisation et de ses conditions climatiques. Toutefois, il est nécessaire d'étudier une période plus longue pour d'autres zones géographiques où l'occurrence de stress thermique est plus importante (de mai à octobre). Mais pour cela, il faudra aller vers de la collecte de données plus conséquente en terme de temps d'acquisition et de quantité notamment pour la prise en compte de la phénologie et l'évolution du couvert sur le long terme.

Entre autre, comme Capsis ainsi que Heterofor sont de base dédiés à la sylviculture, il sera possible de tester différents itinéraires techniques (élagage, éclaircies), leurs effets combinés avec différentes modalités d'agencement d'arbres selon la pente et l'exposition de la parcelle.

Les résultats fournis à ce niveau quoique satisfaisant pour le projet peuvent être améliorés d'une part par la collecte des données spécifiques pour calibrer le modèle au contexte agroforestier et d'autre part, par l'amélioration du modèle pour prendre en compte les ruptures de pente et la présence de montagne environnante. Ainsi, ce travail reste une première analyse qui montre qu'il est possible de mobiliser Heterofor pour simuler le transfert de lumière en contexte agroforestier et qui propose quelques indicateurs qui peuvent être mobilisés pour la prise de décision.

## 6. REFERENCES

- Balandier P., Rapey H., Ruchaud F., et Montard F.X. de. 2002. Agroforesterie en Europe de l'Ouest: pratiques et expérimentations sylvopastorales des montagnes de la zone tempérée. *Cahiers Agricultures*, 11(2), p. 103. Disponible sur : <https://hal.inrae.fr/hal-02670763>
- Becker C.A., Collier R.J., et Stone A.E. 2020. Invited review: Physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 103(8). Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030220303829>
- Bellagi R. 2017. Etude de l'adaptation de la race Tarentaise aux conditions du stress thermique en Tunisie. (Thèses). Université de Carthage (Tunisie) Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01781295>
- Benavides R., Douglas G., et Osoro K. 2008. Silvopastoralism in New Zealand: Review of effects of evergreen and deciduous trees on pasture dynamics. *Agroforestry Systems*, 76. DOI : 10.1007/s10457-008-9186-6
- Bennett N.D., Croke B., Guariso G., Guillaume J., Hamilton S., Jakeman A.J., et Andréassian V. 2013. Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling Software*, p. 1-20. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>
- Benquet J.-C. 2020. Challenge 1 : Agro-écosystèmes durables dans un contexte de changement global. Dans : I-SITE CAP 20-25 [En ligne]. Jean-Christophe BENQUET Disponible sur : <https://cap2025.fr/recherche/challenges-scientifiques/les-agroecosystemes-durables-dans-un-contexte-de-changement-global> (Consulté le 4 avril 2021).
- Béral C., Andueza D., Ginane C., Bernard M., Liagre F., Girardin N., Emile J.C., Novak S., Grandgirard D., Deiss V., Bizeray-Filoche D., Moreau J.C., et Pottier E. 2018. PARASOL : agroforesterie en système d'élevage ovin - Étude de son potentiel dans le cadre de l'adaptation au changement climatique. *Agrooof ; Inra ; Idele ; unilasalle*, Disponible sur : <https://hal.inrae.fr/hal-02932381>
- Boudon F., Nouguier C., et Godin C. 2001. GEOM Module manual: I User guide. Disponible sur : [hal-00827471](https://hal.inrae.fr/hal-00827471)
- Canham C.D., Coates K.D., Bartemucci P., et Quaglia S. 1999. Measurement and modeling of spatially explicit variation in light transmission through interior cedar-hemlock forests of British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(11). Disponible sur : <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/x99-151>

- Coligny F. 2021. Presentation [Capsis]. Dans : CAPSIS, Computer-Aided Projection of Strategies In Silviculture (en) [En ligne]. Disponible sur : <http://capsis.cirad.fr/capsis/presentation> (Consulté le 10 mai 2021).
- Courbaud B., de Coligny F., et Cordonnier T. 2003. Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116(1-2). Disponible sur : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016819230200254X>
- Courbaud B., Jonard M., Ligot G., Coligny F. De, et Dones N. 2012. Samsaralight [Capsis]. Dans : CAPSIS [En ligne]. Disponible sur : [http://capsis.cirad.fr/capsis/help\\_en/samsaralight](http://capsis.cirad.fr/capsis/help_en/samsaralight) (Consulté le 24 août 2021).
- CTA 1996. L'agroforesterie pour la conservation du sol. Technical Centre for Agricultural and Rural, 318 p. Disponible sur : <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/61336>
- Das R., Sailo L., Verma N., Bharti P., Saikia J., Imtiwati, et Kumar R. 2016. Impact of heat stress on health and performance of dairy animals: A review. *Veterinary world*, DOI : 10.14202/vetworld.2016.260-268
- Davydenko A. Et Goodwin P. 2021. Assessing point forecast bias across multiple time series: Measures and visual tools. *International Journal of Statistics and Probability*, 10(5). Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03359179>
- Dikmen S. Et Hansen P.J. 2009. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment? *Journal of Dairy Science*, 92(1). Disponible sur : [https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(09\)70315-7/fulltext#relatedarticles](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(09)70315-7/fulltext#relatedarticles)
- DRIAS. 2021. DRIAS, Les futurs du climat. Disponible sur : <http://www.drias-climat.fr/> (Consulté le 8 septembre 2021).
- Dufour-Kowalski S., Courbaud B., Dreyfus P., Meredieu C., et de Coligny F. 2012. Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of Forest Science*, 69(2). Disponible sur : <http://link.springer.com/10.1007/s13595-011-0140-9>.
- Duthoit S. 2006. Prise en compte de l'agrégation des cultures dans la simulation du transfert radiatif : importance pour l'estimation de l'indice foliaire (LAI), de la parcelle au paysage. (phdthesis). Université Paul Sabatier - Toulouse III Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00135752>
- Finocchiaro R., Kaam J.B.C.H.M. van, Portolano B., et Misztal I. 2005. Effect of Heat Stress on Production of Mediterranean Dairy Sheep. *Journal of Dairy Science*,

88(5). Disponible sur : [https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(05\)72860-5/abstract](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(05)72860-5/abstract)

Gaudio N., Balandier P., Dumas Y., et Ginisty C. 2011. Growth and morphology of three forest understorey species (*Calluna vulgaris*, *Molinia caerulea* and *Pteridium aquilinum*) according to light availability. *Forest Ecology and Management*, 261(3). Disponible sur : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112710006584>.

Gaughan J., Mader T., Holt S., et Lisle A. 2008. A New Heat Load Index for Feedlot Cattle. *Journal of animal science*, 86. DOI : 10.2527/jas.2007-0305

Gersonde R., Battles J., et O'Hara K. 2004. Characterizing the light environment in Sierra Nevada mixed-conifer forests using a spatially explicit light model. *Canadian Journal of Forest Research*, 34. DOI : 10.1139/x04-013

Hu R., Bournez E., Cheng S., Jiang H., Nerry F., Landes T., Saudreau M., Kastendeuch P., Najjar G., Colin J., et Yan G. 2018. Estimating the leaf area of an individual tree in urban areas using terrestrial laser scanner and path length distribution model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271618302077>

Hu R., Yan G., Nerry F., Liu Y., Jiang Y., Wang S., Chen Y., Mu X., Zhang W., et Xie D. 2018. Using Airborne Laser Scanner and Path Length Distribution Model to Quantify Clumping Effect and Estimate Leaf Area Index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(6). DOI : 10.1109/TGRS.2018.2794504

INPN 2021. Inventaire National du Patrimoine Naturel - Données et outils. Dans : INPN [En ligne]. Disponible sur : <https://inpn.mnhn.fr/accueil/donnees-referentiels> (Consulté le 6 juin 2021).

