

UniLaSalle **Beauvais**

19 rue Pierre Waguet
BP 30131
60026 BEAUVAIS Cedex – France

Iteipmai

Domaine de La Vesc
26740 Montboucher sur Jabron
France

Les plantes médicinales et aromatiques en agroforesterie méditerranéenne

Évaluation des performances agronomiques de *Melissa officinalis* L. et de *Aloysia citrodora* Paláu en alley cropping avec des oliviers



Ombeline DECUY

Mémoire de fin d'étude

Année
2022

Promotion 161 – 5^{ème} année
Agroécologie, Sols, Eaux et Territoires

Référent entreprise : Benjamin LEMAIRE
Référent UniLaSalle : David GRANDGIRARD

Résumé

La production de PPAM dans le sud-est de la France pourrait être impactée par le changement climatique. Pour faire face à l'augmentation des températures et à la diminution des précipitations l'agroforesterie semble pouvoir être une solution durable. En modifiant le microclimat de la parcelle, les arbres pourraient contribuer à réduire le stress hydrique des cultures. Cependant, l'ombrage des arbres peut aussi limiter la production de biomasse et la production de métabolites secondaires. Aucune étude n'a été réalisée sur les performances des PPAM en agroforesterie méditerranéenne. Pour répondre au manque de connaissances dans ce domaine, deux PPAM *Melissa officinalis* L. et *Aloysia citrodora* Paláu en alley cropping avec des oliviers ont été étudiées. La croissance, le développement mais aussi le rendement en masse fraîche et en métabolite secondaire des PPAM ont été mesurés en fonction de leur position dans la parcelle. Des capteurs pour mesurer la luminosité, la température, l'humidité relative de l'air et l'humidité dans le sol ont été placés à différents endroits de la parcelle agroforestière et dans une parcelle en monoculture. Les données microclimatiques ont été analysées par période de 15 jours. Dans ce système, les arbres n'ont pas eu beaucoup d'impact sur le microclimat de la parcelle. Le rayonnement disponible dans la parcelle agroforestière a été réduit de 5,4 à 30,9% mais cela n'a pas permis d'avoir un grand impact sur les températures. L'humidité relative est peu impactée : une différence de 2% n'est observée qu'en juillet. L'humidité du sol non plus n'est globalement pas affectée mais la parcelle a été irriguée. Ces résultats sont toutes fois à prendre avec du recul car il y a un manque de données dû à des problèmes électroniques. Les rendements en masse fraîche et en huile essentielle de mélisse n'ont pas été impactés par la position de la plante dans la parcelle agroforestière bien que la production de biomasse ait été favorisée par l'ombre. Le dégel moins rapide des plants de verveine à l'ombre des arbres le matin a entraîné une grande mortalité des plantes (jusqu'à 50%). Tout de même, il peut sembler que les plantes les plus à l'ombre aient été avantagées par cette dernière lors de la croissance dans la production de biomasse. La composition des extraits est légèrement différente : les plantes les plus proches des arbres produisent plus de sabinène et de terpineol que les autres mais moins de nérol.

Mots clefs : Agroforesterie, PPAM, climat méditerranéen

Abstract

The production of MAPs in southeastern France could be impacted by climate change. To face the increasing temperatures and decreasing rainfall, agroforestry can be used as a sustainable solution. By modifying the microclimate of the field, trees can contribute to the water stress reduction of the crops. However, the shading of the trees may also limit biomass production and secondary metabolites production. No studies have been conducted on the performance of PPAM in Mediterranean agroforestry. To address the lack of knowledge in this area, two MAPs: *Melissa officinalis* L. and *Aloysia citrodora* Paláu were studied in an alley cropping system with olive trees. The growth, development, and yield in fresh mass and secondary metabolite of the MAPs were measured according to their position on the field. Sensors to measure light, temperature, relative air humidity, and soil moisture have been placed at different locations in the agroforestry plot and in a monoculture plot. The microclimatic data were analyzed in 15-day periods. In this system, the trees did not present much impact on the microclimate of the plot. The available radiation in the agroforestry plot was reduced from 5.4 to 30.9% but this did not present a great impact on temperatures. Relative humidity was less impacted: a difference of 2% was observed in the month of July. Soil moisture was not affected either, but the field was irrigated. These results might be taken with caution, as the obtention of the data was not accurately caused by electronic problems. The yields of fresh mass and essential oil of lemon balm were not affected by the position of the plant in the agroforestry plot, although biomass production was favored by the shade. The slower thawing of verbena plants in the tree shade in the morning resulted in high plant mortality (up to 50%). Nevertheless, it seems that the plants in the tree shade had an advantage in biomass production during growth. The composition of the extracts was slightly different, with plants closer to the trees producing more sabinene and terpineol than others, but less nerol.

