



HAL
open science

Réponse de la prairie à l'ombrage dans des parcs agrivoltaïques par simulation et expérimentation

Marine Blaise

► **To cite this version:**

Marine Blaise. Réponse de la prairie à l'ombrage dans des parcs agrivoltaïques par simulation et expérimentation. Sciences de l'environnement. 2023. hal-04191860

HAL Id: hal-04191860

<https://hal.inrae.fr/hal-04191860v1>

Submitted on 30 Aug 2023

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.

Master 2 – Agrosociétés, environnement, territoires, paysages et forêt

Mention Biologie Intégrative et Changements Globaux - Année 2022-2023

Mémoire de fin d'études

Réponse de la prairie à l'ombrage dans des parcs agrivoltaïques par simulation et expérimentation

Marine BLAISE

Encadrée par Catherine PICON-COCHARD, directrice de recherche,
Raphaël MARTIN, ingénieur de recherche et Loan MADEJ, ingénieur d'études



Structure d'accueil : Unité Mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP)
UMR 0874, 5 chemin de Beaulieu, 63000 Clermont-Ferrand

Résumé : Les épisodes de sécheresse se multiplient en France, à cause du dérèglement climatique accéléré par la consommation abusive des énergies fossiles. Une stratégie combinant l'utilisation des énergies décarbonées et la protection des cultures est d'utiliser des panneaux photovoltaïques sur une même surface : on appelle cela l'agrivoltaïsme. Notre étude se concentre sur l'impact de l'ombrage créé par les panneaux photovoltaïques sur le couvert végétal, dans trois zones géographiques différentes en France avec différentes technologies. Grâce à des mesures de traits foliaires (SLA, LDMC, densité stomatique) nous avons effectué une calibration du modèle ModVege adapté à plusieurs espèces et aux prairies permanentes. Les plantes sont capables de s'adapter à l'ombre avec un bénéfice dépendant des espèces et du traitement. Nous avons analysé la sensibilité du modèle en réponse à l'augmentation de la SLA, à l'interception de la lumière et à son utilisation efficace dans diverses conditions, permettant de déterminer quel paramètre influençait l'augmentation de biomasse à l'ombre. L'augmentation des valeurs des trois paramètres permet une augmentation de la biomasse de 105% en pleine lumière, mais ne prévient pas une chute de la biomasse sous ombrage de 90%. De plus, nous avons utilisé le rayonnement diffus à la place du rayonnement global, permettant une plus faible réduction du rayonnement (90% à 70%). Le modèle reste en difficulté concernant la simulation de la biomasse à l'ombre. Toutefois, notre étude a soulevé des perspectives d'amélioration concernant la simulation de la biomasse à l'ombre, mais aussi sur les bonnes utilisations des panneaux photovoltaïques pour protéger les cultures.

Mots-clefs : Ombrage, modélisation, prairie, agrivoltaïsme, traits foliaires

Abstract : In France, drought events are multiplying, caused by climate changes and the overuse of fossil fuels. Agrivoltaism is a promising solution that combines decarbonized fuels and crop protection with photovoltaic panels. Our study is aimed to examine the impact of the shadow cast by panels on plants in three distinct geographic zones through various technologies. By using precise measurements and analyzing leaf traits, we calibrated the ModVege model, which is adaptable to multiple species and permanent grasslands. Plants can adapt under shade, with benefits depending on the species and treatment. Through analyzing the model's reaction to increased SLA, light interception, and use efficiency in different conditions, we found that by increasing these parameters resulted in a significant increase in biomass production by 105%. Using diffuse radiation over global radiation reduced radiation loss by 90 to 70%. The model faced challenges in simulating biomass under shade. Our study offers insights on how to enhance biomass simulation under these circumstances and provides good practices for utilizing photovoltaic panels to protect crops.

Keywords : Shade, modelization, grassland, agrivoltaism, leaf traits

Glossaire

C/I/P : Contrôle, Inter-rangée, Panneaux.

ENV : Environnement (modèle ModVege, (Jouven et al. 2006a))

LAI (*Leaf area index*) : Surface foliaire d'une espèce par unité de surface de sol en $m^2.m^{-2}$.

LDMC (*Leaf Dry Matter Content*) : Rapport de la masse sèche sur la masse fraîche de la feuille. S'exprime en $mg.g^{-1}$.

MAE (*mean average error*) : Taux d'erreur moyen.

NSE (*Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient*) : Indice sur la qualité informative du modèle.

PAR (*Photosynthetically active radiation*) : Rayonnement utilisé pour la photosynthèse, dont les longueurs d'onde vont de 400 à 700nm. S'exprime en $MJ.m^{-2}.jour^{-1}$. Est nommée PARi dans le modèle ModVege.

RD/RG : Rayonnement diffus et rayonnement global, exprimé en $MJ.m^{-2}$.

RUE (*Radiation use efficiency*) : Utilisation efficace de la lumière interceptée par la plante, s'exprimant en $g.\mu mol^{-1}.s$ et permettant d'accumuler de la biomasse en $g.m^{-2}$. Dans le modèle ModVege, on s'intéresse à la RUEmax (Utilisation efficace maximale du rayonnement).

RIE (*Radiation interception efficiency*) : Interception de la lumière par la plante. Correspond au coefficient d'interception de la lumière K dans ModVege.

SEA : Saisonnalité (modèle ModVege, (Jouven et al. 2006a))

SLA (*Specific leaf area*) : Rapport de la surface foliaire à la masse sèche de la feuille. S'exprime en $m^2.g^{-1}$.

UGB : Unité gros bétail.

WR (*Water reserve*) : réserve en eau des plantes en mm.

Table des matières

INTRODUCTION	4
MATERIELS & METHODES	6
1) ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	6
2) PRESENTATION DES TROIS SITES : METEO MOYENNE ET PARCS	7
3) SUIVIS SUR LES SITES.....	8
4) MESURE DES TRAITS FOLIAIRES.....	10
5) MODELISATION	11
6) TESTS STATISTIQUES	12
RESULTATS	13
1) TRAITS FOLIAIRES	13
2) GAPFILLING.....	14
3) SIMULATIONS AVEC LE MODELE MODVEGE.....	14
DISCUSSION	18
1) TRAITS FOLIAIRES	18
2) SIMULATIONS SOUS MODVEGE	20
CONCLUSION	22
REMERCIEMENTS	22
BIBLIOGRAPHIE	23
ANNEXES	27

Introduction

En France, l'énergie électrique est une source indispensable pour toute entreprise et foyer particulier. Venant principalement des centrales nucléaires, de l'hydraulique et des énergies fossiles, la part de production des énergies renouvelables, comme l'éolien ou le solaire, ne dépasse pas 15% en 2022 (Bilan électrique RTE, 2022). Les énergies carbonées sont une source primaire dans l'évolution des changements climatiques. La combustion d'énergie fossile a créé et continue de contribuer aux changements climatiques majeurs observés durant les dernières décennies en sus des pollutions non négligeables du système atmosphérique. Malgré la diminution de l'utilisation de ce type d'énergie en France, d'autres pays continuent d'utiliser intensivement cette ressource (Finkelman et al. 2021). Cela a un impact direct sur les changements climatiques comme la sécheresse auxquelles les communautés végétales font face (Finkelman et al. 2021). Selon le rapport du GIEC de 2021, l'augmentation des températures de 1°C amène à une aggravation des épisodes de sécheresse en Europe du centre mais aussi dans d'autres zones géographiques. Le stress hydrique induit par le manque d'eau impacte négativement les plantes, qui vont mettre en place des stratégies d'adaptation comme par exemple l'évitement avec la chute des feuilles ou de tolérance avec le maintien de la turgescence cellulaire (Volaire 2018). Cela implique aussi une baisse de rendement non négligeable. (McLaughlin and Boyer 2004). De plus, les épisodes de sécheresse peuvent entraîner des phénomènes d'embolie qui causent la mort des espèces (Choat et al. 2012).

Face aux objectifs fixés par l'état Français pour répondre à la crise énergétique due à l'augmentation de la population (Bilan démographique Insee, 2022) et assurer un développement durable, il devient indispensable de trouver des alternatives en cherchant des énergies décarbonées. Les centrales solaires sont donc un moyen de produire de l'énergie de manière renouvelable. Ainsi, en France, la part de production brute d'électricité de l'énergie solaire est de 4,2% avec 15,7 GW produits en 2021 (Bilan électrique RTE, 2022), et devrait atteindre entre 35,1 et 44 GW en 2030 (Bilan électrique RTE, 2022). Les panneaux photovoltaïques sont les moins coûteux en termes d'installation (Philipps et al., 2015), cependant il faut trouver des terrains assez grands pour les construire. De plus, l'usage de ceux-ci rentre directement en compétition avec un usage agricole (cultures et prairies) (Adeh et al. 2018), et peut causer des tensions dans des zones densément peuplées. C'est de ce constat qu'est né le concept d'agrivoltaïsme, introduit par Goetzberger et Zastrow en 1982, mêlant agriculture et production d'énergie sur une même surface, tout en respectant le bien-être animal.

Récemment, la loi ENR n°2023-175 du 10 mars 2023 (Art. L314-36.-1) a donné un cadre au développement à large échelle de l'agrivoltaïsme en France.

Peu d'études ont été menées sur l'impact direct des centrales solaires sur la végétation, la lumière étant réduite de 50 à 70% par les panneaux solaires (Marrou et al. 2013). Bien que certaines études affirment que la productivité des terres et le rendement sont affectés positivement par la présence des panneaux (Elamri et al. 2018, Dupraz et al. 2011), d'autres affirment le contraire, avec une baisse de 70% de rendement à 80% d'ombre (Ehret et al. 2015). Les panneaux solaires sont un moyen de réduire l'impact de la sécheresse sur les plantes en diminuant la température de l'air et du sol, ayant un effet « Parasol » (Madej et al. 2023). Sous la contrainte liée à l'ombrage, les plantes s'adaptent et modifient certains traits foliaires comme montré en situation agroforestière. La SLA, un des traits fonctionnels connu pour varier en situation d'ombrage, augmente de 10 à 64% (Abraham et al. 2014), impliquant une meilleure interception de la lumière, la taille de la feuille étant plus grande pour un même investissement en carbone. L'interception de la lumière est aussi améliorée par une inclinaison de la feuille plus à l'horizontal de 9° (Peri et al. 2006), ce qui implique une augmentation de la RIE (radiation interception efficiency) passant de 0,63 à 0,93 à 70% d'ombre (Marrou, et al. 2013). La RUE augmente aussi à l'ombre, de 19 à 61% (Druille et al. 2019), permettant une meilleure utilisation de la lumière sous panneaux. Cette dernière est aussi affectée par le pâturage (Blanco et al. 2022), qui est une pratique agricole fréquente sur les parcs agrivoltaïques (permettant de nourrir les troupeaux et bénéficie à leur santé, permettant un entretien sans engins agricoles) et présent sur nos trois sites. Il est donc crucial, pour choisir au mieux les lieux d'installation de ces centrales dans le futur, de déterminer quel sera leurs impacts sur la végétation et la production. Pour cela, il est possible, en plus de réaliser des expérimentations, de développer et d'utiliser des modèles informatiques.

Il existe une multitude de modèles permettant de simuler la croissance en hauteur à l'ombre, mais ces derniers sont souvent individus centrés (Peri et al. 2007, Barillot et al. 2021, Couturier et al. 2022), complexes et non adaptées à des prairies permanentes, comme les modèles CANESTRA (Couturier et al. 2022) ou RIRI (Barillot et al. 2021). Le modèle ApSim (Holzworth et al. 2014) a permis de simuler, sous ombrage faible induit par des panneaux solaires, la biomasse, mais prédit une chute de production dans le cas où la baisse de rayonnement est trop forte (75%). Il fallait donc trouver un modèle simple, permettant de simuler à l'échelle de la communauté végétale, et adapté aux prairies permanentes. Le modèle ModVege (Jouven et al. 2006a, Jouven et al. 2006b) était un excellent candidat pour simuler la

biomasse aérienne : il est adapté aux prairies permanentes et prend en compte plusieurs variables (environnement, saisonnalité, SLA, réserve utile du sol, type de végétation) tout en restant relativement simple et nécessitant peu d'entrées. Il n'est pas encore adapté à un fort ombrage, et des premières simulations, en situation d'ombrage, prédisent un effondrement de la production de la biomasse alors que les suivis expérimentaux ont montré que cette production se maintient (Madej et al. 2023).