IPCC 2021. Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)] (AR6). Cambridge University Press, Disponible sur : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#fullreport>

IPCC 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. Van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. (Special Report 2019). Disponible sur : <https://www.ipcc.ch/srccl/>

- IPCC 2018. Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. 630 p. Disponible sur : <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Jonard M., André F., de Coligny F., de Wergifosse L., Beudez N., Davi H., Ligot G., Ponette Q., et Vincke C. 2020. HETEROFOR 1.0: a spatially explicit model for exploring the response of structurally complex forests to uncertain future conditions – Part 1: Carbon fluxes and tree dimensional growth. *Geoscientific Model Development*, 13(3). Disponible sur : <https://gmd.copernicus.org/articles/13/905/2020/>
- Laurence S. Et Pottier E. 2011. Note d'état corporel des brebis : grille de notation et recommandations. Disponible sur : <http://www.inn-ovin.fr/note-detat-corporel-brebis-grille-de-notation-recommandations/>
- Leroy C. 2005. Rôle de l'architecture dans l'interception lumineuse des couronnes de *Tectona grandis* et *Acacia mangium*. Utilisation pour la simulation des bilans radiatifs dans les systèmes agroforestiers. (phdthesis). Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00012166>
- Leroy C., Sabatier S., Wahyuni N., Jean-François B., Dauzat J., Laurans M., et Auclair D. 2009. Virtual trees and light capture: A method for optimizing agroforestry stand design. *Agroforestry Systems*, 77. DOI : 10.1007/s10457-009-9232-z
- Ligot G., Balandier P., Courbaud B., et Claessens H. 2014b. Forest radiative transfer models: which approach for which application? *Canadian Journal of Forest Research*, 44(5). Disponible sur : <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/cjfr-2013-0494>
- Ligot G., Balandier P., Courbaud B., Jonard M., Kneeshaw D., et Claessens H. 2014a. Managing understory light to maintain a mixture of species with different shade tolerance. *Forest Ecology and Management*, 327. Disponible sur : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112714002904>
- Medria. 2021. Conduite & Bien-être - Medria. Disponible sur : <https://www.medria.fr/solutions/conduite-bien-etre.html> (Consulté le 10 avril 2021).

- Meloni S. Et Sinoquet H. 1997. Assessment of the spatial distribution of light transmitted below young trees in an agroforestry system. *Annales des Sciences Forestières*, 54(4). Disponible sur : <http://www.afs-journal.org/10.1051/forest:19970401>.
- Messier C. 1992. Effects of neutral shade and growing media on growth, biomass allocation, and competitive ability of *Gaultheria shallon*. *Canadian Journal of Botany*, 70. DOI : 10.1139/b92-282
- Météo-France. 2021. Le climat futur en France. Dans : Météo-France [En ligne]. Disponible sur : <https://meteofrance.com/changement-climatique/quel-climat-futur/le-climat-futur-en-france> (Consulté le 7 septembre 2021).
- Molterer W. 1998. DIRECTIVE 98/58/CE DU CONSEIL du 20 juillet 1998 concernant la protection des animaux dans les d'élevages. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?Uri=celex%3A31998L0058> (Consulté le 10 avril 2021).
- Montero M., Moreno G., et Bertomeu M. 2008. Light distribution in scattered-trees open woodlands in Western Spain. *Agroforestry Systems*, 73. DOI : 10.1007/s10457-008-9143-4
- Niinemets Ü. 2010. A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. *Ecological Research*, 25(4). Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1007/s11284-010-0712-4>
- Nock C.A., Caspersen J.P., et Thomas S.C. 2008. Large Ontogenetic Declines in Intra-Crown Leaf Area Index in Two Temperate Deciduous Tree Species. *Ecology, Ecological Society of America*, 89(3). Disponible sur : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/07-0531.1>
- Petritan A.M., Lüpke B., et Petritan I. 2007. Effects of shade on growth and mortality of maple (*Acer pseudoplatanus*), ash (*Fraxinus excelsior*) and beech (*Fagus sylvatica*) saplings. *Forestry*, 80. DOI : 10.1093/forestry/cpm030
- Pragna P., Archana P.R., Aleena J., Sejian V., Krishnan G., Bagath M., Manimaran A., Bhatta R., Beena V., Kurien E.K., et Varma G. 2017. Heat Stress and Dairy Cow: Impact on Both Milk Yield and Composition. *International Journal of Dairy Science*, 12. Disponible sur : <https://scialert.net/abstract/?Doi=ijds.2017.1.11>
- Rojas-Downing M.M., Nejadhashemi A.P., Harrigan T., et Woznicki S.A. 2017. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221209631730027X>

- Saudreau M., Marquier A., Ginane C., Deiss V., Meunier B., Andueza D., Lardy R., Delahaye Q., Bernard M., Note P., et Russias R. 2021. Séminaire du livrable agroforesteries de l'i-site CAP 20 25 ACTION2. Présenté à : INRAE. Disponible sur : Non publié
- Silanikove N. 2000. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livestock Production Science*, 67(1). Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301622600001627>
- Smith Dumont E., Bonhomme S., et Mohamed M. 2021. Guide technique d'agroforesterie pour la sélection et la gestion des arbres aux Comores Île d'Anjouan Version 1.2. *World Agroforestry*, 84 p.
- Talbot G. 2011. L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales : une clef pour en comprendre la productivité? (phdthesis). Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00664530>
- Thom E.C. 1959. The Discomfort Index. *Weatherwise*, 12(2). Disponible sur : <https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>
- De Wergifosse L., André F., Beudez N., de Coligny F., Goosse H., Jonard F., Ponette Q., Titeux H., Vincke C., et Jonard M. 2020. HETEROFOR 1.0: a spatially explicit model for exploring the response of structurally complex forests to uncertain future conditions – Part 2: Phenology and water cycle. *Geoscientific Model Development*, 13(3). Disponible sur : <https://gmd.copernicus.org/articles/13/1459/2020/>
- Wood J., Muneer T., et Kubie J. 2003. Evaluation of a New Photodiode Sensor for Measuring Global and Diffuse Irradiance, and Sunshine Duration. *Journal of Solar Energy Engineering*, 125, n° 1. DOI : 10.1115/1.1531149
- Yamamoto S., Young B., Purwanto B., Nakamasu F., et Matsumoto T. 1994. Effect of solar radiation on the heat load of dairy heifers. *Australian Journal of Agricultural Research - AUST J AGR RES*, 45. DOI : 10.1071/AR9941741