Keywords: Agroforestry, MAPs, Mediterranean climate

Remerciements

A Monsieur Benjamin Lemaire, mon maitre de stage à l'iteipmai qui m'a accompagnée tout au long de mes travaux avec un soutien sans faille et avec qui je partageais le bureau avec professionnalisme et bonne humeur ;

A Madame Camille Beral, ma maitre de stage chez AGROOF qui m'a guidée afin d'accomplir mes tâches avec rigueur et méthode ;

A Monsieur David Grandgirard, mon tuteur de stage à Unilasalle, pour le temps qu'il a consacré à répondre à mes questions et me guider vers la professionnalisation ;

A Madame Magalie Pellissier de l'iteipmai et Monsieur Ambroise Martin Chave d'AGROOF pour qui les statistiques n'ont pas de secret et qui m'ont transmis une part de leur savoir ;

A Monsieur Stéphane Herbette de l'UMR PIAF qui m'a apportée beaucoup en partageant ses connaissances sur le stress hydrique et le monde de la recherche ;

A Madame Annabelle Bergoënd de l'iteipmai pour sa gentillesse et son aide précieuse dans le cadre de mes recherches bibliographiques ;

A Mesdames Caroline Leflamanc, Marion Ah-vane, Magalie Pellissier et Louise Peyrigue de l'iteipmai pour leur aide lors des récoltes et leur bonne humeur ;

A Monsieur Pierre Sauvat, producteur de PPAM pour ses explications sur son système agroforestier

Enfin, aux Serges pour nous avoir apporté de bons moments de rires.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Résumé | 2 |
| Remerciements | 3 |
| Table des matières | 4 |
| Table des illustrations | 6 |
| Liste des tableaux | 7 |
| Liste des abréviations, symboles et unités | 8 |
| Glossaire | 9 |
| Introduction | 10 |
| 1. État de l'art | 12 |
| 1.1. L'impact des arbres dans une parcelle | 12 |
| 1.1.1. L'impact des arbres sur la luminosité | 12 |
| 1.1.2. L'impact des arbres sur les flux d'air | 13 |
| 1.1.3. L'impact des arbres sur la distribution des précipitations | 14 |
| 1.1.4. L'impact des arbres sur la température | 15 |
| 1.1.5. L'impact des arbres sur l'humidité | 16 |
| 1.2. L'impact des arbres sur les cultures | 17 |
| 1.2.1. La compétition entre les arbres et les cultures | 17 |
| 1.2.2. La complémentarité entre les arbres et les cultures | 19 |
| 1.2.3. La facilitation | 20 |
| 1.2.4. Les effets allélopathiques | 22 |
| 1.3. Les performances agronomiques des PPAM en agroforesterie | 22 |
| 1.3.1. La mélisse officinale (<i>Melissa officinalis</i> L.) | 23 |
| 1.3.2. La verveine odorante (<i>Aloysia citrodora</i> Palau) | 24 |
| 1.4. Bilan | 25 |
| 2. Matériel et méthodes | 27 |
| 2.1. Présentation de la zone d'étude | 27 |
| 2.2. Pratiques culturales | 27 |
| 2.3. Collecte des données | 27 |
| 2.3.1. Les données microclimatiques | 27 |
| 2.3.2. Les données sur les performances agronomiques des PPAM | 28 |
| 2.5. Analyses des données | 29 |
| 3. Résultats | 30 |
| 3.1. Les conditions microclimatiques | 30 |

| | |
|--|----|
| 3.1.1 La luminosité..... | 30 |
| 3.1.2. La température..... | 31 |
| 3.1.3 L'humidité | 33 |
| 3.2. Les performances agronomiques des PPAM..... | 34 |
| 3.2.1 Résultats pour la mélisse officinale (<i>Melissa officinalis</i> L.)..... | 34 |
| 3.2.2. Résultats pour la verveine odorante (<i>Aloysia citrodora</i> Palau) | 36 |
| 4. Discussion..... | 39 |
| 4.1. Les limites de l'échantillonnage | 39 |
| 4.2. Les limites de la méthode..... | 40 |
| 4.3. Les limites de l'approche | 40 |
| 4.4 Discussion et interprétation des résultats | 40 |
| 4.4.1. Discussion et interprétation des données microclimatiques..... | 40 |
| 4.4.2. Discussion et interprétation des résultats obtenus sur la performance agronomique des PPAM | 43 |
| Conclusion..... | 46 |
| Liste des références bibliographiques | 47 |
| Annexes | 56 |