C'est dans l'optique de mieux comprendre l'impact des panneaux solaires sur la production prairiale que le projet « Agrivoltaïsme » s'inscrit. Un partenariat entre deux PME, JPEE et Photosol, et l'Unité Mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial de Clermont-Ferrand, a permis l'étude de la pousse de la végétation prairiale depuis 2020 sur trois sites répartis dans trois départements différents. Les deux premiers sites présentent des panneaux conventionnels. Le troisième site présente des panneaux rotatifs traquant le soleil, permettant alors une comparaison des deux types de panneaux solaires et leur impact sur la biomasse et l'adaptation des plantes à différents niveaux d'ombrage. Le premier objectif de mon stage est de récolter les données expérimentales nécessaires pour la paramétrisation et la calibration du modèle ModVege. Ces dernières ont été analysées pour en extraire les variables à injecter dans le modèle comme certains traits foliaires (SLA, LDMC, densité stomatique). Dans un deuxième temps, j'ai simulé sur les trois sites et traitements la biomasse aérienne ainsi que calibré le modèle à l'ombrage, en faisant varier différents paramètres du modèle sensibles à l'ombrage d'après la littérature.

Matériels & méthodes

1) Etude bibliographique

Pour comprendre les effets de l'ombre sur les différents traits et les capacités des plantes à s'adapter, j'ai commencé par une étude bibliographique d'une trentaine d'articles. Cette étude s'est basée sur les équations du modèle présentées dans le *Tableau 1* et sur l'impact des panneaux sur la communauté végétale. J'ai cherché les traits et les mécanismes influencés par l'ombre de manière positive ou négative, puis à comprendre comment la qualité de la lumière était affectée par une réduction de celle-ci par des tissus, des arbres ou des panneaux, donc en système agroforestier mais aussi en agrivoltaïsme. Les principaux mots clés de mes recherches furent « Shade », « Modelization », « leaf traits », « Light reduction », « RUE », effectuées

dans le moteur de recherche Google Scholar. Ces recherches nous ont été utiles pour calibrer le modèle ModVege et trouver des perspectives d'amélioration du modèle.

2) Présentation des trois sites : météo moyenne et parcs

1. Braize

Le site de Braize (14,82 ha) dans l'Allier (03), est une plaine (230m), anciennement une pépinière devenue friche. Le climat est semi-continental dégradé, avec une température moyenne annuelle de 10,9°C, une pluviométrie moyenne de 773mm et 1811h/an d'ensoleillement.

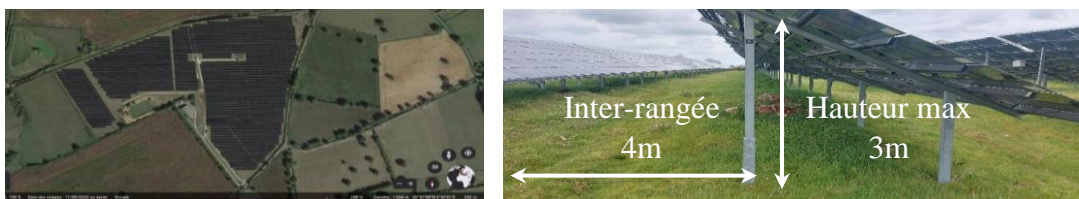


Figure n° 1 : Photographie satellite du site de Braize (gauche) et de l'infrastructure des panneaux (droite).

Ce site est géré par la PME JPEE et est exploité depuis octobre 2018. Le site est peu adapté à une agriculture productive : le sol est rocheux et sec, acide, retenant peu l'eau, et est pauvre en minéraux. Le site est pâturé par 80 ovins environ d'avril à septembre (0.29 UGB). Du ray-grass, du trèfle blanc et de la fétuque ont été semés lors de la pré-construction.

2. Marmanhac

Le site de Marmanhac (21,7 ha) dans le Cantal (15), est situé en moyenne montagne (855m). Le climat est continental dégradé, avec une température moyenne annuelle de 10,1°C, une pluviométrie moyenne de 1180mm et 2100h/an d'ensoleillement.



Figure 2 : Photographie satellite du site de Marmanhac (gauche) et de l'infrastructure des panneaux (droite).

Ce site est géré par la PME Photosol et est exploité depuis janvier 2014. La prairie est mésophile avec une roche mère volcanique (Gneiss) et un pH acide. Le site est pâturé par 150 brebis et 50 agneaux (0.36 UGB).

3. Les Églisottes-et-Chalaires

Le site d'Églisottes-et-Chalaires (17,8 ha) en Gironde (33) est une plaine (30m), ancienne friche inutilisée. Le climat est océanique dégradé, avec une température moyenne annuelle de 12,4°C, une pluviométrie moyenne de 945mm et 2050h/an d'ensoleillement.

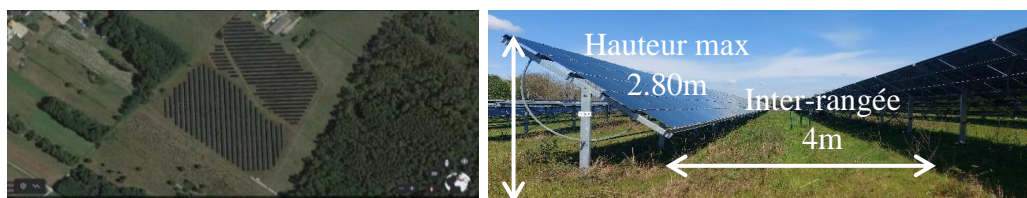


Figure 3 : Photographie satellite du site d'Églisottes-et-Chalaires (gauche), et photographie de l'infrastructure des panneaux (droite).

Ce site est géré par la PME Photosol et est exploité depuis novembre 2017. Le sol est épais avec de la terre arable, mais la forte proportion d'argile et l'hydromorphie du terrain ne permet pas au terrain d'être favorable à l'agriculture. Le site est pâturé par 110 ovins environ, passant 10 jours continus sur site en mai et septembre respectivement (0,034 UGB).

3) Suivis sur les sites

Les données expérimentales permettant de mesurer des traits foliaires et de calibrer le modèle ont été collectées dans des zones non pâturées. Les trois traitements sont Panneaux, Inter-rangées et Contrôle, (P, I et C durant tout le rapport). Des mesures de rayonnement ont mis en évidence une réduction de 90% sous panneaux comparé au traitement C (Madej et al. 2023), ce dernier non ombragé par les panneaux. Le traitement I implique une réduction du RG à cause de l'ombre portée des panneaux avec un ombrage intermittent, selon l'heure et la saison. Des prélèvements de biomasse ont été réalisés depuis 2020, pour évaluer l'effet du microclimat aérien sur la production ainsi que sur les principaux traits, disponibles en **Annexe n°1**.

Chaque site est équipé de capteurs connectés à une centrale d'acquisition de données, qui sont placés dans trois zones d'exclos par site. Chaque zone est coupée en trois transects, chacun étant

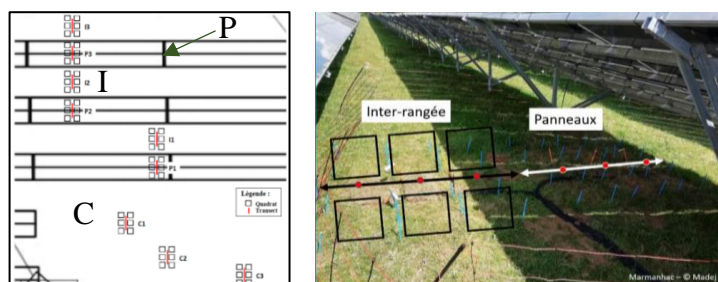


Figure 4 : Schéma et photographie du dispositif expérimental sur Marmanhac (MADEJ). Chaque point rouge représente une sonde, et chaque carré noir un quadrat. A gauche, une représentation schématique des zones d'exclos.

équipé de trois sondes (*SMT100*, *STEP System GmbH, Germany*) mesurant l'humidité et la température du sol. De chaque côté des sondes, on trouve deux quadrats mesurant la biomasse sur pied. Au total, par site, on trouve 27 sondes et 54 quadrats (*Figure 4*). Dans le traitement contrôle, une centrale météo équipée de capteurs placés à 1.5m de haut mesure la température de l'air, l'humidité relative (*Hygrovue, Campbell, UK*), la pluviométrie et le rayonnement. S'ajoutent à cela des capteurs spécifiques mesurant le rayonnement global/diffus (*BF5, Delta T Devices, UK*) et ainsi que le PAR (*JYP1000, SDEC, France*) en contrôle et panneaux à 30cm de hauteur pour qu'ils ne soient pas recouverts de végétation, et à 5m de la centrale. En I, trois capteurs de PAR (*SKP215, Campbell, UK*) par site sont calibrés pour avoir la même sensibilité que les *JYP1000*, et sont placés selon la *Figure 4*. L'acquisition des données se fait toutes les 30 secondes, agrégé en une valeur moyenne par 30 minutes. Les capteurs de rayonnement ayant un coût élevé (plusieurs k€), ils sont déplacés toutes les deux semaines entre deux des trois sites. Il y a des trous dans les séries de données, empêchant l'utilisation directe des données au sein du modèle.

Pour les combler, j'ai utilisé un package R nommé *missForest* qui se base sur les forêts d'arbres décisionnels, une méthode d'apprentissage ensembliste. Cet algorithme effectue un apprentissage sur de multiples arbres de décisions indépendants (ici les feuilles sont les valeurs possibles de la variable cible et les embranchements les combinaisons d'entrées) en extrayant des sous-ensembles aléatoires de données puis assemble ces derniers. Nous avons manipulé les données au format .csv, et, en plus des variables météo, avons ajouté la saisonnalité et le cycle jour/nuit. Pour les données de précipitation, nous avons utilisé des données de Météo France, les capteurs pouvant être détériorés (grêle), produire des valeurs faussées (grosse goutte sur le capteur) ou déplacés. Pour la température et le rayonnement, j'ai ramené des corrélations entre les données présentes au sein d'un même fichier, puis j'ai utilisé l'algorithme. Pour chaque variable, j'ai calculé des indicateurs d'erreurs en générant de fausses données manquantes aléatoirement, puis en comblant cette donnée grâce à la méthode expliquée plus haut. Je pouvais alors comparer la valeur prédite à la valeur réelle. J'ai ainsi produit deux indicateurs : la MAE et le NSE. La MAE correspond au taux d'erreur absolue du modèle (plus la MAE est grande, plus l'erreur l'est). Le NSE, lui, indique si le modèle est prédictif et s'il apporte des informations. Un NSE de 1 correspond à un modèle parfait (les prédicts sont égaux aux observés), un NSE positif signifie que le modèle est meilleur que le fait de prendre systématiquement la valeur moyenne des observées. S'il est négatif, il est préférable de prendre la moyenne des valeurs observées pour combler les trous plutôt que l'utilisation du package.

Pour la pluviométrie, le taux d'erreur étant fort pour la MAE et l'indice NSE négatif, on comble les données avec des stations météo proches. J'ai calculé les valeurs d'évapotranspiration à l'aide d'une formule proposée par Louise ADAM (stagiaire de M2 de l'université de Rennes) issue d'une régression sur un autre jeu de données ($ET0 = -0.1128 + 8.798 \times 10^{-4} \times RG + 2.867 \times 10^{-2} \times TM + 4.920 \times 10^{-5} \times RG \times TM$) avec un $r^2 = 0.9$ (Adam et al. 2023)

4) Mesure des traits foliaires

Durant les trois sorties terrains, aidée de deux techniciennes et d'un ingénieur, j'ai récupéré environ 330 feuilles sur Braize, 480 feuilles sur Marmanhac et 260 feuilles sur Eglisottes. Pour calibrer le modèle, j'ai mesuré des traits foliaires sur plusieurs espèces par site et traitement, représentatives des communautés végétales. Une liste de plantes dominantes a été établie et une dizaine de feuilles de chaque espèce collectée (**Annexe n°2**). Les traits se mesurent en conditions hydriques optimales (Louault et al. 2005) et les feuilles récoltées furent conservées dans des sachets contenant de l'eau en chambre froide. Le lendemain des sorties terrain, la masse fraîche des feuilles a été pesée à l'aide d'une balance de précision (*Mettler Toledo, France*). J'ai ensuite mesuré la surface foliaire avec un planimètre Li-3100 (*Licor, USA*). Après séchage des feuilles à 60°C/48h, la masse sèche est pesée. Ces mesures ont été faites avec entre 7 et 10 réplicas, permettant de minimiser les erreurs d'expérimentation. La SLA moyenne par espèce et par traitement fut calculée, puis la moyenne pondérée de la SLA en prenant en compte l'abondance relative des espèces (p_i) et la SLA de l'espèce ($trait_i$).

Équation de la SLA pondérée (Garnier et al. 2004) :

$$Trait_{agg} = \sum_{i=1}^n p_i \times trait_i$$

Ainsi, si une espèce A est plus abondante qu'une espèce B, la valeur du trait ainsi agrégé sera impactée plus fortement par la valeur de celui de A que celui de B. Il est impossible de faire des statistiques sur cette dernière, mais elle était indispensable pour la modélisation, permettant de représenter au mieux le couvert végétal.