## 7. LISTE DES ABREVIATIONS

- AMAP : botAnique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations
- BGT : Black globe temperature
- CAP (20-25) : Clermont Auvergne Project (2020-2025)
- CAPSIS : Computer-Aided Projection of Strategies In Silviculture
- DRIAS : Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements
- HETEROFOR : Heterogenous forest
- HLI : Heat load index
- HR : Humidité relative
- IPCC : Intergorvenmental Panel on Climate Change
- LAD : Leaf area density
- LAI : Leaf area index
- LiDAR : Light Detection and Ranging
- MADD : Modèle arbres dépendants des distances
- MAID : Modèle arbres indépendants des distances
- MEA : Micro Environnement et Arbres
- NEC : Note d'état corporel
- PAR : Photosynthetically active radiation
- PIAF : Physique et Physiologie Intégratives de l'arbre en environnement Fluctuant
- RCP : Representative Concentration Pathways
- SSP : Shared Socioeconomic Pathwaths
- THI : Thermal-humidity index
- TA : Température ambiante
- UE : Unité expérimentale
- UMR : Unité mixte de recherche



## 8. TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Espèces d'arbres présentes sur et en bordure des parcelles .....	11
Tableau 2 : Matrice de test de sensibilité des indicateurs aux effets de la pente et de l'exposition.....	22

## 9. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution de la température de la planète par rapport à 1850-1900 (IPCC, 2021) .....	6
Figure 2 : Ecart de température moyenne (°C) en France par rapport à 1976-2005 pour le RCP8.5 : Scénario sans politique climatique .....	7
Figure 3 : Dispositif expérimental à Theix : parcelle A+ (arbres intra-parcellaires) ; parcelle A0 (un arbre) ; parcelle AH (arbres en haie haute) .....	10
Figure 4 : Equipements de mesure sur le dispositif expérimental à Theix .....	11
Figure 5 : Station météo sur la parcelle A+ .....	13
Figure 6 : Illustration de la procédure de traitement et d'analyse des données .....	14
Figure 7 : Interception lumineuse selon l'approche Beer Lambert .....	16
Figure 8 : Visualisation des capteurs sur les parcelles à partir d'une représentation 3D d'une scène issue de Copsis-Heteroform .....	18
Figure 9 : Parcelles fictives pour tester la sensibilité des indicateurs.....	21
Figure 10 : Exemple de positionnement toutes les 30 secondes de 3 brebis sur leur parcelle respective.....	23
Figure 11 : PAR mesuré versus PAR simulé sur les parcelles A+ et AH.....	24
Figure 12 : Comparaison du PAR estimé par les deux méthodes sur les deux parcelles ...	25
Figure 13 : Tendances du PAR mesuré et simulé par capteur sur la parcelle A+ .....	25
Figure 14 : Tendances du PAR observé et simulé sur la parcelle AH .....	25
Figure 15 : Comparaison des indicateurs selon l'orientation des rangées d'arbres .....	26
Figure 16 : Variation du pourcentage de surface à l'ombre en fonction de la pente, de l'exposition et de l'orientation des rangées d'arbres .....	28
Figure 17 : Variation du pourcentage de surface à l'ombre en fonction de l'exposition pour une pente fixe .....	29
Figure 18: Rayonnement incident et température sur la station de référence (20/07/2021) .....	30
Figure 19 : Cartographie horaire (7h-18h) de l'ombrage sur A+ (20 juillet 2021) .....	31
Figure 20 : Pourcentage de surface à l'ombre (a) et cartographie de la durée à l'ombre (b) sur la parcelle A+ pour la journée du 20 juillet 2021.....	32
Figure 21: Cartographie du coefficient de transmis sur la parcelle A+ (20/07/2021-7-19h) .....	32
Figure 22: Cartographie horaire du HLI sur la parcelle A+ (20 juillet 2021) .....	33
Figure 23: Cartographie horaire de l'ombrage sur la parcelle AH (20 juillet 2021).....	34

Figure 24 : Pourcentage de surface à l'ombre (a) et cartographie de la durée à l'ombre (b) sur la parcelle AH pour la journée du 20 juillet 2021 .....35  
Figure 25: Cartographie du transmis sur la parcelle AH (20/07/2021\_7-17h) .....35  
Figure 26 : Cartographie horaire du HLI sur la parcelle AH (20 juillet 2021) .....36  
Figure 27 : Temps passé à l'ombre par 6 brebis sur la parcelle A+ le 20 juillet 2021.....37

## 10. ANNEXES

### TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Mesures sur les arbres de la parcelle A+ (bordure incluse) .....55  
Annexe 2: Mesures sur les arbres de la parcelle AH (bordure incluse) .....56  
Annexe 3: LAD et porosité des espèces .....56  
Annexe 4 : Interface de modélisation et simulation sur Heteroform .....57  
Annexe 5 : Géoréférencement de la parcelle et des indicateurs spatialisés .....58  
Annexe 6 : Données météo du 17 juillet 2019 sur le site expérimental à Theix .....60  
Annexe 7: Effets combinés de la pente et de l'exposition sur le transmis .....61  
Annexe 8 : Effet de l'exposition pour une pente constante .....62  
Annexe 9: Données météo du 20 juillet 2021 sur le site expérimental à Theix .....63