Table des illustrations

| | |
|---|----|
| Figure 1: Exemple d'un SAF intraparcellaire combinant noyer et blé (MOSQUERA-LOSADA et al., 2012). | 12 |
| Figure 2: Distribution spatiale de la lumière disponible pour les cultures dans un SAF en alley cropping (adapté de MANTINO et al., 2021) | 13 |
| Figure 3 : Impact d'une haie d'arbres sur la circulation du vent (adapté de CLEUGH, 1998) | 13 |
| Figure 4 : Influence des arbres sur la distribution des précipitations conduites par les pluies (adapté de DAVID et al., 2006) | 14 |
| Figure 5 : Image infrarouge de la température à la surface des végétaux dans des SAF en alley cropping (a) ou avec des arbres isolés (a'). Les croix noires (à l'ombre) et rouges (au soleil) représentent les points de contrôle (KARVATTE et al., 2020) | 15 |
| Figure 6 : Image infrarouge de l'humidité à la surface des végétaux dans des SAF en alley cropping (b) ou avec des arbres isolés (b'). Les croix noires (à l'ombre) et rouges (au soleil) représentent les points de contrôle (KARVATTE et al., 2020) | 16 |
| Figure 7: Réponses générales de différentes cultures à l'ombrage (adapté de MUSCHLER, 2016) | 18 |
| Figure 8: Réponses générales de différentes cultures à la compétition (adapté de MUSCHLER, 2016) | 19 |
| Figure 9 : Schéma des principaux impacts des arbres dans un SA avec des PPAM sous climat méditerranéen | 26 |
| Figure 10 : Site d'étude et sa localisation (Google Maps, 2022) | 27 |
| Figure 11 : Schéma du dispositif d'étude sur les parcelles de mélisse (à droite) et de verveine (à gauche). (PAR : capteur mesurant la luminosité, T°: capteur mesurant la température, HR : capteur mesurant l'humidité relative dans l'air, Tensio : sondes tentiométriques mesurant la tension de l'eau dans le sol.) | 28 |
| Figure 12: Luminosité disponible au cours d'une journée ensoleillée et d'une journée nuageuse dans une parcelle agroforestière et une parcelle en monoculture | 30 |
| Figure 13 : Températures moyennes dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture | 31 |
| Figure 14 : Tension (Kpa) dans le sol à 30 et 60 cm de profondeur dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière au cours du mois de juillet | 34 |
| Figure 15 : Cinétique de croissance de la mélisse en fonction des rangs dans la parcelle agroforestière | 35 |
| Figure 16: Rendement (g.m ⁻¹) de la mélisse officinale en fonction du rang | 35 |
| Figure 17 : Nombre de plants de verveine odorante vivants par rang dans la parcelle agroforestière | 36 |
| Figure 18 : Cinétique de croissance de la verveine odorante en fonction de la position des plantes dans la parcelle agroforestière | 37 |
| Figure 19 : Rendement en feuilles (g.plant ⁻¹) de la verveine odorante en fonction des rangs | 38 |
| Figure 20 : Surface verticale de la mélisse officinale et de la verveine odorante avant la récolte en fonction des rangs | 44 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1: Principales composants phytochimiques présents dans l'HE de <i>Melissa officinalis</i> L. (adapté de MORADKHANI et al., 2010) | 24 |
| Tableau 2 : Principaux composants phytochimiques présents dans l'HE de <i>Aloysia citrodora</i> Palau (adapté de HEMATIAN SOURKI et al., 2021) | 25 |
| Tableau 3 : Lumière transmise disponible (%) en fonction des modalités | 30 |
| Tableau 4 : Température moyenne sur 24h dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture..... | 31 |
| Tableau 5: Température moyenne pendant la journée dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture | 32 |
| Tableau 6 : Température moyenne pendant la nuit dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture | 32 |
| Tableau 7: Amplitude des températures (sur 24h) dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture | 32 |
| Tableau 8: Humidité relative dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture | 33 |
| Tableau 9 : Tension (Kpa) dans le sol à 30 cm de profondeur dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière..... | 33 |
| Tableau 10: Tension (Kpa) dans le sol à 60 cm de profondeur dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière..... | 33 |
| Tableau 11 : Hauteur, largeur et surface verticale des plants de mélisse par rang à 3 dates différentes (au démarrage le 11/04/2022, avant la récolte le 07/06/2022 et entre les deux le 12/05/2022 | 34 |
| Tableau 12 : Pourcentage de feuilles sur les plants de mélisse officinale en fonction des rangs..... | 35 |
| Tableau 13: Teneur en HE dans les plants de mélisse officinale en fonction du rang..... | 36 |
| Tableau 14: Résultats des modèles linéaires et des modèles linéaires généralisés entre les variables microclimatiques et la hauteur, la largeur et la surface verticale des plantes | 37 |
| Tableau 15: Hauteur, largeur et surface verticale des plants de mélisse par rang à 3 dates différentes (au démarrage le 11/04/2022, avant la récolte le 07/06/2022 et entre les deux le 12/05/2022 | 37 |
| Tableau 16 : Rendement (g.plant ⁻¹) et pourcentage de feuilles sur les plants chez la verveine odorante en fonction des rangs | 38 |
| Tableau 17 : Puissance en composés volatils de l'extrait de verveine odorante en fonction des rangs | 38 |
| Tableau 18 : Différences significatives entre les modalités dans la composition (%) de l'HE de verveine odorante..... | 38 |

Liste des abréviations, symboles et unités

AF : agroforesterie

cm : centimètre

CFPPA : Centre de Formation Professionnelle et de Promotion Agricole

COV : composés organiques volatils

CRIEPPAM : Centre Régionalisé Interprofessionnel d'Expérimentation en Plantes à Parfum Aromatiques et Médicinales

EPL : Entreprise Publique Locale

g : gramme

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

ha : hectare

HE : Huile Essentielle

iteipmai : institut technique interprofessionnel des plantes à parfum, médicinales, aromatiques et industrielles

K : potassium

kPa : kilo Pascal

m : mètre

mm : millimètre

N : azote

nm : nanomètre

P : phosphore

PA : Plantes Aromatiques

PM : Plantes Médicinales

PP : Plantes à Parfum

PPAM : Plantes à Parfum, Aromatiques et Médicinales

RCP : Representative Concentration Pathway

SAF : Systèmes AgroForestiers

UMR EMMAH : Unité Mixte de Recherche en Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes

UMR IMBE : Unité Mixte de Recherche Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale

UMR PIAF : Unité Mixte de Recherche en Physique et Physiologie Intégrative de l'Arbre en environnement Fluctuant

Glossaire

Déficit hygrométrique (kPa) : Différence entre la pression de la vapeur dans l'air à saturation (100% d'humidité relative) et la pression de l'air à une température donnée (AMITRANO *et al.*, 2019).