Figure 5 : Photographies du matériel expérimental pour la densité stomatique. A gauche, les lames de microscopes utilisées. Au milieu, les empreintes retirées des feuilles. A droite, les boîtes où sont consignées les feuilles en attente de séchage.

La densité stomatique des feuilles fut mesurée à partir d'un protocole standard (Arnault, 2021). Pour réaliser l'empreinte stomatique de chaque côté de la feuille, un mélange de 2 silicones liquide a été étalé sur 3 feuilles par espèce/site (environ 285 feuilles) et séché pendant 1h-1h30. Le silicone est ensuite retiré, puis du vernis transparent est appliqué. Du scotch est collé pour récupérer l'empreinte, puis transféré sur une lame de microscope. Les lames de microscope (*Zeiss Axio Scope A1, Zeiss, Suisse*) ont été photographiées grâce à une caméra Carl Zeiss™. J'ai compté les stomates présents puis exprimé la densité en stomates.mm⁻². La somme des stomates des deux faces a été calculée et analysée par espèce et traitement pour chaque site.

5) Modélisation

La modélisation de la biomasse a été réalisée avec le modèle ModVege (Jouven et al. 2006a), implémenté sous R, réalisé par Louise Adam dans le cadre de son stage (Adam et al. 2023). Ce dernier simule le couvert végétal d'une prairie permanente homogène, avec un pas de temps journalier sur plusieurs années complètes.

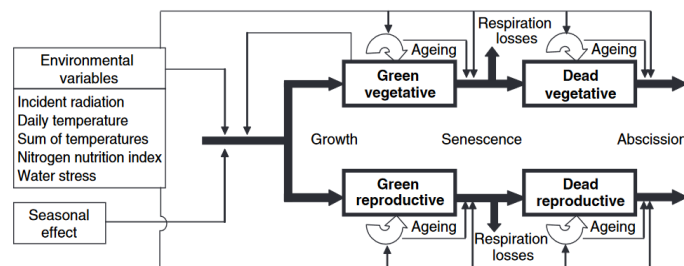


Figure 6 : Diagramme de flux du modèle MODVEGE (Jouven et al. 2006)

Ce modèle permet de simuler uniquement les flux de biomasses aérienne entre quatre compartiments principaux (Figure 6) en prenant en compte des variables environnementales (température, évapotranspiration, indice de nutrition du sol, rayonnement global et pluviométrie) et des paramètres relatifs principalement aux traits de végétation. Les équations et processus sont décrits dans 2 articles (Jouven et al. 2006a et Jouven et al. 2006b). Voici les principales équations du modèle, les abréviations définies dans le glossaire :

Équations	Définitions
$GRO = PGRO \times ENV \times SEA.$	Croissance (GRO) des plantes fonction de la croissance potentielle (PGRO) et deux facteurs : ENV et SEA.
$PGRO = PARi \times RUE_{max} \times [1 - \exp(-0.6 \times LAI)] \times 10$	PGRO basée sur le PARi, la RUE _{max} et un coefficient d'interception de la lumière fonction de la LAI
$LAI = SLA \times \frac{BM_{gv}}{10} \times \%LAM$	LAI basé sur la SLA, la biomasse verte végétative et %LAM (Pourcentage de limbes foliaires).

Tableau 1 : Principales équations du modèle ModVege.

J'ai réalisé des simulations de biomasse sur les trois sites, et évalué la qualité de celles-ci par le biais de régressions linéaires : j'ai réalisé des graphiques avec les données obtenues vs les données simulées, avec deux droites. La première est la droite 1:1, indiquant ce que serait un modèle parfait pour lequel les données simulées sont égales aux données obtenues, et une droite de régression ($y = ax + b$) : si les points sont en dessous de cette droite, on sous-estime nos résultats, et s'ils sont au-dessus de la droite, on surestime ceux-ci. Cela permet de confirmer ou infirmer l'efficacité du modèle, toujours avec les indices MAE et NSE. Ensuite, j'ai modifié les paramètres du modèle au regard des valeurs trouvées dans la bibliographie ainsi qu'à la suite de nos mesures de traits in situ. J'ai choisi de faire varier ces traits car ceux-ci ont été retenus comme traits fonctionnels pour la SLA, qui augmente à l'ombre, et comme traits répondant à l'ombrage pour la RUE_{max} et le coefficient d'interception de la lumière qui augmentent à l'ombre, alors que le rayonnement diminue. Ce sont de plus ces 4 variables qui influent sur la production de biomasse dans les équations du *Tableau I*.

6) Tests statistiques

Tous les tests statistiques ont été réalisés sous *R 4.3.0*, avec un indice de confiance $\alpha=0.95$. On compare les valeurs des traits foliaires mesurés (SLA, LDMC, densité stomatique totale) sur les différents traitements (C, I, P). J'ai ainsi effectué plusieurs tests statistiques, basés sur un modèle avec une variable aléatoire (package *nlme*). J'ai choisi ce modèle car l'indice AIC (critère d'information d'Akaike) était inférieur à celui du modèle sans variable aléatoire. Cet indice exprime le maximum de vraisemblance d'un modèle, décrivant les données avec le plus petit nombre de paramètres. Le modèle choisi ayant une variable aléatoire est le plus parcimonieux. J'ai testé le lien entre le traitement (C, I, P) et l'espèce, pour déterminer si la SLA de l'espèce change en fonction du traitement sur lequel elle se trouve. La variable aléatoire est la feuille, j'ai considéré que l'expérimentateur a pu prendre n'importe laquelle. Des tests de Shapiro ont permis de déterminer la normalité des résidus, et un test de Bartlett l'égalité des variances. Si les tests de comparaison de moyenne Anova s'avéraient significatifs, j'ai réalisé des tests post-hoc de Tukey (si l'Anova était équilibrée) ou de Bonferroni (si l'Anova était déséquilibrée) avec le package *emmeans*. En particulier, ces tests ont servi à déterminer une variabilité intraspécifique des espèces et déterminer s'il y avait une différence significative entre traitements.

Résultats

1) Traits foliaires

On constate que les SLA augmentent sous panneaux, comme prévu par la littérature (Abraham et al. 2014). Cette dernière a augmenté de 67% sur le site de Braize, de 51% sur le site de Marmanhac, et 44% sur le site d'Eglisottes (*Tableau II*). Cette augmentation de SLA est due à une variabilité intra et interspécifique. Si on se penche sur les espèces les plus plastiques, comme *Trifolium repens*, sur chaque site sa SLA augmente sous panneaux (56% sur Braize, 101% sur Marmanhac et 38% sur Eglisottes, la différence s'expliquant par l'inclinaison des panneaux) et entre espèces, on retrouvera des espèces plus plastiques sous panneaux que d'autres (*Hypochaeris radicata* et *Trifolium repens*). Certaines espèces ne répondent pas à l'ombrage, comme *Festuca ovina* et *Luzula campestre*. Les résultats des tests statistiques sont disponibles en **Annexe n°3**.

Traitement	Braize	Marmanhac	Eglisottes
C	0,0136	0,0171	0,0199
I	0,0145	0,0220	0,0163
P	0,0227	0,0258	0,0287

Tableau II : SLA pondérée sur les 3 sites et traitements exprimée en $m^2.g^{-1}$.

On constate que la LDMC diminue en panneaux sur les sites de Braize et Marmanhac de 16% et 18,5% respectivement (*Tableau III*). Sur le site d'Eglisottes, cette dernière augmente de 59% : cela s'explique par l'inclinaison rotative des panneaux, laissant plus ou moins passer de la lumière. La LDMC augmente en I sur les sites de Braize et Eglisottes de 33% et 100% respectivement, mais diminue de 11% sur le site de Marmanhac. Cela peut s'expliquer par une plus forte ombre dans l'inter-rang à cause des panneaux et de l'ombre portée, et que les feuilles récupérées étaient proches des panneaux. Il y a une variabilité intraspécifique dans certains sites, toujours dû à la plasticité des espèces, comme pour *Dactylis glomerata* où sa LDMC diminue de 25% en panneaux sur le site de Braize et Marmanhac.

Traitement	Braize	Marmanhac	Eglisottes
C	0,248	0,274	0,223
I	0,328	0,244	0,439
P	0,199	0,226	0,350

Tableau III : LDMC pondérée sur les 3 sites et traitements $mg.g^{-1}$.

On constate que la densité stomatique totale diminue en panneaux de 19,5% sur le site de Braize, de 30,5% sur le site de Marmanhac et de 6% sur le site d'Eglisottes (*Tableau IV*). Cela peut s'expliquer par la différence d'ombre perçue par les plantes, l'infrastructure des panneaux étant différente, les panneaux plus bas sur le site de Marmanhac. En I, la densité

stomatique diminue sur le site de Braize, mais sur le site de Marmanhac elle augmente de 13%, possiblement à cause de l'ombre portée des panneaux. Il n'y a pas de variabilité intraspécifique, car il n'y a pas de différence significative entre les résultats (**Annexe n°3**), donc pas de réelle plasticité de certaines espèces sous panneaux.

Traitement	Braize	Marmanhac	Eglisottes
C	98,45	59,35	61,19
I	95,98	67,13	61,34
P	79,20	41,25	57,75

Tableau IV : Densité stomatique pondérée sur les 3 sites et traitements exprimée en nombre de stomates.cm⁻².

2) Gapfilling

Afin de déterminer l'erreur induite par l'application des algorithmes de gapfilling, j'ai développé un script permettant de quantifier l'erreur générée. Ces résultats ont permis de déterminer quelles données utiliser pour simuler la biomasse, qu'elles soient issues des fichiers météo obtenus par les centrales sur site ou des centrales proches. J'ai pu déterminer que les résultats étaient corrects pour l'évapotranspiration, le RG et la température mais que l'algorithme présentait de mauvais résultats pour la pluviométrie, ce qui est compréhensible du fait que les évènements de pluie sont par nature stochastique (*Tableau V*). Pour la pluviométrie, nous nous sommes basés sur des données de stations météo du voisinage.

Indice	Pluviométrie	Évapotranspiration (ETP)	Rayonnement global (RG)	Température
MAE	1,97	0,30	0,46	0,01
NSE	-0,20	0,33	0,33	0,65

Tableau V : Étude de l'efficacité de la méthode de gapfilling sur les 4 variables de ModVege.

3) Simulations avec le modèle ModVege

J'ai simulé, avec les données météorologiques obtenues sur les trois sites, la biomasse aérienne annuelle sur 4 ans sur les sites de Braize et Marmanhac, et sur 2 ans sur le site d'Eglisottes.

Site/Année	2020	2021	2022	2023
Braize (Obs)	252,70	6604,80	12487,80	0
Braize (Sim)	823,74	2346,22	7849,13	127,42
Marmanhac (Obs)	752,60	775,20	16000,32	6436,60
Marmanhac (Sim)	1695,98	12,74	10394,44	803,99
Eglisottes (Obs)	///	///	792,60	3441
Eglisottes (Sim)	///	///	1736,23	2823,19

Tableau VI : Biomasse annuelle fauchée, observée (Obs) et simulée (Sim), sur les trois sites, en kgDM.ha⁻¹, en conditions pleine lumière.

Grâce aux résultats (*Tableau VI*), j'ai évalué la qualité des simulations par le biais de régressions linéaires : j'ai réalisé des graphiques avec les données obtenues vs les données simulées. Les résultats de ces régressions sont disponibles en **Annexe n°5** et indiquent que le

modèle, selon le NSE, permet de prédire moyennement la biomasse sur les sites de Braize et Marmanhac, mais sur le site d'Eglisottes, le NSE du modèle est proche de 0, il serait donc préférable d'utiliser directement les données observées. La MAE est très forte pour tous les sites, indiquant un pourcentage d'erreur important. Cela peut être dû au faible nombre d'observations de biomasse sur les sites, et au modèle qui considère que les dates de fauches sont trop proches et les ignore.

A but d'illustration, je présenterai par la suite les résultats sur le site de Marmanhac. En effet, ce site est le plus favorable à l'installation d'une prairie par ses conditions pédoclimatiques et les panneaux solaires installés sont ceux les plus communément décrits dans la littérature (Goetzberger and Zastrow 1982). Les résultats sont généralisables (**Annexe n°6**). Suite à l'étude bibliographique réalisée, j'ai mis en exergue plusieurs traits, présents comme paramètres du modèle, qui présentent une plasticité à l'ombrage. J'ai étudié, en faisant varier ces différents paramètres, l'impact sur la biomasse aérienne en condition contrôle.