## ANNEXE 1 : MESURES SUR LES ARBRES DE LA PARCELLE A+ (BORDURE INCLUSE)

#id	Especies id	x	y	gbh (cm)	htot (m)	hlce (m)	hcb (m)	rnorth (m)	reast (m)	rsouth (m)	rwest (m)
205	1	105.5	22	152.470	12.9	6.2	2.2	5.2	3.7	4.4	4.6
207	1	120.535	27.472	164.724	11.9	5.6	1.6	5.1	4.45	4.75	4.25
209	1	135.57	32.944	190.985	14.5	7.6	3.6	4.6	3.65	3.15	3.3
213	1	126.5	42.2	199.580	13.8	7.4	3.4	6.05	5.15	4.45	4.05
217	1	94.5	30.69	185.415	14.3	7.4	3.4	5.4	4.4	4.9	4.4
218	1	82.5	39	113.477	14.3	6.2	2.2	3.7	2.9	3.65	3.1
219	1	90.017	41.736	187.643	16.1	6.6	2.6	5.6	4.4	4.3	4.65
221	1	105.052	47.208	149.605	11.7	7.4	3.4	4.15	3.2	3.2	3.2
222	1	112.569	49.944	93.1056	11.5	7.6	3.6	3.15	2.7	2.3	2.4
223	1	120.086	52.68	188.598	14.5	6.4	2.4	5.65	4.8	4.85	3.8
224	1	127.603	55.416	123.185	13.4	7.2	3.2	3.6	3.15	3.4	3.4
225	1	115.552	64.208	175.229	16.7	7	3	5.45	4.35	4.2	4.2
226	1	108.035	61.472	197.829	16.4	7.2	3.2	4.45	4.2	4.7	4.4
228	1	93	56	119.047	11.8	6.8	2.8	3.7	3.35	3.25	3.2
231	1	66.5	59	182.073	14.5	6.1	2.1	5.5	4.35	4.8	5
233	1	81.535	64.472	187.007	14.6	9.4	5.4	4.8	2.5	3	3.1
234	1	89.052	67.208	194.487	16.3	5.7	1.7	5	4.5	4.65	4.5
236	1	104.087	72.68	191.787	18	6.7	2.7	4.9	4.5	4.8	4.85
237	1	111.604	75.416	146.422	15.9	6.9	2.9	5.25	4.35	4.2	4
238	1	100.086	83.68	170.295	17.1	7.2	3.2	4.2	4.7	4.6	4
239	1	92.569	80.944	212.312	16.1	6.8	2.8	6.8	4.8	4.7	5.5
241	1	77.534	75.472	203.240	15.9	7	3	6.1	6	4.4	4.4
242	1	70.017	72.736	199.421	16.8	5.4	1.4	6.8	5.5	5.1	4.8
243	1	62.5	70	221.702	16.7	9	5	6.15	4.3	4.35	5.5
244	1	51	78.5	207.219	17.6	6.7	2.7	5.2	4.3	5.5	3.8
245	1	58.517	81.236	176.980	15.8	6.2	2.2	4.7	4.25	4.8	4.5
246	1	66.034	83.972	139.260	14.7	6.9	2.9	4.35	3.15	4.25	4.15
247	1	73.551	86.708	188.280	14.9	8.3	4.3	5.15	4.4	4.6	5.1
248	1	81.068	89.444	171.883	17.7	6.5	2.5	5	4.4	4.5	4.7
249	1	88.585	92.18	173.478	15.7	8.5	4.5	5.3	4	4.6	4.4
251	1	77.068	100.944	184.142	15.6	8.6	4.6	4.5	4.45	3.5	4.85
252	1	69.551	98.208	134.804	14.7	9.7	5.7	3.4	3.6	2.85	3.4
253	1	62.034	95.472	204.673	16.5	7.8	3.8	5.8	5.15	5.15	5.2
254	1	54.517	92.736	128.915	15.4	6.8	2.8	4.3	3.8	4.45	3.3
255	1	47	90	218.201	16.6	7	3	6.2	5.1	5.3	4.9
256	1	35.5	99	248.918	20.2	6.2	2.2	8	5.4	6.05	5.8
257	1	43.017	101.736	225.681	18	7.8	3.8	6.7	5.35	6	4.5
258	1	50.534	104.472	163.770	17	7.3	3.3	4.7	4.2	4.8	4.2
259	1	58.051	107.208	210.243	17.1	7.5	3.5	6.5	4.9	5.55	5.3
260	1	65.568	109.944	228.069	18.9	7.1	3.1	6.05	5.2	6.2	4.8
261	1	73.085	112.68	230.615	18.3	7.6	3.6	6.6	6.6	5.5	4.4
264	2	61.086	120.68	179.845	15	6.2	2.2	6.1	4.9	5.4	3.7
265	2	53.569	117.944	216.291	15.6	6.5	2.5	5.4	5.05	5.5	5.05
266	2	46.052	115.208	185.893	16.9	7	3	4.2	3.85	4.5	4.25
268	2	31.017	109.736	192.1	19.3	7.8	3.8	6.3	6.1	5.3	3.9
269	2	25.37	107	207.697	14.3	7.3	3.3	5.5	3	6	5.2
270	2	20.43	119	182.073	14.9	8.2	4.2	4.25	5.6	4.85	4.05
274	2	49.57	129.944	276.133	17.9	6.6	2.6	6	6.5	6.7	5.6
276	2	45.052	140.208	201.649	15.9	7	3	6.2	5.8	6.8	4.8
277	2	37.535	137.472	201.331	15.4	6	2	5.7	4.7	5.4	5.2
279	2	22.5	132	205.309	15.9	6.2	2.2	4.5	4	4.7	4.4
280	3	23.5	94	135	16.6	5	3.4	5.8	5.45	5.7	7
281	4	35.5	81	135	11.5	5	1	3.8	3.8	3.8	3.8
282	3	42.5	69	135	14.4	5	1	6.4	6.4	6.4	6.4
283	4	58.5	60	135	7.1	5	1	3	3	3	3
284	3	58.5	51	135	17	5	1	9.2	9.2	9.2	9.2
285	3	64.5	37	135	18.8	5	1	8	8	8	8
286	6	64.5	31	135	19.3	5	1	7	7	7	7
287	3	83.5	21	135	17.2	5	1	4	4	4	4
288	3	86.5	8	135	18.8	5	1	8	8	8	8
289	3	103.5	4	135	24	5	1	5	5	5	5
290	5	115.5	11	135	15.6	5	1	5.4	5.4	5.4	5.4
291	3	132.5	10	135	16.1	5	1.6	5	3.7	5	3.2
292	3	96.5	6	135	21.4	5	1	6.5	6.5	6.5	6.5
293	3	73.5	24	135	19.05	5	1	7.5	7.5	7.5	7.5
294	3	79.5	12	135	19.05	5	1	7.5	7.5	7.5	7.5
295	3	61.5	44	135	17.9	5	1	8.6	8.6	8.6	8.6
296	3	51.5	66	135	15.7	5	1	7.8	7.8	7.8	7.8
297	3	39.5	75	135	12.95	5	1	5.1	5.1	5.1	5.1
298	3	28.5	87	135	14.05	5	2.2	4.8	4.625	4.75	5.4
400	6	94.5	119	289	18.9	5	2.4	8.4	7.9	9.6	8.7
401	7	112.5	91	300	19.2	3	1.7	6.7	6.5	8.3	8.3
402	7	125.5	79	300	21.5	3.5	2.3	13	9.7	11.5	15.3

Espèces id : 1 Prunus avium ; 2 Acer pseudoplatanus; 3 Fraxinus Excelsior ; 4 Corylus Avellana ; 5 Salix Caprea ; 6 Quercus petraea ; 7 Castanea sativa

Chelton DESARMES

Mémoire de stage master ST2AE - GEEFT 2020-2021

Simulation de la dynamique spatiale et temporelle du rayonnement transmis par une strate arborée d'une parcelle agroforestière  
Confort thermique des ruminants en sylvopastoralisme