Juglon ou juglone : composé phénolique coloré allélopathique (5-hydroxy-1,4-naphthoquinone) (BATISH *et al.*, 2007).

Métabolites secondaires : substances présentes dans un organisme qui ne participent pas directement aux processus de base de la cellule vivante. Elles sont généralement présentes en faible quantité dans les tissus végétaux. Elles jouent un rôle clef dans la résistance des plantes aux contraintes biotiques (prédateurs, pathogènes etc.) et abiotiques (température, UV etc.). Ces métabolites sont recherchés en pharmacie pour leurs effets sur la santé humaine (KONÉ, 2019).

Niche écologique : Il existe deux types de niches écologiques

- **Niche fondamentale** : volume, dans l'espace des variables environnementales, dans lequel les individus d'une espèce peuvent survivre indéfiniment
- **Niche réalisée** : volume, restreint à cause des interactions avec les autres espèces compétitrices présentes, où les individus d'une espèce survivent effectivement (POCHEVILLE, 2010)

Introduction

La filière des plantes à parfum, aromatiques et médicinales (PPAM) regroupe plus de 300 espèces végétales, cultivées ou sauvages, et plus de 1 000 produits issus de ces plantes (FranceAgriMer, 2021). Les PPAM peuvent être commercialisées fraîches, sèches ou surgelées aux industries agroalimentaires, mais la quasi-totalité (90 %) est transformée sous forme d'extraits et d'huiles essentielles (HE) pour la parfumerie, la cosmétique, la phytothérapie, l'homéopathie, l'herboristerie, l'aromathérapie etc. (DRAAF Occitanie, 2019 a). La production de PPAM génère un chiffre d'affaires de 150 millions d'euros et celui de l'ensemble de la filière est estimé à cinq milliards d'euros (FranceAgriMer, 2022).

Même si elle représente moins d'un pourcent des surfaces agricoles françaises, la filière se développe : les surfaces cultivées en PPAM ne cessent d'augmenter depuis les années 2000. Cette croissance atteint plus de 32 % entre 2017 et 2020. Sur cette même période, le nombre d'exploitations cultivant des PPAM augmente aussi de plus de 25 %. En 2021, les PPAM occupaient 67 513 hectares (ha) sur 6 527 exploitations. La place du bio est assez importante et croissante dans la filière. 11 721 ha (18 % des surfaces de PPAM) étaient certifiés bio en 2021 et une augmentation de plus de 482 % des surfaces est enregistrée depuis 2007 (+18 % entre 2019 et 2020).

La filière PPAM est répartie en trois secteurs : les plantes à parfum (PP), les plantes aromatiques (PA) et les plantes médicinales (PM). Le secteur des PP est le plus important. Largement dominé par la lavande et le lavandin, il représentait 56 % des surfaces cultivées en PPAM en 2021 (37 897 ha). Celui des PA est celui qui connaît la plus forte croissance. La majorité des 9 664 ha (14 % des surfaces cultivées en PPAM) occupée par ce secteur en 2021 est allouée à la coriandre et au persil. Cependant, le thym vulgaire et les herbes de Provence sont les plantes les plus importantes en termes de valeur de commercialisation. Le secteur des PM est très diversifié : il compte plus de 150 d'espèces dont le pavot œillette, la mélisse et la camomille. Ils se retrouvent sur 20 712 ha (les 30 % restants des surfaces cultivées en PPAM) en 2021 (FranceAgriMer, 2021).

La filière PPAM a un fort ancrage territorial dans le sud est de la France (DRAAF Occitanie, 2019 b). Notamment avec les départements de la Drôme, du Vaucluse et des Alpes-de-Haute-Provence, la région est le principal bassin de production : 51,2 % des surfaces cultivées en PPAM s'y trouvent. Cela est principalement dû à la forte présence de lavandes et lavandins. La Provence est aussi une grande productrice de plantes aromatiques comme le basilic, le thym, la sarriette, le romarin, la mélisse, l'origan, le fenouil, la marjolaine etc. (FranceAgriMer, 2021).