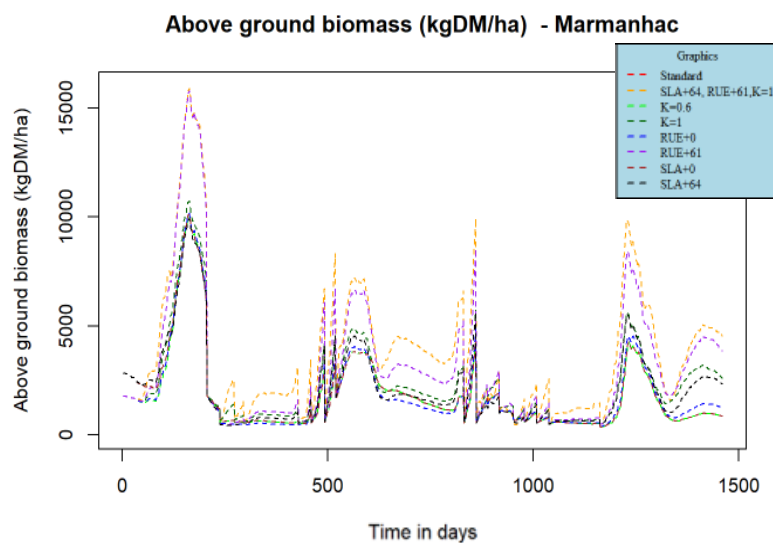


Figure 7 : Biomasse simulée, sensibilité au gradient de SLA, RUE et coefficient K en condition contrôle sur le site de Marmanhac sur 4 ans.

En faisant varier la SLA, RUE et K, on remarque une forte augmentation de la biomasse de 105% si on change les valeurs de ces trois paramètres du modèle quels que soient les jours (courbe orange comparée à la courbe rouge qui est sans modifications, Figure 7). Le paramètre le plus impactant sur la production de biomasse est l'augmentation la RUE de 61% (70% d'augmentation de la biomasse moyenne) comparé aux conditions standard. Les autres paramètres, malgré leur augmentation, n'impactent pas autant l'augmentation de biomasse : +29,5% pour K et 0,1% pour la SLA. Les plantes ne sont pas en déficit hydrique, et même, l'augmentation des traits permet d'avoir une WR plus remplie (60,02 contre 66,21mm avec les

paramètres standard et RUE+61, respectivement), sauf dans le cas de l'augmentation de la SLA seule qui diminue la WR (68,15 contre 59,53 mm) et l'association des trois traits où la WR diminue jusqu'à 52,13 mm (**Annexes 6.4 et 6.5**). Si ces paramètres fonctionnent en condition contrôle, il est possible qu'elles fonctionnent aussi en conditions d'ombrage, car les plantes s'adaptent aux conditions météorologiques. De plus, si la WR augmente, les plantes ne devraient pas être en déficit hydrique sous panneaux. J'ai donc réalisé les mêmes simulations en condition panneaux, soit avec 93% de rayonnement en moins, comme cela a été mesuré sur site.

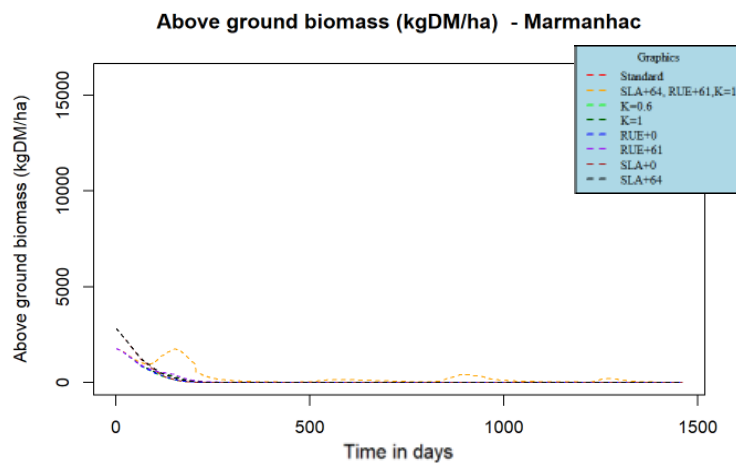


Figure 8 : Biomasse simulée, sensibilité au gradient de SLA, RUE et coefficient K en condition panneaux sur le site de Marmanhac sur 4 ans.

On voit sur la *Figure 8* que bien que l'ensemble des paramètres (SLA, RUE, K) soit augmenté à sa valeur maximum en condition d'ombrage, le modèle n'arrive pas à maintenir une biomasse (Courbe orange pointillées). Seul l'ajout des 3 paramètres permet une augmentation de la biomasse durant la première année de 135%, puis des pics aux alentours de la troisième et quatrième année en été. Concernant la WR, elle est très souvent saturée, donc il n'y a pas de déficit hydrique (**Annexe 6.4 et 6.5**). Deux hypothèses sont donc envisageables : soit le modèle n'est pas en capacité de simuler la pousse de la végétation en condition d'ombrage par la non prise en compte du rayonnement diffus qui est majoritaire sous panneaux, soit la baisse du rayonnement global (RG) observée sous panneaux, de l'ordre de 93%, ne correspond pas à la luminosité réellement captée par les plantes. Il est possible que les capteurs placés sous panneaux ne mesurent pas le rayonnement latéral qui passe des deux côtés des panneaux (haut et bas), Afin de tester la première hypothèse, nous nous sommes basés sur l'article de Al Mamun et al. (2023) dans lequel le modèle ApSim est testé dans différentes conditions d'ombrage. Il arrive à simuler une surproduction en cas d'ombrage faible et prédit

une chute de production dans le cas où la baisse de rayonnement est trop forte, en accord avec les observés. J'ai testé le modèle ModVege en appliquant un gradient de baisse de luminosité de 0 à 90% avec un pas de décrétement de 10 %.

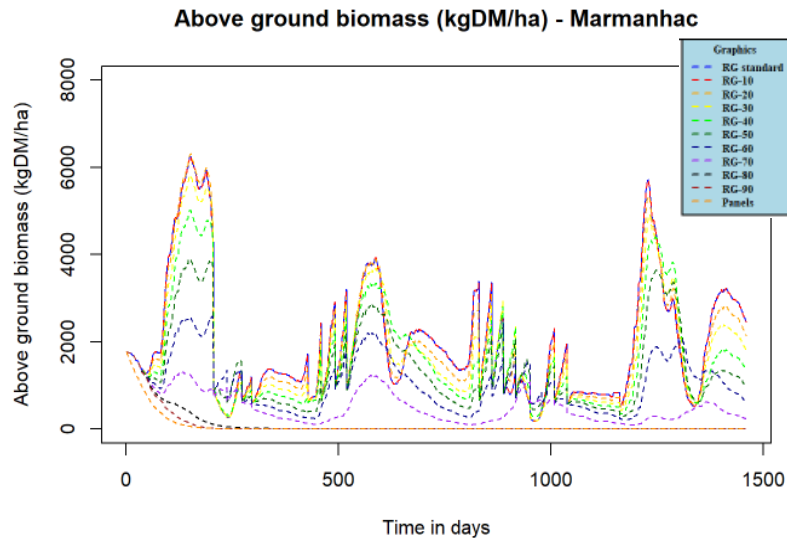


Figure 9 : Graphique de la réponse à une réduction de rayonnement sur le site de Marmanhac en contrôle sur 4 ans.

Ces résultats nous montrent que ModVege répond de la même manière qu'ApSim : il répond graduellement à la réduction de lumière (Figure 9). Tout d'abord, la diminution de RG diminue la biomasse : si on s'intéresse aux diminutions communément trouvées dans les articles (Marrou et al. 2013, Peri et al. 2007) qui sont de 20%, 50% et 70%, on se rend compte que la biomasse simulée par ModVege diminue de 4,2%, 29,9% et 73,75% respectivement. Donc, la réduction de lumière de 50% semble la plus adaptée pour le développement des plantes, cela pourrait atténuer les sécheresses printanières et estivales. A 90% de réduction du rayonnement, la biomasse est diminuée de 95%. On remarque des dynamiques saisonnières (printemps et été) durant lesquelles la biomasse obtenue en diminuant le RG de 10% et 20% est plus faible que celle obtenue en diminuant de 40% et 50% le RG (par exemple en été durant la deuxième année). La WR simulée arrive à saturation (79,74mm) quand le RG est diminué de 70%, donc à partir de cette diminution, les plantes ne seront pas en déficit hydrique. Elle augmente donc de 60,28 à 79,94 quand le RG diminue de 10 à 90%.

Ce résultat, additionné du fait que dans la littérature la réduction de rayonnement sous panneaux ne dépasse pas 70% (Marrou et al. 2013), avec une chute importante de la production dans le cas où le rayonnement serait inférieur à cette valeur seuil, nous a amené à penser que la mesure du rayonnement global sous panneau présentait un problème au regard de la valeur attendue par ModVege. En partant du constat que la fraction de rayonnement diffus est plus

importante sous panneaux qu'en contrôle (Healey et al. 1998), j'ai calculé le ratio RG/RD journalier en contrôle afin d'appliquer ce ratio sur le diffus sous panneau. On considère alors un rayonnement global non biaisé par les mesures sous panneaux pouvant être erronées.

$$RG_{panneaux} = RD_{panneaux} * \frac{RG_{control}}{RD_{control}}$$

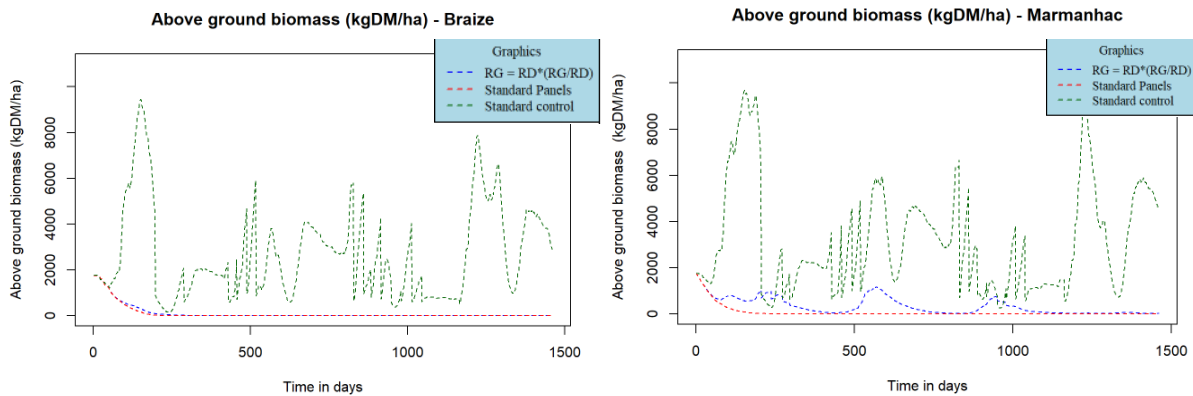


Figure 10 : Biomasse totale (kgDM/ha) simulée sur les sites de Braize (gauche) et Marmanhac (droite), en modifiant le $RG_{panneaux}$, sur 4 ans. La légende est la même sur les 2 graphiques.

En réalisant de nouveau les simulations présentées sur la Figure 10, on constate que le modèle arrive à maintenir une biomasse sur le site de Marmanhac, cette dernière augmentant de 5 fois. Cela est expliqué par le fait que le $RG_{panneaux}$ passe d'une réduction de 90% à une réduction de 70% du rayonnement global contrôle. On remarque que sur le site de Braize, la configuration des panneaux étant différente, le rayonnement global reste réduit de 80%, le modèle ne permettant pas de maintenir le couvert végétal. Les modifications apportées sont insuffisantes au vu de l'importante diminution du rayonnement, le facteur déterminant de la baisse de biomasse, sur le site de Braize. Il faudrait changer l'équation de la croissance dans le modèle (Tableau I), et mieux comprendre la réduction de rayonnement sur les sites. Il est difficile de simuler une biomasse correspondant aux résultats mesurés, à cause de la réduction de rayonnement de 90% (et éventuellement d'autres paramètres non explorés).