**ANNEXE 2: MESURES SUR LES ARBRES DE LA PARCELLE AH (BORDURE INCLUSE)**

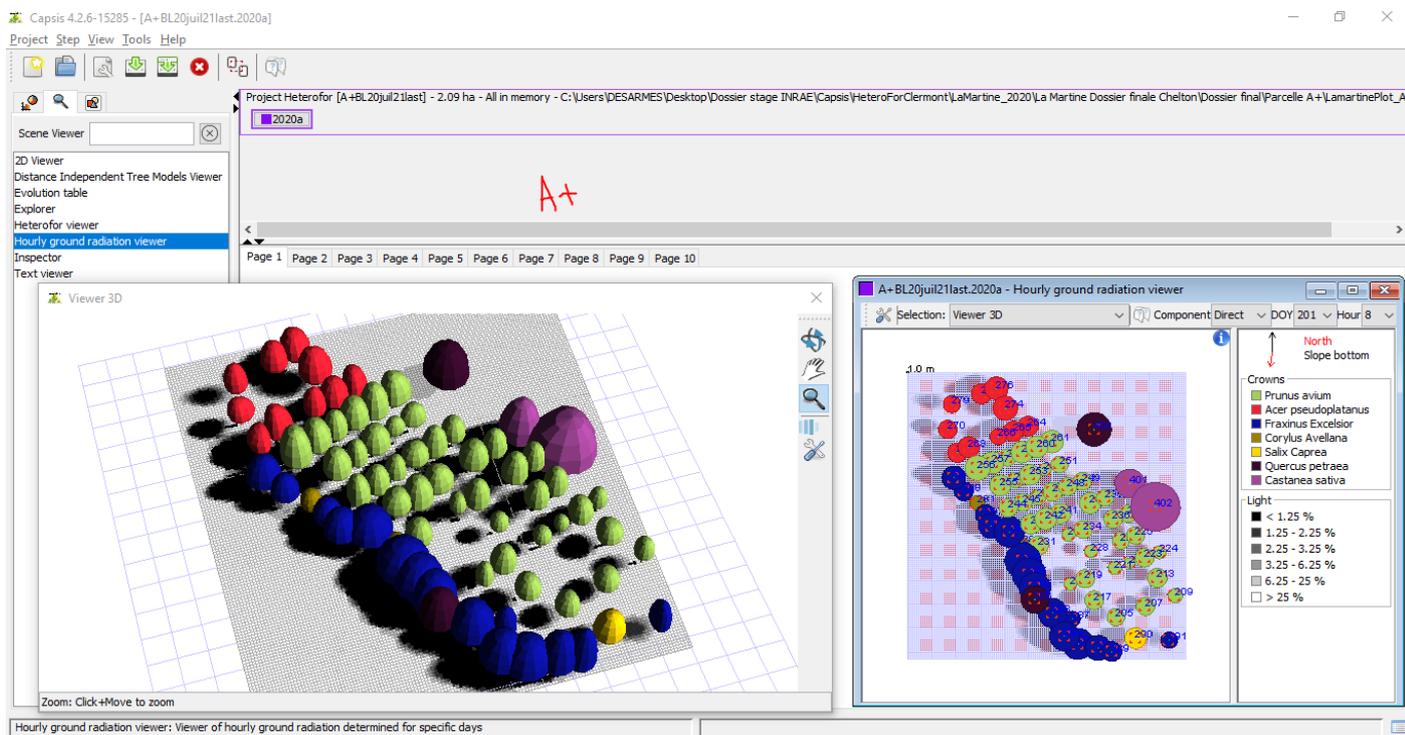
#Id	Espèces id	X	Y	gbh (cm)	htot (m)	hlce (m)	hcb (m)	rnorth (m)	reast (m)	rsouth (m)	rwest (m)
1	3	-0.77445	5.142007	91.354	14.3	9.5	4.5	5.15	5	5.25	6.9
2	3	-3.37727	14.48627	73.529	19.6	8.7	3.7	6.4	7.3	2.5	5.7
3	3	-4.21972	17.72861	79.259	24.9	10.2	5.2	5.3	7.6	7.8	6.5
4	3	-6.74204	26.78388	104.083	26.5	8.1	3.1	5.4	10.1	9.5	7
5	3	-10.0993	39.70485	69.709	17.3	8.6	3.6	5.1	6.1	3.3	6.6
6	3	-11.8596	46.47989	76.076	22.2	8.9	3.9	6.3	7.5	7.3	7.3
7	3	-14.289	54.15456	77.985	20.1	8.3	3.3	3	4.5	5.3	3.5
8	3	-14.6034	56.88653	50.611	20.2	6.9	1.9	1.5	5.5	5.1	6.2
9	3	-16.4118	61.97474	67.481	16.9	8.6	3.6	3.5	5.1	4.1	5.3
10	2	-14.1323	65.56175	40.107	19.3	7.7	2.7	4.8	7.3	4	5
11	3	-12.0433	70.15942	50.611	19.9	11.1	6.1	4.9	5.8	1	2.8
12	3	-10.5557	72.41261	70.983	23.7	11.2	6.2	4.5	7.8	8.8	9.1
13	3	-5.03184	77.48581	74.484	22	6.2	1.2	6.8	7.3	8	9
14	3	9.120573	88.76939	49.974	18.3	8.4	3.4	5.9	6.3	5.6	4.4
15	3	-1.29E+01	15.1174	70	21	10.3	5.3	7.7	5	7	6.7
16	3	-15.6782	24.31897	67	19.5	9.4	4.4	5.6	3.2	9.1	8.4
17	3	-23.7751	51.54028	69	20.4	9.5	4.5	10.7	6.5	5	8.1
18	3	-24.9155	55.37426	75	24.8	9.2	4.2	4.3	5.1	5.6	6.7
19	3	67.53451	4.93E+01	94.856	18.7	8.6	3.6	8	5.5	6.2	7.5
20	3	57.5	44.3032	80.532	22.3	8.9	3.9	1.6	9	13.4	10.4
21	3	46.37843	31.9494	87.853	25	10.2	5.2	3.2	7	4	11.5
22	3	44.53131	24.21696	79.895	24.9	10	5	9	4	4.8	9.9
23	3	40.62222	15.61338	57.295	22	11.1	6.1	6.9	4	2.5	7
24	3	41.94109	2.07748	105.04	23	7.3	2.3	10.6	6.2	9	9.4
25	3	93.9	8.38E+01	55	14.5	7.1	2.1	4.2	5.8	5.5	4.4

**ANNEXE 3: LAD ET POROSITE DES ESPECES**

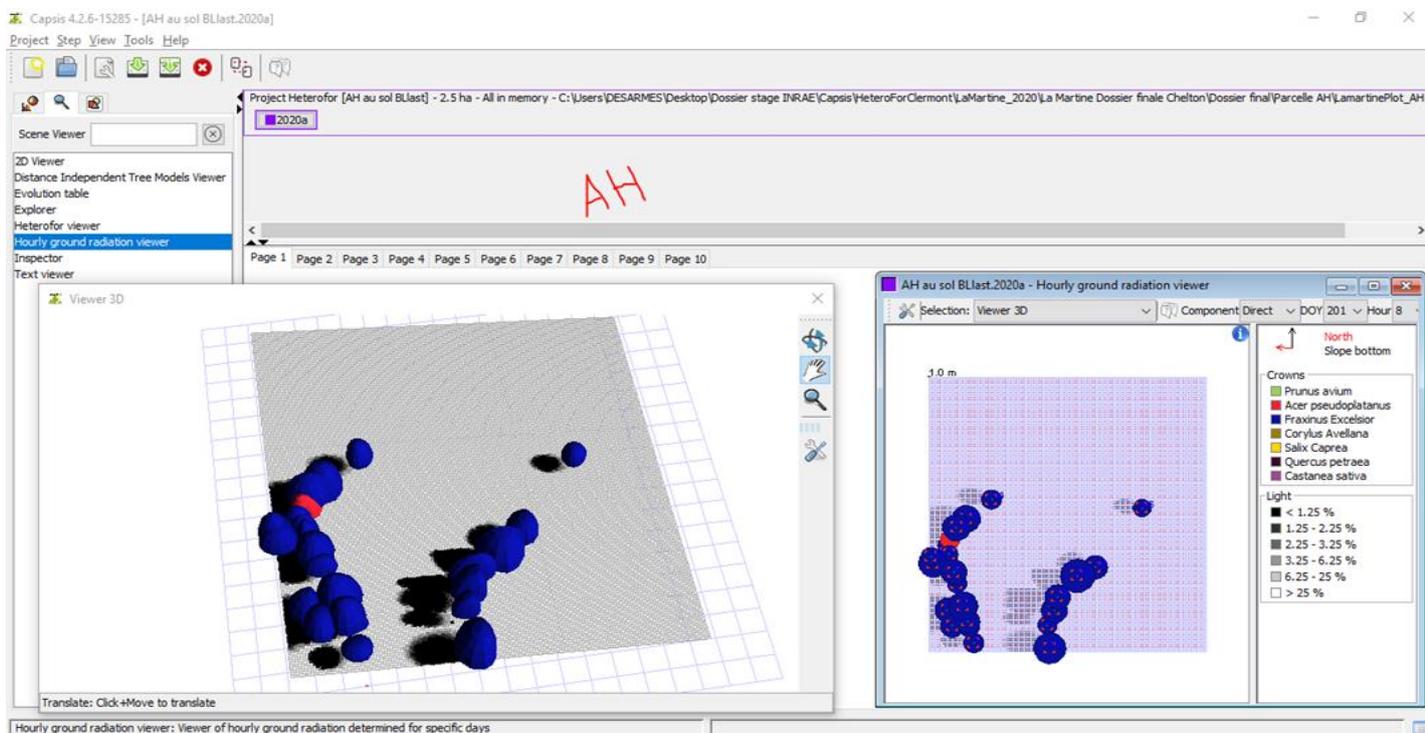
# species Id	Noms	Hauteur max(m)	Rayon max couronne(m)	LAD (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	k	Ω	Porosité I/Io
1	<i>Prunus avium</i>	30	10	0.57	0.5	1	0.10
6	<i>Quercus petraea</i>	40	10	0.73	0.5	1	0.11
3	<i>Fraxinus Excelsior</i>	40	10	0.45	0.5	1	0.19
4	<i>Corylus Avellana</i>	30	10	0.36	0.5	1	0.08
5	<i>Salix Caprea</i>	30	10	0.50	0.5	1	0.11
2	<i>Acer pseudoplatanus</i>	35	10	0.43	0.5	1	0.16
7	<i>Castanea sativa</i>	35	10	0.44	0.5	1	0.05