C'est aussi dans cette partie de la France que se situent bon nombre d'acteurs de la filière : de nombreux producteurs, plus de 3 000 exploitants en prenant en compte les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur, Auvergne-Rhône-Alpes et l'Occitanie (Agreste 2021, Région Auvergne Rhône-Alpes, 2018 et DRAAF Occitanie, 2019 b) mais aussi des structures de recherche et de conseil comme l'institut technique interprofessionnel des plantes à parfum, médicinales et aromatiques (iteipmai), le CRIEPPAM, la chambre d'agriculture de la Drôme, etc. (PPAM de France, 2017)

La production de PPAM dans le sud-est de la France pourrait être assez impactée par le changement climatique. En effet la région, majoritairement sous climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides, est menacée par une augmentation des températures, notamment en été, avec des épisodes caniculaires plus fréquents et une diminution des précipitations annuelles (GIORGI, LIONELLO, 2008). De plus, les épisodes de pluies intenses sont prévus plus fréquemment avec une intensité plus élevée (TRAMBLAY *et al.*, 2021). Dans un futur proche (avant 2050), une augmentation des températures en été et en automne de 1 à 1,5 °C, pour le scénario de trajectoire de forçage radiatif (RCP) du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) le plus optimiste, ou de 1,5 à 2 °C pour les autres est attendue (LAMACQUE, 2020). Dans un futur plus lointain (2071 à 2100), une hausse plus importante, de 2 à 4 °C est prévue (HERTIG, JACOBET, 2008). Il est plus difficile de prévoir l'évolution des précipitations pour cette même période. En effet, si les scénarios RCP optimistes et pessimistes prévoient respectivement jusqu'à

40 mm et de 40 à 80 mm de pluie en plus, le scénario intermédiaire prévoit une diminution de 40 mm pour l'été. En automne, deux scénarios sur trois prévoient une baisse de précipitations, pouvant atteindre -80 mm, le scénario intermédiaire, quant à lui prévoit jusqu'à + 40 mm de pluie (LAMACQUE, 2020). Les prévisions climatiques jusqu'à 2100 sont présentes en annexe A.

Pour faire face à tous ces aléas climatiques et réussir à maintenir les productions de PPAM, il est important de rechercher des solutions sur le long terme qui restent profitables pour les agriculteurs. L'une d'entre elles serait de mettre en place des agrosystèmes résilients pouvant maintenir une certaine capacité de production malgré les canicules, les sécheresses et les épisodes de pluie très intenses (BLANCHET, 2021).

Les systèmes agroforestiers (SAF) pourraient faire partie de ces agrosystèmes. L'agroforesterie (AF) est une pratique agricole qui consiste à associer des arbres ou arbustes avec une production agricole végétale ou animale sur une même parcelle (MOSQUERA-LOSADA *et al.*, 2009). Dans le monde de nombreux types de SAF existent. Bien qu'ils puissent être classés de différentes manières, les deux types de SAF les plus importants sont : les systèmes agri-sylviculturaux qui combinent arbres et production végétale et les systèmes sylvopastoraux qui allient production animale et foresterie (DEN HERDER *et al.*, 2017, NAIR, 1985). Une classification plus détaillée est présentée en annexe B.

En Europe, environ 20 millions d'hectares sont cultivés en AF (MOSQUERA-LOSADA *et al.*, 2018 b). Ils se situent essentiellement dans des régions à faible potentiel agronomique, où le climat est difficile (ex. climat méditerranéen), où le sol est pauvre et/ou en zone de relief important (MOSQUERA-LOSADA *et al.*, 2015). En région méditerranéenne, les systèmes sylvopastoraux sont majoritaires (DEN HERDER *et al.*, 2017) mais il y a aussi des systèmes agri-sylviculturaux divers mélangeant oliviers, chênes et de nombreuses espèces de rosacés avec des céréales, des légumineuses, des vignes ou des légumes (EICHHORN *et al.*, 2006).

Les systèmes agroforestiers sont connus pour être des systèmes durables apportant de nombreux services écosystémiques comme la production de biomasse, la stabilisation et la fertilisation des sols, la limitation de l'érosion, la séquestration du carbone, l'augmentation de la biodiversité etc. Les racines des arbres permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement dans le sol, ce qui pourrait être bénéfique lors d'épisodes pluvieux intenses (JOSE, 2009 ; FAGERHOLM *et al.*, 2016). Aussi, les arbres font de l'ombre aux cultures et créent un microclimat dans les parcelles. Cela peut avoir un effet positif sur la production en cas d'événements climatiques extrêmes comme les canicules et les sécheresses (INURRETA-AGUIRRE *et al.*, 2018). Cependant, les arbres entrent en compétition avec les cultures pour les ressources (eau et nutriments) et leur ombre engendre une perte de luminosité ce qui peut avoir un impact négatif sur les cultures (TEMANI *et al.*, 2021 INURRETA-AGUIRRE *et al.*, 2018 et MONTEITH *et al.*, 1991).

Les interactions entre les arbres et les cultures dépendent de la nature des productions (espèces ligneuses et espèces herbacées), de leur stade de développement mais aussi des conditions pédoclimatiques (MOSQUERA-LOSADA *et al.*, 2009). Très peu d'études ont été réalisées sur les PPAM en AF dans le sud de la France. Il est donc compliqué de prédire si cultiver les PPAM en SAF est une solution envisageable pour faire face aux défis de l'agriculture dont le changement climatique.