Discussion

1) Traits foliaires

Sur les trois sites, la communauté végétale s'est adaptée à l'ombrage par des modifications de traits foliaires. La SLA augmente à l'ombre de 44 à 67% dans nos résultats avec un effet plus marqué sur les sites à panneaux fixes, ce qui est semblable à la littérature où à 90%

d'ombre, la SLA augmente de 64% (Abraham et al. 2014, Retana-Cordero et al. 2022). La différence d'augmentation entre les trois sites peut être causée par l'infrastructure des panneaux : sur les sites de Braize et Marmanhac, les panneaux sont statiques, mais leur hauteur diffère d'environ 2m et l'inter-rangée d'1,15m tandis que sur Eglisottes, les panneaux sont rotatifs donc n'engendrent pas la même réduction de rayonnement. De plus, certaines plantes sont plus tolérantes à l'ombre (*Dactylis glomerata* par exemple) (Peri et al. 2005) et leur SLA pourra être plus grande sous panneaux (Yang et al. 2019, Liu et al. 2016, Valladares et al. 2005). L'augmentation de la SLA à l'ombre est majoritairement intraspécifique (**Annexe n°2**), donc certaines plantes peuvent s'adapter à l'ombre, mais pas toutes, comme *Arrhenatherum elatius* où sa SLA n'augmente pas de manière significative sur tous les sites, dû à la différence d'ombrage mais aussi à la capacité d'adaptation des plantes. La SLA étant un trait de la morphologie des feuilles, elle caractérise ces dernières. Ainsi, une plus grande SLA implique des feuilles plus longues et fines, se traduisant par des cellules du mésophylle plus petites (Abraham et al. 2014, Peri et al. 2007). L'augmentation de la SLA permet alors d'intercepter plus de lumière tout en investissant le moins d'énergie possible, et c'est l'accès à la lumière qui influence le plus la SLA (Guenni et al. 2008, Muraoka. 1997). Les résultats obtenus indiquent que la SLA augmente quand la LDMC diminue (corrélation négative de -0.22), ce qui est conforme à la littérature (Semchenko et al. 2012, Yang et al. 2019, Siebenkäs et al. 2015). De plus la masse sèche des feuilles diminue à 60% d'ombre de 41% (Abraham et al. 2014), la LDMC se basant sur la masse sèche, si celle-ci diminue, alors le ratio masse sèche/masse fraîche amenant à la LDMC diminuera aussi. Concernant la densité stomatique, on a observé qu'elle diminue à l'ombre de 6 à 30,5%, ce qui est conforme à la littérature (Nii and Kuroiwa 1988), mais elle n'est pas espèce-dépendant comme le montrent les résultats des tests statiques en **annexes n°2 et 3**. La densité stomatique est plus forte en inter-rangée sur le site de Marmanhac, pouvant s'expliquer par la plus faible hauteur des panneaux que sur les autres sites et que l'inter-rangée soit plus courte, soit par la différence dans l'ombre portée, soit dans l'échantillonnage où les feuilles ont été prises proches des panneaux, donc plus proche de l'ombre. Les stomates jouent un rôle important dans la physiologie des plantes : plus la densité stomatique est grande, plus les échanges gazeux sont importants (Idris et al. 2018), impliquant une plus grande photosynthèse et évapotranspiration. Cette dernière diminuant à l'ombre dans nos observations, conformément à la littérature (Retana-Cordero et al. 2022), on a donc une baisse d'échanges entre l'environnement externe et interne de la plante, minimisant par là même l'évapotranspiration. La densité stomatique impacte aussi la conductance stomatique : elle est 3 fois plus faible à l'ombre qu'à la lumière (Bjorkman and Holmgren. 1963), et une faible

conductance stomatique implique un faible taux photosynthétique. La photosynthèse sera donc aussi impactée par l'ombre : les feuilles des plantes à l'ombre auront un plus faible taux photosynthétique (Boardman 1977, Koike 1988). La photosynthèse dépend des échanges entre l'environnement externe et interne de la feuille mais aussi de l'interception de la lumière. Ce faible taux de photosynthèse implique une plus faible capacité des plantes à conduire ce processus, donc à l'ombre, les plantes doivent s'adapter à une faible photosynthèse en maximisant leurs chances de survie, par le biais de modifications morphologiques (Liu et al. 2016). Les plantes s'adaptent donc à la faible intensité lumineuse, maximisant leur interception lumineuse pour croître (Marrou et al. 2013) mais aussi d'autres traits foliaires, leur permettant de survivre malgré des réductions de rayonnement allant jusqu'à 70% dans la littérature et à 90% sur 2 de nos 3 sites. De plus, il aurait été intéressant de mesurer la conductance stomatique des feuilles, afin de confirmer les résultats de la littérature en système agro-forestier sur des systèmes d'agrivoltaïsme. Cela aurait permis d'affiner les réponses en fonction du type de panneau et de condition pédoclimatique : en effet, les panneaux rotatifs semblent avoir moins d'impact sur la SLA, la LDMC et la densité stomatique, on pourrait donc s'attendre à ce qu'ils en aient moins sur la conductance stomatique.

2) Simulations sous ModVege

Comme nous l'avons vu dans les résultats, nous n'avons pas réussi à simuler correctement la biomasse simulée sous panneaux sur les trois sites. A partir de 30% de diminution du RG, on remarque une diminution de biomasse, et en été, là où les températures sont les plus fortes, on a une hausse de biomasse comparé à l'hiver ou l'automne. La WR, elle, augmente quand le RG diminue, lié à une chute de l'évapotranspiration, ce qui implique une absence de stress hydrique sous panneaux (Voir **Annexe n°6**) car elle arrive à saturation. Si la plante n'est pas en stress hydrique, elle pourra alors se développer sans soucis majeurs lié à cette ressource. (Volaire 2018) Il nous est difficile, même en appliquant l'ensemble des modifications sur les paramètres et en nous basant sur le RD de maintenir un couvert végétal vivant. Or les données observées de production (Madej et al. 2023) montrent que malgré un rayonnement réduit de 90% sur les sites de Braize et Marmanhac et de 70% sur le site d'Eglisottes, le rendement est au moins maintenu. Notre modèle sous-estime la production de biomasse en condition d'ombrage. Dans la littérature, la biomasse est effectivement réduite à l'ombre de 44% (Santiago-Hernández et al. 2016), et la tolérance de certaines plantes à l'ombre (*Agrostis capillaris*, *Anthoxanthum odoratum*...) permet théoriquement à ces dernières d'augmenter leur rendement à 50% d'ombre (Semchenko et al. 2012). La réduction de 90% du rayonnement global sous panneau est trop

importante pour qu'un couvert végétal perdure. Ainsi, les travaux scientifiques présentent rarement des réductions de rayonnement sous panneaux de plus de 70%, et sont souvent aux alentours de 50% (Marrou et al. 2013, Edouard et al. 2022, Elamri, Cheviron, Mange, et al. 2018). Dans les rares cas où cette réduction dépasse 70%, alors la biomasse diminue fortement (Elamri, Cheviron, Lopez, et al. 2018). Plusieurs modèles rapportent des simulations insatisfaisantes sous panneaux : le modèle proposé par Homma et al. (2016) prédit une baisse de 20% du rendement sous 20% d'ombrage. Le modèle STICS (Artru et al. 2018) peine à simuler correctement la biomasse sous panneaux quand la réduction de rayonnement est de 65%, car ce modèle fonctionne au pas de temps journalier l'empêchant de prendre en compte les variations du rayonnement global en agroforesterie au cours de la journée. Toujours avec le modèle STICS, les chercheurs ont utilisé le ratio RG/RD pour simuler la biomasse, permettant d'améliorer les simulations (NSE = 0.55) comme vu dans nos résultats. Il y a cependant une perte de biomasse d'environ 1/3 à 65% d'ombre : cela explique notre drastique chute de biomasse à 90% d'ombre. Avec le modèle APSIM, la biomasse produite peut être simulée à -15% de rayonnement (Al Mamun et al. 2023), mais dans de multiples articles, l'ombrage pose un véritable problème. Le rendement peut être correctement simulé jusqu'à 50% d'ombrage avec toutefois une chute de 58% du rendement (Dilla et al. 2018). Ces différents constats nous amènent ainsi à une impasse. ModVege, malgré le nouveau paramétrage, n'arrive pas à simuler correctement le rendement en situation d'ombrage. Aucun autre modèle présenté dans la bibliographie ne semble être en mesure de maintenir une production avec 90% d'ombrage. De plus, le fait que les trois sites aient des conditions pédoclimatiques et des implantations de panneaux différents empêchent de décorrélérer les facteurs et donc de faire émerger de nouveaux processus. Il est intéressant de noter que selon les courbes de réponse de la WR à la réduction de rayonnement disponibles en **annexes n°6.4 et 6.5**, on ne retrouve pas de stress hydrique sous panneaux (Réserve remplie à 40% ou plus), ce qui permet de contrer les effets de la sécheresse, et augmenter la biomasse ne fait pas diminuer la WR. Une première voie d'amélioration serait donc de réitérer l'expérience dans des conditions contrôlées, en sélectionnant quelques espèces modèles et en faisant varier la croissance le long d'un gradient de luminosité allant de 0% à -90% de rayonnement. Il serait intéressant de mieux comprendre les effets de la qualité de la lumière sur le rendement : le ratio rouge proche/rouge lointain perçu par les phytochromes diminue à l'ombre (Ehret et al. 2015) et impacte l'augmentation de la SLA (Brainard et al. 2005), et la lumière bleue, quand elle diminue, joue sur la fermeture des stomates donc une baisse de l'évapotranspiration, et implique une augmentation de l'élongation de 10% pour capter un maximum de lumière (Barillot et al. 2010). Il faudrait aussi mesurer le gradient

vertical et horizontal de la lumière sous panneaux, pour évaluer si les mesures de rayonnement ont été sous-estimées. Cela permettrait un nouveau calibrage et d'évaluer si la réduction de 93% de rayonnement pourrait être moins prononcée.

Conclusion

Cette étude nous a permis d'analyser l'impact de l'ombre des panneaux photovoltaïques sur les communautés végétales, et l'exploration d'un modèle pour simuler la biomasse aérienne en fonction des données météorologiques. Les communautés végétales s'adaptent bien à l'ombrage en augmentant leur SLA et leur capacité à intercepter la lumière, mais aussi leur résistance à la sécheresse. Cependant, le modèle n'est pas encore en capacité de simuler correctement la biomasse aérienne sous panneaux dû à de multiples facteurs sur les trois sites, malgré une nette amélioration sur le site d'Eglisottes où les panneaux sont rotatifs. Il reste encore à explorer la piste de la qualité de la lumière, mais aussi la courbe spectrale des panneaux. Ceux-ci offrent une protection non négligeable des cultures et sont de bonnes alternatives aux énergies fossiles.

Remerciements

Je tiens à remercier mes encadrants de stage Catherine Picon-Cochard et Raphaël Martin, pour leur soutien et leur investissement, mais aussi pour toutes les connaissances que j'ai pu acquérir pendant mon stage. Je remercie toute l'équipe du projet, notamment Loan Madej, Perrine Brassier et Marylin Roncoroni, avec qui j'ai passé de bonnes journées terrains et leur aide précieuse sur le projet, mais aussi les PME JPee et Photosol, pour leur aide et leurs questions pertinentes. Je remercie aussi les stagiaires et notamment Louise Adam pour tous les bons moments passés et son aide, Clémence Salembier pour son soutien infailible et sa compagnie dans notre bureau et dans nos sorties, Thibaud Chalet pour sa gentillesse et son humour et Luc Rodriguez pour les parties de babyfoot. Je remercie aussi particulièrement Quentin Sigaud le fan de Kaamelott, Marylou Bedu la plus gentille des CDD, Anne-Marie Destombes la plus drôle des techniciennes, Leslie Pluchino et nos folles soirées, Gwennaëlle Auger et ses petits insectes, Gabriela Hellmeister et son lapin, et Lisa Besson la plus cool des doctorantes pour les bonnes soirées et nos moments de discussions qui m'ont beaucoup inspirée. Je remercie tout particulièrement mes parents dont le soutien m'a énormément aidé pendant ces 6 mois de stage, et mon petit frère Hugo qui m'a toujours redonné le sourire.

Bibliographie

Abraham EM, Kyriazopoulos AP, Parissi ZM, Kostopoulou P, Karatassiou M, Anjalianidou K, Katsouta C (2014) Growth, dry matter production, phenotypic plasticity, and nutritive value of three natural populations of *Dactylis glomerata* L. under various shading treatments. *Agrofor Syst* 88:287–299.

Adam L, Martin R, Jabot F, Bellocchi G, Blaise M (2023) Reproducibility Study of the mechanist model “MODVEGE”.

Al Mamun MA, Garba II, Campbell S, Dargusch P, deVoil P, Aziz AA (2023) Biomass production of a sub-tropical grass under different photovoltaic installations using different grazing strategies. *Agric Syst* 208:103662.

Arnault P Evolution des flux d'eau dans des plantes herbacées prairiales lors de sécheresses.

Artru S, Dumont B, Ruget F, Launay M, Ripoche D, Lassois L, Garré S (2018) How does STICS crop model simulate crop growth and productivity under shade conditions? *Field Crops Res* 215:83–93.

Barillot R, De Swaef T, Combes D, Durand J-L, Escobar-Gutiérrez AJ, Martre P, Perrot C, Roy E, Frak E (2021) Leaf elongation response to blue light is mediated by stomatal-induced variations in transpiration in *Festuca arundinacea* Lawson T (ed). *J Exp Bot* 72:2642–2656.

Barillot R, Frak E, Combes D, Durand J-L, Escobar-Gutiérrez AJ (2010) What determines the complex kinetics of stomatal conductance under blueless PAR in *Festuca arundinacea*? Subsequent effects on leaf transpiration. *J Exp Bot* 61:2795–2806.