## ANNEXE 4 : INTERFACE DE MODELISATION ET SIMULATION SUR HETEROFOR

- Parcelle A+ (20 juillet 2021-8h AM)



- Parcelle AH (20 juillet 2021-8h AM)



## ANNEXE 5 : GEOREFERENCEMENT DE LA PARCELLE ET DES INDICATEURS SPATIALISES

Deux procédures pour géoréférencer les indicateurs peuvent être mises en place:

**Option 1 :** Soit on utilise directement les coordonnées Lambert pour les arbres et pour les points de délimitation de la grille (fig1) dans le fichier d'inventaire heteroform. Dans ce cas, la grille de sortie Heteroform est géoréférencée par les centres de cellules (x center, y center, z center) qui sont en coordonnées Lambert93 et elle peut être importée directement dans un outil SIG. Toutefois, le modèle à l'inconvénient de calculer l'altitude (z) des cellules à partir de x en Lambert93 et donc des valeurs de z de l'ordre de 77000 m. Cette surélévation de la grille empêche de visualiser correctement l'ombre sur la parcelle dans heteroform (fig2). Nous observons également une légère différence dans le calcul du rayonnement au sol (Figures 2 à 5).

**Option 2 :** Pour résoudre ce problème de visualisation et d'erreurs de calcul, les coordonnées ont été recalculées dans un repère d'origine (0,0) par translation (fig3). Dans ce cas, les données d'entrée et de sortie Heteroform ne sont pas géoréférencées. Le géoréférencement se fait en post traitement des sorties du modèle par une nouvelle translation. La visualisation de l'ombre dans Heteroform est normale (fig4).

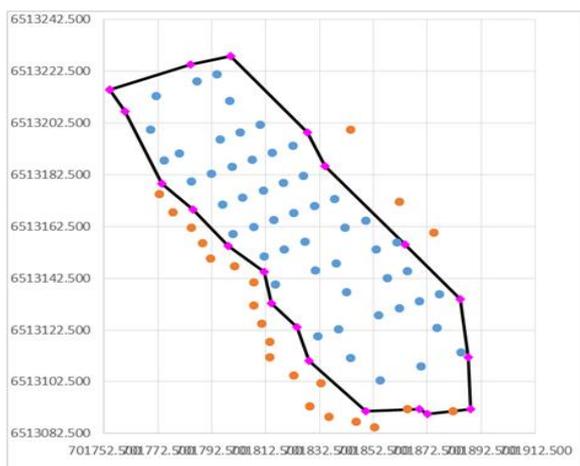


Fig 1 : Repère XY Lambert93

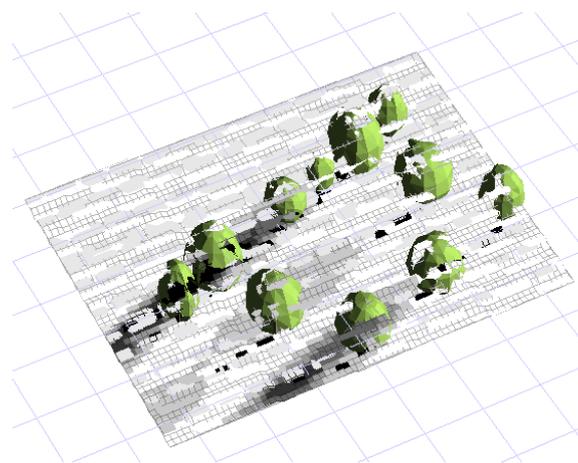


Fig 2 : Visu 3D anormal heteroform

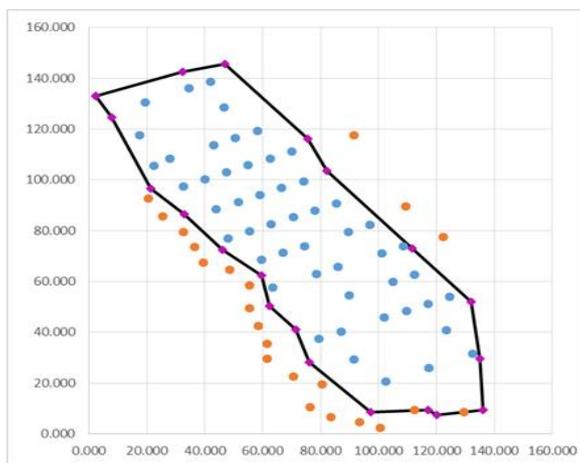


Fig 3: Repere d'origine (0,0) par translation

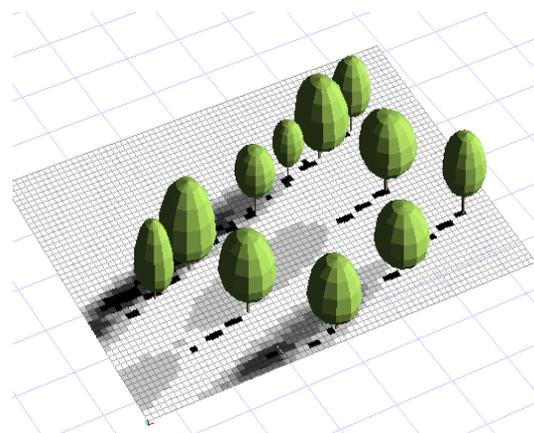


Fig 4 : Visu 3D normal heteroform

Avec une pente de 0.9 et un R2 de 0.99, la différence est très faible entre les deux procédures mais dans notre cas, pour ne pas introduire d'erreurs supplémentaires, la deuxième a été choisie (fig 5, 6,7).