Le projet PPAM PPAM, a justement pour objectif d'acquérir des connaissances scientifiques et techniques sur les SAF avec des PPAM, afin d'en valider la pertinence. Ce projet comporte six actions : 1- la coordination, 2- l'étude des performances agronomiques des PPAM, 3- l'effet des systèmes sur la biodiversité fonctionnelle, 4- l'étude des performances technico-économiques des systèmes et production de référentiels, 5- le transfert des connaissances issues du projet et 6- la communication des résultats. Il est porté par des agriculteurs, des unités de recherche (l'UMR PIAF, l'UMR EMMAH et l'UMR IMBE), des centres de formation (le CFPPA de Nyons et l'EPL de Romans sur Isère), le bureau d'étude AGROOF, l'iteipmai mais aussi des entreprises : la distillerie de Bel air et Arcadie (AGROOF SCOP, 2021). L'une des problématiques principales auxquelles PPAM PPAM tente de répondre est : Quels sont les impacts des arbres sur les performances agronomiques des PPAM dans le sud-est de la France ? Ce mémoire a pour but d'y apporter des éléments de réponse grâce à l'étude des performances de la mélisse et de la verveine en AF intraparcellaire avec des oliviers.

1. État de l'art

1.1. L'impact des arbres dans une parcelle

L'introduction d'arbres dans les parcelles crée un microclimat dans celles-ci. Les arbres ont un impact sur la température, l'humidité, les radiations reçues par la strate herbacée et la vitesse du vent. Ils interceptent aussi une petite partie des pluies avec leur feuillage (MONTEITH *et al.*, 1991). **Cet impact est très variable en fonction des différents SAF et du temps.** Il dépend de nombreux facteurs comme la densité de plantation, la disposition des arbres dans la parcelle (arbres isolés, en rangée etc.) et leur orientation, mais aussi leur taille, leur phénologie ainsi que de la densité et la forme du feuillage (ARTRU, 2017 ; KANZLER *et al.*, 2019). Généralement l'intensité de l'impact sur le microclimat est proportionnelle à la distance aux arbres : plus cette distance est faible plus l'impact est important (KANZLER *et al.*, 2019).

L'AF intraparcellaire ("alley cropping" ou "hedgerow intercropping" en anglais) est un SAF où les arbres sont plantés en rang dans les parcelles agricoles comme sur la figure 1. Les cultures poussent dans les allées entre les rangées d'arbres (MOSQUERA-LOSADA *et al.*, 2009). L'AF intraparcellaire apporte de nombreux services écosystémiques (QUINKENSTEIN *et al.*, 2009) tout en pouvant permettre une production économiquement viable. Ce système agri-sylvicultural moderne est compatible avec les technologies de production contemporaines et permet le passage des machines (TSONKOVA *et al.*, 2018). Il est assez répandu dans le monde (WOLZ, DELUCIA, 2018) et devient de plus en plus populaire notamment en Europe centrale. De plus, c'est un mode de culture déjà utilisé pour la culture de certaines PPAM (PALADA *et al.*, 2004 ; SINGH *et al.*, 1998 ; RAO *et al.*, 2004). Il semble donc pertinent d'apporter des précisions sur l'impact qu'ont les arbres dans ce SAF particulier. Dans ce dernier, le microclimat peut être impacté par les arbres sur une distance de généralement 10 fois la hauteur de l'arbre (KANZLER *et al.*, 2019).



Figure 1: Exemple d'un SAF intraparcellaire combinant noyer et blé (MOSQUERA-LOSADA *et al.*, 2012)

1.1.1. L'impact des arbres sur la luminosité

Dans une parcelle agroforestière, la quantité de radiations disponibles pour les cultures est moins importante que dans une parcelle sans arbre. Ces radiations sont composées d'au moins quatre éléments : le rayonnement du faisceau direct, le rayonnement du ciel qui passe au travers des interstices de la canopée, le rayonnement diffus provenant de la réflexion et de la transmission du faisceau direct par les feuilles (et autres éléments de végétation) et enfin le rayonnement réfléchi par la végétation (REIFSNYDER, 1987). L'environnement lumineux en dessous des arbres est donc assez hétérogène. Si le rayonnement direct possède toutes les longueurs d'onde, le rayonnement diffus quant à lui se retrouve appauvri en longueurs d'onde de 400 à 700 nm car elles sont préférentiellement absorbées par les arbres. Il y a donc moins de lumière bleue et rouge que de lumière verte et rouge lointain sous les arbres. Par temps clair, l'ombre portée par les arbres est assez pauvre en rayonnement photosynthétiquement actif car il aura été absorbé par les arbres. En revanche, si le ciel est couvert, l'ombre sera plus riche en rayonnement photosynthétiquement actif. L'essence de l'arbre joue aussi un rôle dans la qualité des rayonnements transmis aux cultures : les rosacées ont une ombre plus riche en rayonnement photosynthétiquement actif que les noyers ou les oliviers par exemple. Cependant, il reste très difficile de pouvoir caractériser, en termes de composition, la lumière présente dans les parcelles. La quantité de radiations disponible pour les cultures est proportionnelle à la projection de la couronne de l'arbre sur le sol. Elle varie notamment en fonction de la distance et de la position par rapport aux arbres, comme le présentent les annexes C et D, et en fonction du temps. En effet, la position

du soleil change au fil des minutes, des heures, des jours, des mois, et de ce fait, la position et la forme de l'ombre des arbres aussi. De plus, certains arbres perdent leurs feuilles pendant une partie de l'année ce qui a un impact sur la lumière transmise aux plantes. La taille et la forme des arbres, ainsi que la densité du feuillage, sont aussi des composantes importantes influant sur la disponibilité des radiations pour les cultures (ARTRU, 2017, BALDY *et al.*, 1993). Plus les arbres sont grands et larges avec des troncs et des ramifications épais moins la lumière sera disponible pour les plantes (PURNOMO *et al.*, 2010 ; INURRETA-AGUIRRE *et al.*, 2018).