Bilan démographique Insee (2022)

Bilan énergétique RTE (2022)

Bjorkman O, Holmgren P (1963) Adaptability of the Photosynthetic Apparatus to Light Intensity in Ecotypes from Exposed and Shaded Habitats. *Physiol Plant* 16:889–914.

Blanco LJ, Paruelo JM, Oesterheld M, Agüero WD (2022) Radiation use efficiency of the herbaceous layer of dry Chaco shrublands and woodlands: Spatial and temporal patterns Rocchini D (ed). *Appl Veg Sci* 25. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/avsc.12653> (12 January 2023, date last accessed).

Boardman NK (1977) Comparative Photosynthesis of Sun and Shade Plants. *Annu Rev Plant Physiol* 28:355–377.

Brainard DC, Bellinder RR, DiTommaso A (2005) Effects of canopy shade on the morphology, phenology, and seed characteristics of Powell amaranth (*Amaranthus powellii*). *Weed Sci* 53:175–186.

Changement climatique 2021: les bases scientifiques physiques : résumé à l'intention des décideurs : contribution du groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2021) GIEC, Genève, Suisse.

Choat B, Jansen S, Brodribb TJ, Cochard H, Delzon S, Bhaskar R, Bucci SJ, Feild TS, Gleason SM, Hacke UG, Jacobsen AL, Lens F, Maherali H, Martínez-Vilalta J, Mayr S,

- Mencuccini M, Mitchell PJ, Nardini A, Pittermann J, Pratt RB, Sperry JS, Westoby M, Wright IJ, Zanne AE (2012) Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491:752–755.
- Couturier A, Frak E, Rambaud Q, Louarn G, Barillot R, Durand J-L, Escobar-Gutiérrez A, Combes D (2022) How much do radiative transfer models influence red:far-red simulation and subsequent modelling of plant photomorphogenesis? Zhu X-G (ed). *Silico Plants* 4:013.
- Dilla A, Smethurst PJ, Barry K, Parsons D, Denboba M (2018) Potential of the APSIM model to simulate impacts of shading on maize productivity. *Agrofor Syst* 92:1699–1709.
- Druille M, Oyarzabal M, Oesterheld M (2019) Radiation Use Efficiency of Forage Resources: A Meta-Analysis. *Agron J* 111:1770–1778.
- Dupraz C, Marrou H, Talbot G, Dufour L, Nogier A, Ferard Y (2011) Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renew Energy* 36:2725–2732.
- Edouard S, Escobar-Gutierrez AJ, Van Iseghem M, Barillot R, Louarn G, Combes D (2022) Is the turbid medium-based approach pertinent for estimating light interception when simulating the growth of a crop in an agri-photovoltaic system? *Biosyst Eng* 224:131–142.
- Ehret M, Graß R, Wachendorf M (2015) The effect of shade and shade material on white clover/perennial ryegrass mixtures for temperate agroforestry systems. *Agrofor Syst* 89:557–570.
- Elamri Y, Cheviron B, Lopez J-M, Dejean C, Belaud G (2018) Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agric Water Manag* 208:440–453.
- Elamri Y, Cheviron B, Mange A, Dejean C, Liron F, Belaud G (2018) Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:1285–1298.
- Finkelman RB, Wolfe A, Hendryx MS (2021) The future environmental and health impacts of coal. *Energy Geosci* 2:99–112.
- Garnier E, Cortez J, Billès G, Navas M-L, Roumet C, Debussche M, Laurent G, Blanchard A, Aubry D, Bellmann A, Neill C, Toussaint J-P (2004) PLANT FUNCTIONAL MARKERS CAPTURE ECOSYSTEM PROPERTIES DURING SECONDARY SUCCESSION. *Ecology* 85:2630–2637.
- Goetzberger A, Zastrow A (1982) On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *Int J Sol Energy* 1:55–69.
- Guenni O, Seiter S, Figueroa R Growth responses of three *Brachiaria* species to light intensity and nitrogen supply.
- Hassanpour Adeg E, Selker JS, Higgins CW (2018) Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency Villarini M (ed). *PLOS ONE* 13:e0203256.

Healey KD, Hammer GL, Rickert KG, Bange MP (1998) Radiation use efficiency increases when the diffuse component of incident radiation is enhanced under shade. *Aust J Agric Res* 49:665.

Holzworth DP, Huth NI, deVoil PG, Zurcher EJ, Herrmann NI, McLean G, Chenu K, van Oosterom EJ, Snow V, Murphy C, Moore AD, Brown H, Whish JPM, Verrall S, Fainges J, Bell LW, Peake AS, Poulton PL, Hochman Z, Thorburn PJ, Gaydon DS, Dalgliesh NP, Rodriguez D, Cox H, Chapman S, Doherty A, Teixeira E, Sharp J, Cichota R, Vogeler I, Li FY, Wang E, Hammer GL, Robertson MJ, Dimes JP, Whitbread AM, Hunt J, van Rees H, McClelland T, Carberry PS, Hargreaves JNG, MacLeod N, McDonald C, Harsdorf J, Wedgwood S, Keating BA (2014) APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environ Model Softw* 62:327–350.

Homma M, Doi T, Yoshida Y (2016) A Field Experiment and the Simulation on Agrivoltaic-systems regarding to Rice in a Paddy Field.

Idris A, Linatoc AC, Aliyu AM, Muhammad SM, Bakar MFBA (2018) Effect of Light on the Photosynthesis, Pigment Content and Stomatal Density of Sun and Shade Leaves of *Vernonia Amygdalina*. *Int J Eng Technol* 7:209.

Jouven M, Carrere P, Baumont R (2006a) Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description. *Grass Forage Sci* 61:112–124.

Jouven M, Carrere P, Baumont R (2006b) Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 2. Model evaluation. *Grass Forage Sci* 61:125–133.

Koike T (1988) Leaf Structure and Photosynthetic Performance as Related to the Forest Succession of Deciduous Broad-Leaved Trees1. *Plant Species Biol* 3:77–87.

Liu Y, Dawson W, Prati D, Haeuser E, Feng Y, van Kleunen M (2016) Does greater specific leaf area plasticity help plants to maintain a high performance when shaded? *Ann Bot* 118:1329–1336.

Louault F, Pillar VD, Aufrère J, Garnier E, Soussana J -F. (2005) Plant traits and functional types in response to reduced disturbance in a semi-natural grassland. *J Veg Sci* 16:151–160.

Madej L, Picon-Cochard C, Bouhier de l'Ecluse C, Cogne C, Michaud L, Roncoroni M, and Colosse D. 2023. One Year of Grassland Vegetation Dynamics in two Sheep-Grazed Agrivoltaic System. AIP Conference Proceedings, in press.

Marrou H, Wery J, Dufour L, Dupraz C (2013) Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *Eur J Agron* 44:54–66.

McLAUGHLIN JE, Boyer JS (2004) Sugar-responsive Gene Expression, Invertase Activity, and Senescence in Aborting Maize Ovaries at Low Water Potentials. *Ann Bot* 94:675–689.

Muraoka H Combined effects of light and water availability on photosynthesis and growth of *Arisaema heterophyllum* in the forest understory and an open site.

- Nii N, Kuroiwa T (1988) Anatomical changes including chloroplast structure in peach leaves under different light conditions. *J Hortic Sci* 63:37–45.
- Peri PL, Moot DJ, Jarvis P, McNeil DL, Lucas RJ (2007) Morphological, Anatomical, and Physiological Changes of Orchardgrass Leaves Grown under Fluctuating Light Regimes. *Agron J* 99:1502–1513.
- Peri PL, Moot DJ, McNeil DL (2005) Modelling photosynthetic efficiency (α) for the light-response curve of cocksfoot leaves grown under temperate field conditions. *Eur J Agron* 22:277–292.
- Peri PL, Moot DJ, McNeil DL (2006) Validation of a canopy photosynthesis model for cocksfoot pastures grown under different light regimes. *Agrofor Syst* 67:259–272.
- Philipps DS, Ise F, Warmuth W, GmbH PP Photovoltaics Report.
- Retana-Cordero M, Humphrey S, Gómez C (2022) Effect of Radiation Quality and Relative Humidity on Intumescence Injury and Growth of Tomato Seedlings. *HortScience* 57:1257–1266.
- Santiago-Hernández F, López-Ortiz S, Ávila-Reséndiz C, Jarillo-Rodríguez J, Pérez-Hernández P, de Dios Guerrero-Rodríguez J (2016) Physiological and production responses of four grasses from the genera *Urochloa* and *Megathyrsus* to shade from *Melia azedarach* L. *Agrofor Syst* 90:339–349.
- Semchenko M, Lepik M, Götzenberger L, Zobel K (2012) Positive effect of shade on plant growth: amelioration of stress or active regulation of growth rate?: Effects of shade on plant growth. *J Ecol* 100:459–466.
- Siebenkäs A, Schumacher J, Roscher C (2015) Phenotypic plasticity to light and nutrient availability alters functional trait ranking across eight perennial grassland species. *AoB PLANTS* 7. <https://academic.oup.com/aobpla/article/doi/10.1093/aobpla/plv029/200562> (12 January 2023, date last accessed).
- Valladares F, Arrieta S, Aranda I, Lorenzo D, Sanchez-Gomez D, Tena D, Suarez F, Pardos JA (2005) Shade tolerance, photoinhibition sensitivity and phenotypic plasticity of *Ilex aquifolium* in continental Mediterranean sites. *Tree Physiol* 25:1041–1052.
- Volaire F (2018) A unified framework of plant adaptive strategies to drought: Crossing scales and disciplines. *Glob Change Biol* 24:2929–2938.
- Yang M, Liu M, Lu J, Yang H (2019) Effects of shading on the growth and leaf photosynthetic characteristics of three forages in an apple orchard on the Loess Plateau of eastern Gansu, China. *PeerJ* 7:e7594.

Annexes

Annexe n°1 : Biomasses récoltées aux différentes dates de fauches par année/site en kg.ha⁻¹. Réalisé par Perrine BRASSIER, Loan MADEJ et Luc MICHAUD.

Site	Année	Date de fauche		Biomasse récoltée C		Biomasse récoltée P		Biomasse récoltée I	
B	2020	16/07/2020	13/08/2020	2790,6	252,7	3004	1255,3	1912	281,8
		14/09/2020	15/10/2020	992,2	916,8	1262	1463,2	807,2	615,8
	2021	05/03/2021	01/04/2021	692,0	678,2	1976	2199,2	422,2	813,6
		03/05/2021	01/06/2021	2070,6	6604,8	2771,6	3503,2	1872,4	4618,2
	2022	08/04/2022	10/05/2022	1272,2	3202,2	1563,8	1778,4	1192,8	2479,8
02/06/2022		04/07/2022	1150,2	4148,4	2850,6	4465,2	2143,8	2066,4	
05/08/2022		06/09/2022	1175,2	483,6	2143,4	8880,8	895,8	883,6	
10/10/2022		07/11/2022	669,2	386,8	1676,8	476,4	999,4	709,2	
2023	10/03/2023		0		225,2		135,4		
M	2020	24/07/2020	25/08/2020	4853,8	752,6	2924,8	2421,6	4203,6	3223,2
		29/09/2020	22/10/2020	775,2	761,8	1378,4	493,4	2046,8	756,8
	2021	03/03/2021	02/04/2021	302,5	367,4	181,1	640,2	69,2	467,4
		07/05/2021	03/06/2021	1384,8	6502,2	1720,4	3011,2	1907,2	5436,4
	2022	11/04/2022	11/05/2022	803,6	734	527,6	1210,8	290,8	1064,8
07/06/2022		06/07/2022	5144	6436,6	2047,6	1923,2	6140,8	7763,6	
09/08/2022		05/09/2022	2721,4	554,2	2158,2	1082,4	5300	1864,4	
05/10/2022		04/11/2022	966,6	1026	1887,4	435,2	3272,4	600,8	
2023	08/03/2023		0		0		0		
E	2022	06/04/2022	03/05/2022	792,6	3441	2331,2	5706,8	2026,8	5240,4
		31/05/2022	27/06/2022	3411,2	3313,8	8893,8	3808,2	10382	7438
		01/08/2022	01/09/2022	1917,8	1162,4	3432,8	1346,8	2039,6	970,4
	2023	15/02/2023	13/03/2023	304,2	154,6	2477	1110,4	1034,2	488,2
		17/04/2023	23/05/2023	5546	6753,8	5066,2	7714	3462,6	8381,4

Annexe n°2 : Relevé botanique (B=Braize, M=Marmanhac, E=Eglisottes), les espèces sont associées avec le pourcentage de recouvrement.