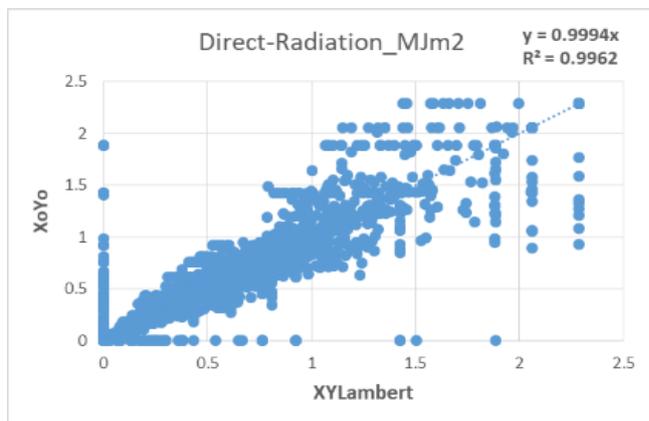


Fig5 : rayonnement direct au sol

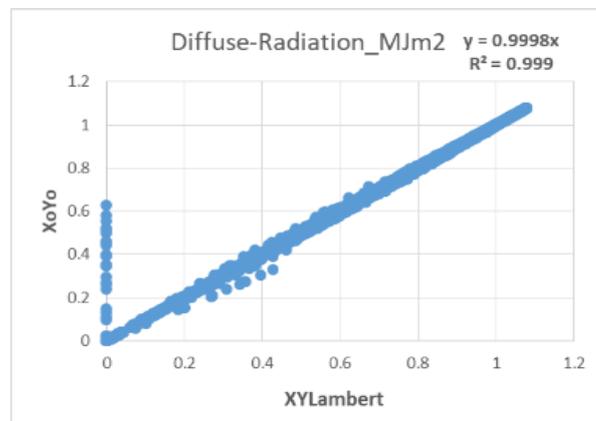


Fig6 : rayonnement diffus au sol

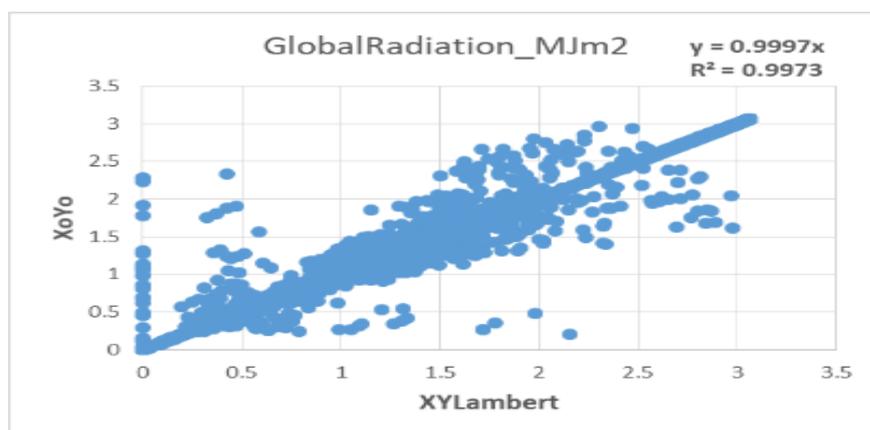


Fig7 : rayonnement global au sol

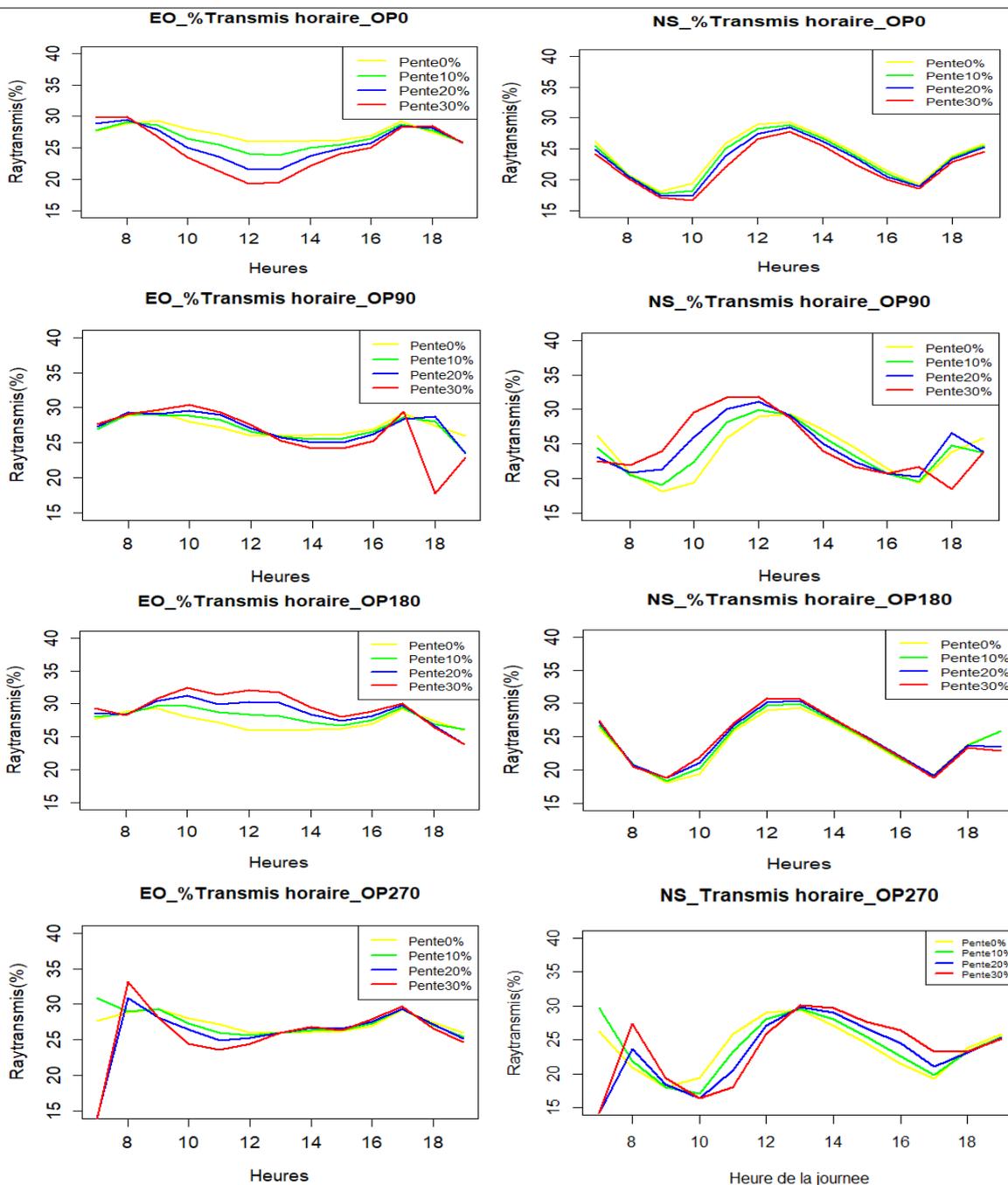
**ANNEXE 6 : DONNEES METEO DU 17 JUILLET 2019 SUR LE SITE EXPERIMENTAL A THEIX**