En alley cropping, les rangées d'arbres font de l'ombre aux cultures qui reçoivent donc moins de radiations. Par exemple, en région méditerranéenne, dans un système avec des rangées de peupliers de 30 m de haut espacées de 13 m les unes des autres, INURRETA-AGUIRRE *et al.* (2018) ont montré une diminution de 50% des radiations disponibles pour les plantes au sein des allées par rapport à une parcelle sans arbre. Cependant, la disponibilité des radiations pour les cultures est spatialement et temporellement hétérogène en raison du positionnement des arbres. Comme le montrent l'annexe D et la figure 2, une plante située au milieu des allées recevra plus de lumière qu'une plante très proche d'un arbre (MANTINO *et al.*, 2021 ; ZHAO *et al.*, 2003). De même, l'ombrage sur les plantes se trouvant au sud des arbres est très faible alors que les plantes situées au nord des arbres reçoivent à peine 25% des radiations (INURRETA-AGUIRRE *et al.*, 2022). La distance entre les rangées d'arbres joue un rôle important pour la disponibilité des radiations. Plus elles sont éloignées les unes des autres, plus il y aura de lumière dans l'allée de culture (MANTINO *et al.*, 2021 ; ZHAO *et al.*, 2003 ; INURRETA-AGUIRRE *et al.*, 2018). Il est aussi important de prévoir l'orientation des rangées d'arbres pour que l'impact sur les cultures soit le moins négatif possible. Ainsi, pour que les cultures reçoivent le plus de radiation possible, les lignes d'arbres doivent être orientées nord-sud aux latitudes élevées et moyennes, et est ouest pour les latitudes basses (DUPRAZ *et al.*, 2018).

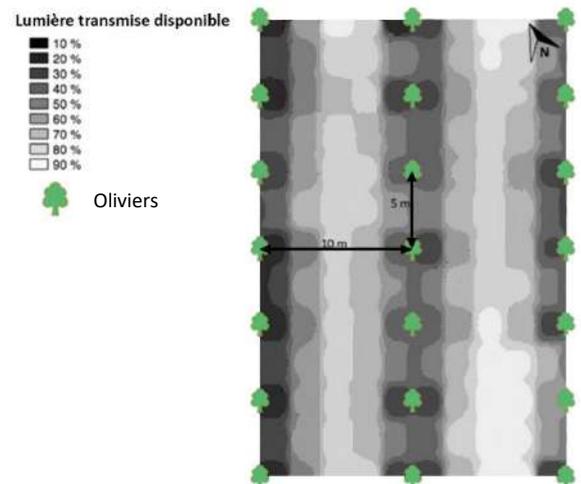


Figure 2: Distribution spatiale de la lumière disponible pour les cultures dans un SAF en alley cropping (adapté de MANTINO *et al.*, 2021)

1.1.2. L'impact des arbres sur les flux d'air

La présence des arbres peut permettre de protéger les animaux, les cultures et le sol du vent. Dans certains cas, les arbres ne sont plantés que pour cet effet. Ces SAF s'appellent alors brise-vent ("windbreaks" ou "shelterbelt" en anglais). Ils sont présents sur tous les continents. Les arbres ou arbustes de forme et de taille adaptées y sont souvent plantés en rang perpendiculairement à la direction du vent afin d'agir comme une barrière physique contre celui-ci, pour en réduire la vitesse (NERLICH *et al.*, 2013 ; BRANDLE *et al.*, 2004).

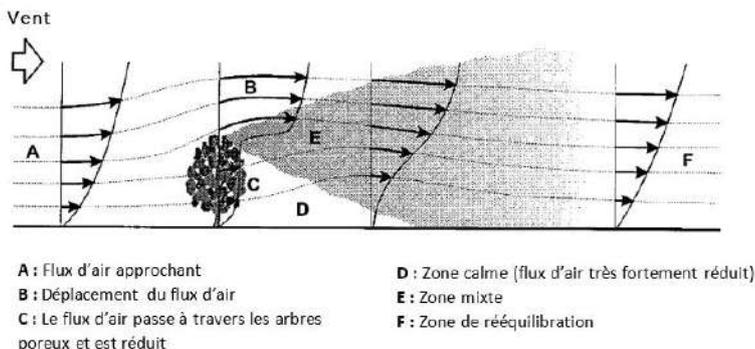


Figure 3 : Impact d'une haie d'arbres sur la circulation du vent (adapté de CLEUGH, 1998)

La figure 3 présente l'impact d'une rangée d'arbres sur la circulation du vent. L'intensité de cet effet est plus marquée à proximité des arbres : la vitesse du vent est fortement freinée à l'aplomb des arbres et augmente de nouveau en s'en éloignant, comme le montre l'annexe E. Le flux d'air est aussi impacté par la porosité de la haie : plus il y a d'interstices dans celle-ci, plus l'effet sur les courants d'air sera faible (WANG, TAKLE, 1997).