Site	C		P		I	
B	Arrhenatherum elatius (0,38%)	Cerastium glomeratum (2,15%)	Arrhenatherum elatius (2,87%)	Cerastium glomeratum (1,56%)	Arrhenatherum elatius (3,23%)	Cerastium glomeratum (2,59%)
	Dactylis glomerata (7,44%)	Erigeron sumatrensis (0,78%)	Dactylis glomerata (14%)	Erigeron sumatrensis (6,88%)	Dactylis glomerata (43,61%)	Erigeron sumatrensis (1,34%)
	Hypochaeris radicata (3,46%)	Picris hieracioides (0,58%)	Hypochaeris radicata (0,73%)	Picris hieracioides (1,29%)	Hypochaeris radicata (16,47%)	Picris hieracioides (0,66%)
	Plantago lanceolata (16,91%)	Rumex acetosella (4,23%)	Plantago lanceolata (0,54%)	Rumex acetosella (1,45%)	Plantago lanceolata (6,15%)	Rumex acetosella (9,10%)
	Taraxacum officinale (1,24%)	Trifolium repens (4,24%)	Taraxacum officinale (2,54%)	Trifolium repens (1,38%)	Taraxacum officinale (1,39%)	Trifolium repens (2,73%)
	Vulpia bromoides (46,80%)		Vulpia bromoides (16,24%)		Vulpia bromoides (29,77%)	
M	Agrostis capillaris (22,59%)	Arrhenatherum elatius (28,72%)	Agrostis capillaris (6,97%)	Arrhenatherum elatius (48,38%)	Agrostis capillaris (6,51%)	Arrhenatherum elatius (39,68%)
	Dactylis glomerata (0,57%)	Festuca ovina (13,37%)	Dactylis glomerata (0,01%)	Festuca ovina (0,38%)	Dactylis glomerata (0,11%)	Festuca ovina (0,56%)
	Hypochaeris radicata (7,41%)	Plantago lanceolata (4,30%)	Hypochaeris radicata (2,24%)	Plantago lanceolata (0,19%)	Hypochaeris radicata (4,32%)	Plantago lanceolata (1,43%)
	Poa pratensis (2,15%)	Ranunculus acris (0,59%)	Poa pratensis (17,89%)	Ranunculus acris (0,24%)	Poa pratensis (9,98%)	Ranunculus acris (3,59%)
	Rumex acetosella (2,80%)	Taraxacum officinale (0,77%)	Rumex acetosella (1,77%)	Taraxacum officinale (1,78%)	Rumex acetosella (2,22%)	Taraxacum officinale (0,78%)
	Trifolium repens (2,37%)	Veronica arvensis (0,68%)	Trifolium repens (0,62%)	Veronica arvensis (1,52%)	Trifolium repens (3,37%)	Veronica arvensis (2,85%)
E	Anthoxanthum odoratum (31,2%)	Arrhenatherum elatius (21,6%)	Anthoxanthum odoratum (10,2%)	Arrhenatherum elatius (34%)	Anthoxanthum odoratum (29%)	Arrhenatherum elatius (36,4%)
	Hypericum perforatum (0,1%)	Hypochaeris radicata (10%)	Hypericum perforatum (0,6%)	Hypochaeris radicata (0,4%)	Hypericum perforatum (1,2%)	Hypochaeris radicata (2%)
	Luzula campestris (1,9%)	Plantago lanceolata (0,5%)	Luzula campestris (0,6%)	Poa pratensis (26,4%)	Luzula campestris (0%)	Taraxacum officinale (1,4%)
	Rumex acetosella (21%)	Taraxacum officinale (1%)	Rumex acetosella (1,6%)	Taraxacum officinale (0,9%)	Rumex acetosella (0,2%)	Trifolium repens (0,5%)
	Trifolium repens (0,1%)		Trifolium repens (1,9%)			

Annexe n°3 : Sorties statistiques de la SLA, le LDMC, et la densité stomatique (Anova).
Sont présentées les moyennes associées aux écarts-types. Les lettres différentes
représentent la différence significative entre les espèces au sein des traitements. La SLA
est exprimée en cm².g⁻¹.

Espèce (B)	C SLA	I SLA	P SLA	C LDMC	I LDMC	P LDMC
<i>Arrhenatherum</i>	194,33 ± 33,06a	208,65 ± 30,99a	238,99 ± 42,81a	0,32 ± 0,04a	0,33 ± 0,02a	0,27 ± 0,03b (**)
<i>Cerastium</i>	115,40 ± 11,67a	136,89 ± 19,87a	244,52 ± 51,78b (*)	0,13 ± 0,01a	0,14 ± 0,01a	0,08 ± 0,01b (*)
<i>Dactylis</i>	193,22 ± 31,32a	203,39 ± 31,59a	197,86 ± 55,70a	0,27 ± 0,02a	0,26 ± 0,03a	0,20 ± 0,03b (***)
<i>Erigeron</i>	194,95 ± 25,31a	206,05 ± 48,05a	541,09 ± 96,10b (***)	0,16 ± 0,01a	0,15 ± 0,02a	0,11 ± 0,02b (***)
<i>Hypochaeris</i>	126,84 ± 28,21a	145,67 ± 23,02a	295,46 ± 67,56b (***)	0,16 ± 0,03a	0,14 ± 0,01a	0,10 ± 0,02b (***)
<i>Picris</i>	168,98 ± 31,27a	222,61 ± 29,16a	300,27 ± 57,69b (***)	0,14 ± 0,03a	0,15 ± 0,01a	0,12 ± 0,02a
<i>Plantago</i>	132,94 ± 38,48a	133,00 ± 48,23a	203,11 ± 39,08a	0,19 ± 0,02a	0,18 ± 0,03a	0,14 ± 0,03b (**)
<i>Rumex</i>	126,114 ± 33,52a	223,47 ± 76,95a	269,33 ± 119,20b (***)	0,14 ± 0,02a	0,11 ± 0,03a	0,12 ± 0,02a
<i>Taraxacum</i>	208,41 ± 39,30a	236,04 ± 60,80a	358,68 ± 52,88b (***)	0,16 ± 0,01a	0,13 ± 0,01a	0,13 ± 0,02a
<i>Trifolium</i>	255,72 ± 19,11a	212,41 ± 45,31a	400,08 ± 41,17b (***)	0,20 ± 0,01a	0,20 ± 0,01a	0,16 ± 0,02b (*)
<i>Vulpia</i>	117,94 ± 17,31a	81,44 ± 13,070a	131,98 ± 51,54a	0,24 ± 0,020a	0,29 ± 0,03b (**)	0,22 ± 0,04a
Espèce (M)	C SLA	I SLA	P SLA	C LDMC	I LDMC	P LDMC
<i>Arrhenatherum</i>	194,75 ± 39,10a	207,97 ± 51,59a	255,15 ± 55,63a	0,27 ± 0,03a	0,27 ± 0,04a	0,23 ± 0,02a
<i>Dactylis</i>	148,08 ± 51,03a	178,31 ± 74,91a	269,64 ± 97,12a	0,32 ± 0,02a	0,25 ± 0,04a	0,24 ± 0,03b (*)
<i>Festuca</i>	105,35 ± 25,76a	145,61 ± 26,31a	123,81 ± 56,07a	0,33 ± 0,03a	0,26 ± 0,03a	0,29 ± 0,03a
<i>Hypochaeris</i>	215,92 ± 43,14a	255,86 ± 42,62a	433,32 ± 81,33b (***)	0,10 ± 0,01a	0,08 ± 0,01a	0,13 ± 0,02b (*)
<i>Poa</i>	167,75 ± 65,77a	186,55 ± 93,07a	205,32 ± 69,95a	0,20 ± 0,08a	0,29 ± 0,03b (**)	0,26 ± 0,03a
<i>Rumex</i>	161,77 ± 32,43a	316,81 ± 156,81b (**)	478,86 ± 105,66c (***)	0,17 ± 0,03a	0,10 ± 0,02a	0,07 ± 0,01b (***)
<i>Taraxacum</i>	264,03 ± 57,11a	362,86 ± 84,10a	416,56 ± 121,62b (***)	0,12 ± 0,01a	0,10 ± 0,01a	0,12 ± 0,03a
<i>Trifolium</i>	178,98 ± 86,57a	276,48 ± 58,52a	359,50 ± 93,19b (**)	0,20 ± 0,04a	0,24 ± 0,02a	0,18 ± 0,02b
<i>Veronica</i>	147,41 ± 31,28a	201,66 ± 69,10a	319,82 ± 154,87b (**)	0,20 ± 0,06a	0,17 ± 0,03a	0,17 ± 0,05a
Espèce (E)	C SLA	I SLA	P SLA	C LDMC	I LDMC	P LDMC
<i>Anthoxanthum</i>	213,36 ± 39,36a	146,69 ± 71,35a	256,99 ± 91,46a	0,29 ± 0,06a	0,48 ± 0,22b (***)	0,27 ± 0,02a
<i>Arrhenatherum</i>	160,35 ± 39,88a	181,76 ± 63,80a	278 ± 65,15b (***)	0,33 ± 0,05a	0,33 ± 0,03a	0,28 ± 0,05b (***)
<i>Hypochaeris</i>	204,91 ± 33,87a	247,89 ± 61,25a	310,62 ± 43,64b (**)	0,11 ± 0,01a	0,09 ± 0,01a	0,07 ± 0,01a
<i>Luzula</i>	125,12 ± 32,30a	116,44 ± 12,18a	151,48 ± 35,87a	0,24 ± 0,03a	0,21 ± 0,03a	0,17 ± 0,02a
<i>Rumex</i>	188,12 ± 32,30a	272,76 ± 142,90a	257,37 ± 33,94a	0,10 ± 0,04a	0,11 ± 0,02a	0,10 ± 0,01a
<i>Taraxacum</i>	248,08 ± 41,22a	244,00 ± 19,22a	279,78 ± 43,70a	0,14 ± 0,01a	0,14 ± 0,01a	0,14 ± 0,02a
<i>Trifolium</i>	247,30 ± 59,75a	234,12 ± 60,88a	341,02 ± 68,40a	0,19 ± 0,03a	0,20 ± 0,02a	0,18 ± 0,01a
Espèce (B)	C Densité stomatique	I Densité stomatique	P Densité stomatique			
<i>Arrhenatherum</i>	65,56 ± 39,10a	53,33 ± 21,67a	45,56 ± 9,62a			
<i>Cerastium</i>	59,44 ± 4,19a	47,78 ± 21,75a	51,11 ± 17,82a			
<i>Dactylis</i>	60,56 ± 14,94a	110,56 ± 28,50a	83,33 ± 26,82a			
<i>Erigeron</i>	62,78 ± 13,37a	58,89 ± 8,22a	21,11 ± 0,96a			
<i>Hypochaeris</i>	64,44 ± 25,95a	88,89 ± 6,94a	102,22 ± 34,17a			
<i>Picris</i>	87,22 ± 32,89a	116,11 ± 35,21a	88,33 ± 30,32a			
<i>Plantago</i>	131,11 ± 0,96a	99,44 ± 30,29a	100,56 ± 26,48a			
<i>Rumex</i>	75,56 ± 0,96a	101,11 ± 37a	48,33 ± 13,02a			
<i>Taraxacum</i>	94,44 ± 22,69a	77,22 ± 25,51a	65,56 ± 38,53a			
<i>Trifolium</i>	110,56 ± 5,85a	140 ± 56,20a	80 ± 8,33a			
Espèce (M)	C Densité stomatique	I Densité stomatique	P Densité stomatique			
<i>Arrhenatherum</i>	43,89 ± 16,36a	57,78 ± 10,18a	36,11 ± 15,12a			

<i>Dactylis</i>	72,22 ± 26,48a	55,56 ± 14 17a	36,15 ± 5,36a
<i>Hypochaeris</i>	73,89 ± 12,95a	138,89 ± 61,29a	45,56 ± 7,52a
<i>Poa</i>	79,44 ± 9,77a	65 ± 9,28a	51,11 ± 13,37a
<i>Rumex</i>	67,78 ± 17,66a	48,33 ± 7,26a	23,89 ± 4,19a
<i>Taraxacum</i>	72,22 ± 6,31a	110 ± 59,47a	56,67 ± 18,78a
<i>Trifolium</i>	62,22 ± 17,66a	116,67 ± 60,58a	68,33 ± 63,11a
<i>Veronica</i>	111,11 ± 24,74a	78,33 ± 24,55a	73,33 ± 26,46a
Espèce (E)	C Densité stomatique	I Densité stomatique	P Densité stomatique
<i>Anthoxanthum</i>	48,89 ± 2,55a	44,44 ± 8,39a	53,89 ± 9,48a
<i>Arrhenatherum</i>	55,56 ± 5,85a	76,11 ± 17,66a	66,67 ± 8,82a
<i>Hypochaeris</i>	98,33 ± 7,26a	125,56 ± 20,71a	66,11 ± 13,57a
<i>Luzula</i>	40,00 ± 15,28a	38,33 ± 36,78a	27,22 ± 5,36a
<i>Rumex</i>	42,22 ± 9,77a	36,11 ± 11,10a	37,78 ± 1,92a
<i>Taraxacum</i>	77,50 ± 31,82a	98,89 ± 19,53a	81,11 ± 19,53a
<i>Trifolium</i>	67,78 ± 11,34a	70,00 ± 20,48a	65,00 ± 4,41a