Year	Month	Day	Hour (gmt+1)	Radiation (w/m2)	Air temperature (°c)	Relative humidity (%)	Wind speed (m/s)
2019	7	17	1	0	18.7	81.9	1.84206
2019	7	17	2	0	17.8	84.7	1.708678
2019	7	17	3	0	17.2	86.5	1.780085
2019	7	17	4	0.34932	16.3	89.7	1.780085
2019	7	17	5	12.32323	15.2	94.1	1.803888
2019	7	17	6	89.12512	15.6	91.9	1.780085
2019	7	17	7	238.3624	16.3	87.9	1.899098
2019	7	17	8	406.919	17	85.7	1.981116
2019	7	17	9	591.6899	17.5	86.3	2.285189
2019	7	17	10	717.2607	18.7	84.9	2.381662
2019	7	17	11	769.5714	19.7	82.9	2.521698
2019	7	17	12	858.0367	20.8	81.7	2.61037
2019	7	17	13	828.9946	22.4	75.9	2.822012
2019	7	17	14	510.5215	23.2	71.2	2.830013
2019	7	17	15	428.441	23.4	70.2	3.03635
2019	7	17	16	425.5106	24	67.4	3.070764
2019	7	17	17	449.9921	23.8	68	2.947793
2019	7	17	18	199.19	23.8	68.2	2.935834
2019	7	17	19	57.80276	23.4	69.6	2.691241
2019	7	17	20	4.997217	22.7	71.2	2.439879
2019	7	17	21	0	22.6	70	2.24269
2019	7	17	22	0	22	72.9	2.024394
2019	7	17	23	0	20.5	80.9	1.904034
2019	7	17	24	0	20.4	82.7	1.859125

## ANNEXE 7: EFFETS COMBINES DE LA PENTE ET DE L'EXPOSITION SUR LE TRANSMIS

Parcelle avec rangées orientées est-ouest

Parcelle avec rangées orientées nord-sud



\*E= Est-Ouest

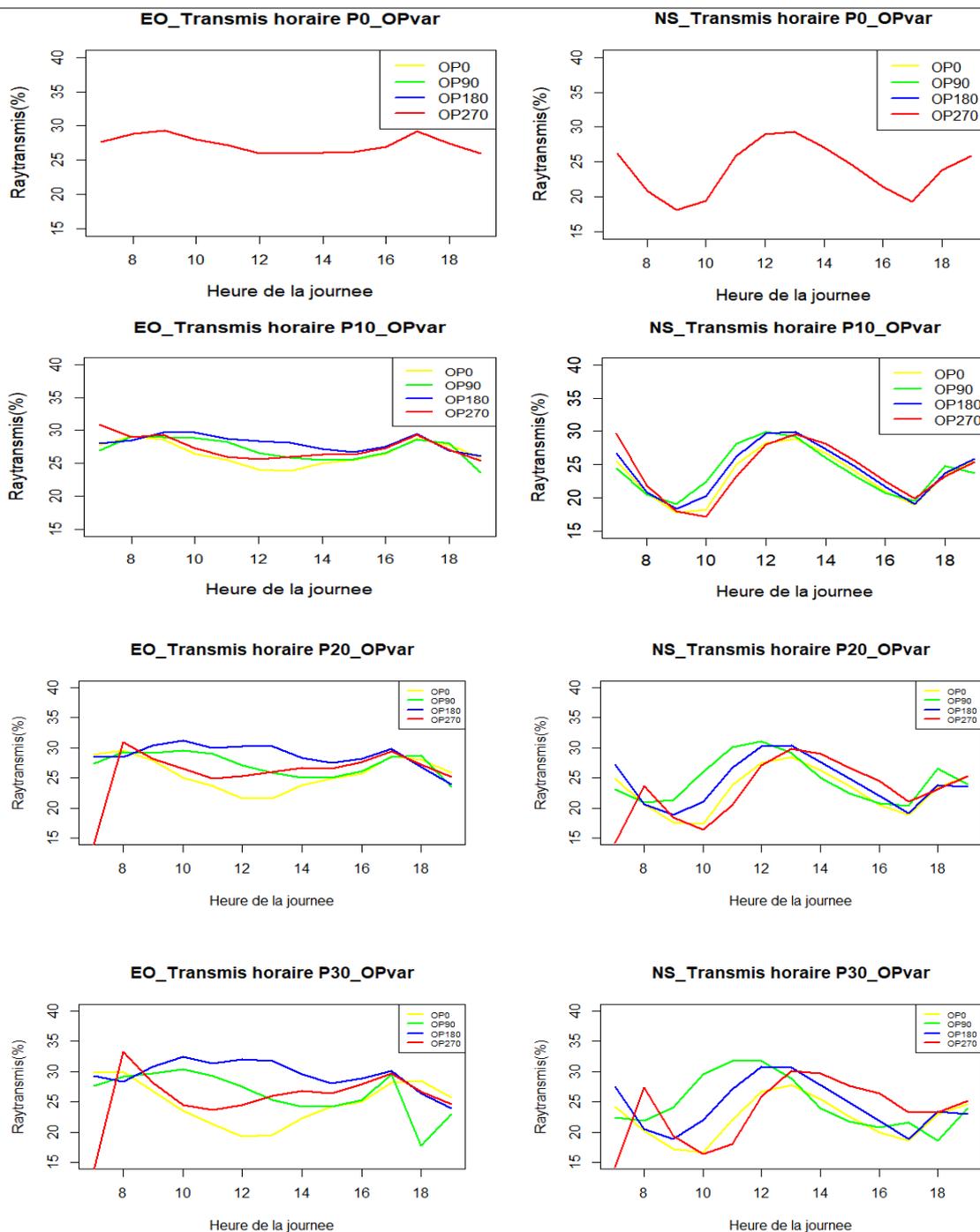
\*NS=Nord-Sud

\*OP=Orientation de pente

## ANNEXE 8 : EFFET DE L'EXPOSITION POUR UNE PENTE CONSTANTE

Parcelle avec rangées orientées est-ouest

Parcelle avec rangées orientées nord-sud



P0\_OPvar = Pente 0%\_ Orientation de pente variable

**ANNEXE 9: DONNEES METEO DU 20 JUILLET 2021 SUR LE SITE EXPERIMENTAL A THEIX**

Year	Month	Day	Hour (gmt+2)	Radiation (w/m2)	Air temperature (°c)	Relative humidity (%)	Wind speed (m/s)
2021	7	20	0	0	17	70	0.8
2021	7	20	1	0	16	75	0.7
2021	7	20	2	0	14	79	0.7
2021	7	20	3	0	12	91	0.7
2021	7	20	4	0	11	91	0.8
2021	7	20	5	0.002	11	92	0.8
2021	7	20	6	4	10	94	0.6
2021	7	20	7	43	12	92	0.4
2021	7	20	8	108	17	74	0.5
2021	7	20	9	165	20	67	0.7
2021	7	20	10	218	21	65	1
2021	7	20	11	256	21	66	1
2021	7	20	12	279	21	63	1
2021	7	20	13	297	22	57	1
2021	7	20	14	296	23	56	1
2021	7	20	15	284	24	54	1
2021	7	20	16	260	24	51	1
2021	7	20	17	216	24	47	1
2021	7	20	18	152	23	49	1
2021	7	20	19	90	23	50	1
2021	7	20	20	26	21	51	0.9
2021	7	20	21	3	18	60	0.6
2021	7	20	22	0	17	68	0.8
2021	7	20	23	0	15	75	0.8