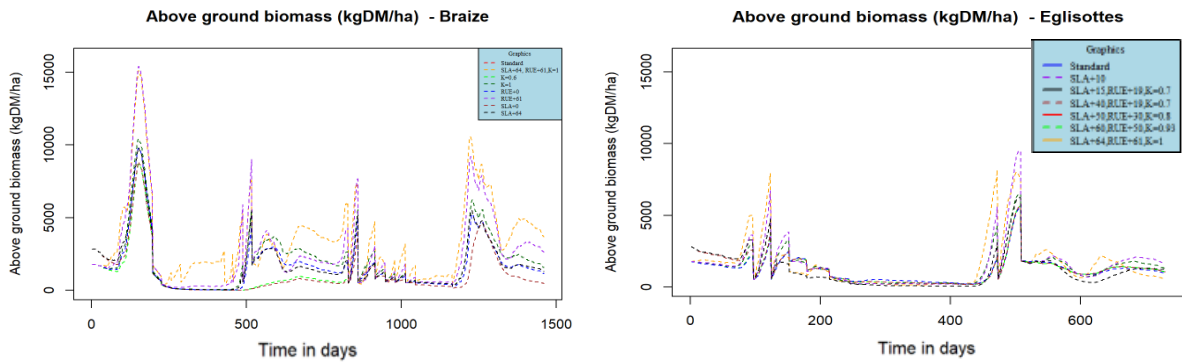
Annexe n°4 : Données météorologiques des 3 sites en fonction des 3 traitements. 2020 : juin-décembre, 2023 : janvier - avril. Pour Églisottes: mars 2022 à avril 2023. Les données en % sont le pourcentage de données réelles prises en compte dans le calcul.

Site	Année	Rayonnement (RG) (MJ.m ²)			Évapo-transpiration (ET0, mm)			Température TM (C°)			Pluviométrie (mm)
		C	P	I	C	P	I	C	P	I	
B	2020	1482 (47,48%)	137 (47,48%)	1016 (0%)	970	172	699	12,05 (0%)	12,17 (0%)	12,47 (0%)	641
	2021	1357 (33,34%)	128 (21,27%)	986 (0%)	885	150	647	11,10 (0%)	11,27 (0%)	11,50 (0%)	816
	2022	1377 (0%)	127 (0%)	1067 (58,21%)	927	167	757	12,69 (58,20%)	12,91 (58,20%)	12,91 (58,21%)	428
	2023	1329 (0%)	121 (0%)	988 (100%)	900	169	719	12,74 (100%)	12,88 (100%)	12,79 (100%)	465
M	2020	1536 (46,16%)	130 (49,15%)	1035 (47%)	963	163	292	10,86 (0%)	12,07 (0%)	10,88 (0%)	1553
	2021	1429 (43,36%)	138 (43,36%)	329 (43,36%)	862	162	263	10,88 (0%)	11,98 (0%)	10,77 (0%)	1468
	2022	1654 (0%)	149 (0%)	956 (0%)	1082	170	291	11,88 (56,71%)	13,03 (56,71%)	11,57 (56,71%)	970
	2023	1660 (0%)	149 (0%)	871 (100%)	1063	170	267	11,61 (100%)	11,66 (100%)	11,32 (100%)	1064
E	2022	1489 (59,78%)	255 (59,78%)	1215 (59,78%)	1019	24	834	13,32 (98,29%)	13,36 (98,29%)	12,98 (98,29%)	528
	2023	1197 (77,00%)	250 (77%)	1241 (77%)	1037	246	853	13,43 (100%)	13,24 (100%)	13,08 (100%)	560

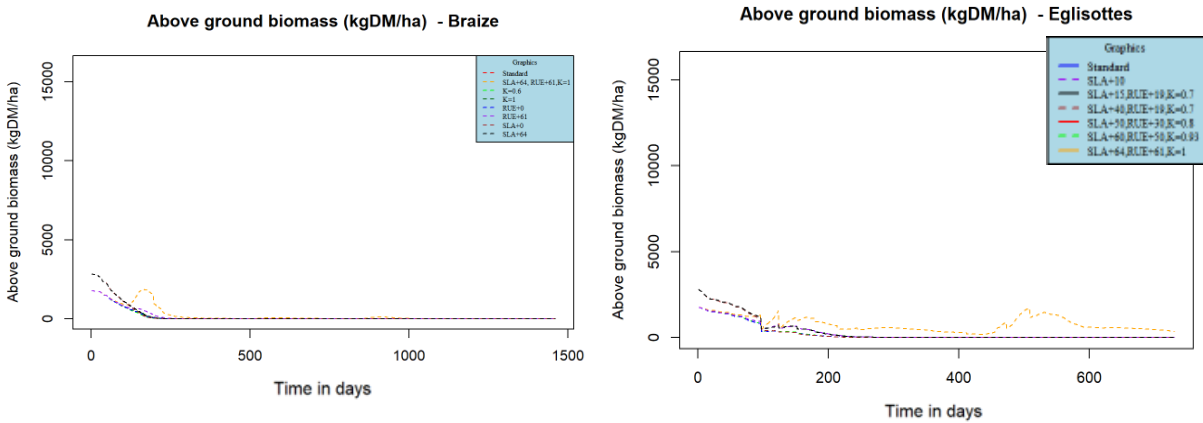
Annexe n°5 : Résultats des régressions linéaires effectuées sur les 3 sites en contrôle.

Indice	Braize	Marmanhac	Eglisottes
MAE	823,74	912,57	75,99
NSE	0,15	0,10	0,05

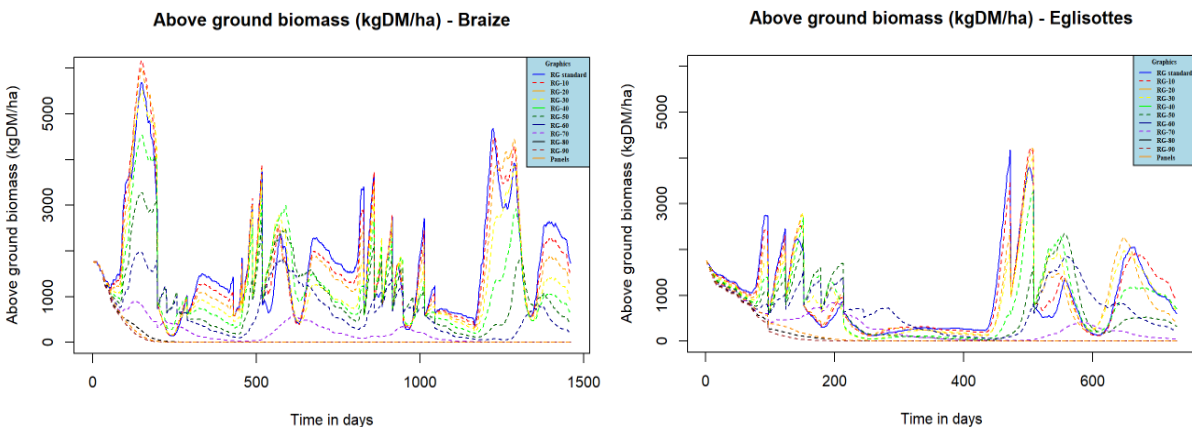
Annexe n°6 : Graphiques obtenus des différents changements dans ModVege sur les sites de Braize et Églisottes.



6.1 : Biomasse simulée, sensibilité au gradient de SLA, RUE et coefficient K en condition contrôle sur le site de Braize sur 4 ans et sur Eglisottes sur 2 ans.

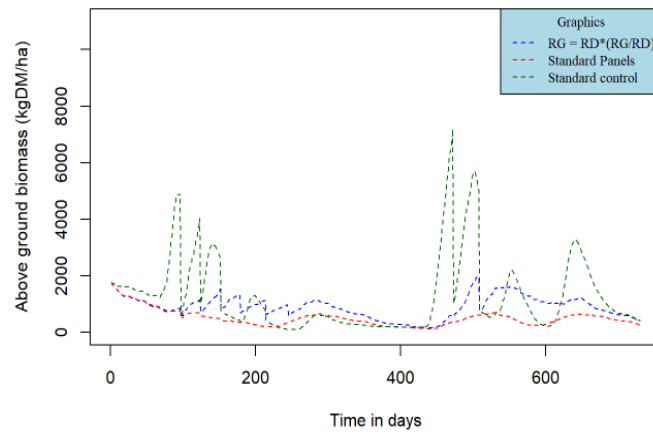


6.2 : Biomasse simulée, sensibilité au gradient de SLA, RUE et coefficient K en condition panneaux sur le site de Braize sur 4 ans et sur Eglisottes sur 2 ans.

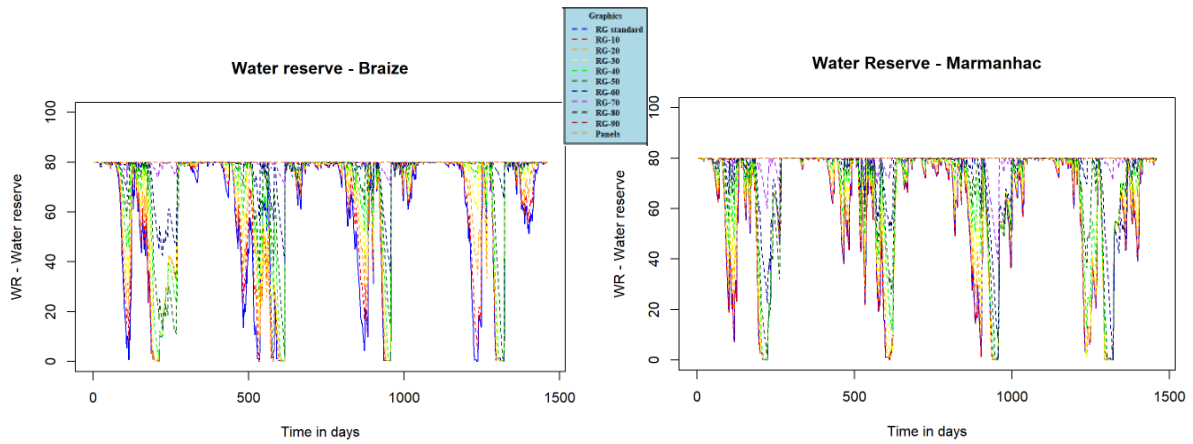


6.3 : Graphique de la réponse à une réduction de rayonnement sur le site de Braize en contrôle sur 4 ans, et sur le site d'Églisottes sur 2 ans.

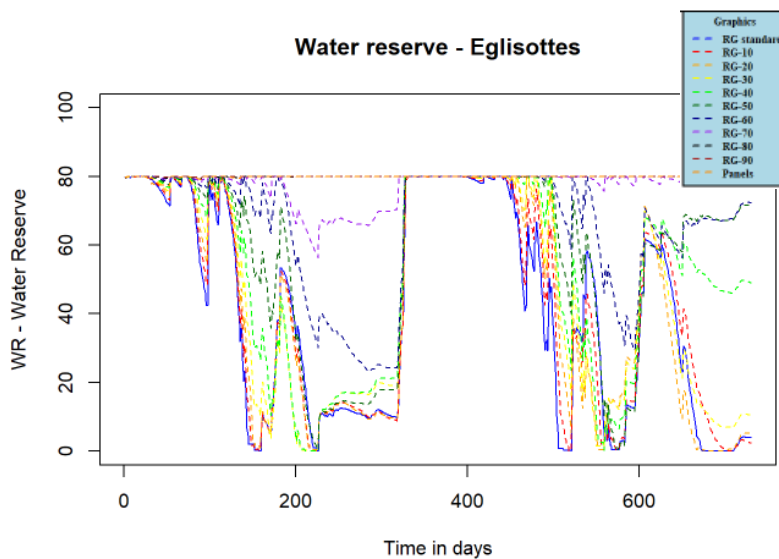
Above ground biomass (kgDM/ha) - Eglisottes



6.4 : Biomasse totale (kgDM/ha) simulée sur le site d'Eglisottes, en modifiant le RG_{panneaux} , sur 2 ans.



6.5 : Graphique de la réponse à une réduction de rayonnement de la réserve en eau du sol sur le site de Braize et Marmanhac en contrôle sur 4 ans.



6.6 : Graphique de la réponse à une réduction de rayonnement de la réserve en eau du sol sur le site d'Eglisottes sur 2 ans.