En AF intraparcellaire, la vitesse du vent peut être ralentie si la direction du vent est orthogonale aux lignes d'arbres, mais elle peut aussi être accélérée dans les allées si le vent est parallèle aux rangées d'arbres (BLANCHET, 2021). De manière générale, la vitesse du vent est tout de même réduite dans ces systèmes. Plus les arbres sont grands et denses, plus la vitesse du vent est freinée. Des arbres ou arbustes ne mesurant qu'un mètre de haut peuvent déjà avoir un impact : ils sont à même de diminuer la vitesse du vent de 20 à 30% dans les allées. Des arbres de 3,5 m sont suffisants pour provoquer un ralentissement du vent de 55 à 80% (QUINKENSTEIN *et al.*, 2009 ; BÖHM *et al.*, 2014). Les arbres peuvent aussi avoir un impact sur les flux d'air dans la parcelle lorsqu'il n'y a pas de vent. En effet, ils permettent de limiter les phénomènes de convections qui surviennent lorsque les conditions climatiques deviennent chaudes et sèches entre l'air chargé de l'évapotranspiration des plantes et l'air sec plus en altitude (BLANCHET, 2021).

1.1.3. L'impact des arbres sur la distribution des précipitations

Comme la lumière, les gouttes de pluie sont elles aussi interceptées par le feuillage des arbres. Lorsque les pluies sont inférieures à 5 mm, la canopée peut retenir toute la pluie tombant sur celle-ci, si elles sont supérieures à 5 mm alors la canopée pourra retenir entre 1 et 2 mm. Une petite partie de ces gouttes peut rester piégée dans le feuillage n'atteignant donc jamais le sol. Cependant, la majorité des pluies interceptées s'écoule le long de la tige ou du tronc conduisant donc l'eau aux pieds des arbres. Cette eau peut représenter jusqu'à 20% des pluies tombant sur la canopée (MONTEITH *et al.*, 1991 ; GÓMEZ *et al.*, 2002). Plus la densité d'arbres est grande, plus la quantité de pluie interceptée va être importante. Dans un système en AF intra-parcellaire avec *Leucaena leucocephala* (petit arbre tropical) 10% des pluies sont interceptées si la densité est de 400 arbres par hectare mais l'interception des pluies peut augmenter jusqu'à 40% pour une densité de 10 000 arbres par hectare (MONTEITH *et al.*, 1991). Si les pluies sont conduites par le vent, la distribution de celles-ci est elle aussi modifiée par les arbres, comme il est possible de le voir sur la figure 4, qu'ils soient isolés ou regroupés. En effet, la pluie aura tendance à s'accumuler du côté au vent de l'arbre. Au contraire du côté sous le vent de l'arbre il y aura une zone d'ombre pluviométrique où très peu de précipitations atteindront directement le sol. Cette zone s'étend généralement au delà de la couronne de l'arbre. Les zones les plus éloignées des arbres vont quant à elles ne pas être impactées (DAVID *et al.*, 2006).

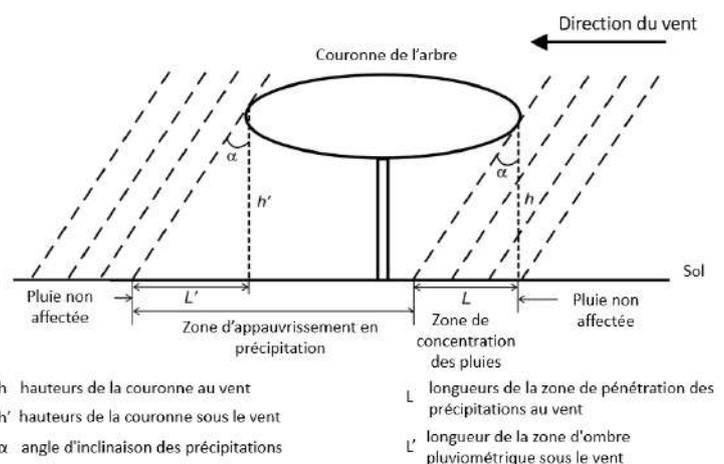


Figure 4 : Influence des arbres sur la distribution des précipitations conduites par les pluies (adapté de DAVID *et al.*, 2006)

Il peut aussi être important d'ajouter que lors d'épisodes de pluies intenses, l'énergie cinétique des gouttes de pluie est diminuée lors de l'interception par le feuillage avant de toucher le sol, ce qui contribue à limiter l'érosion (MONTEITH *et al.*, 1991).

Lorsqu'il neige, les SAF peuvent piéger la neige ou tout du moins réduire la distance de déplacement de la neige et la quantité de neige déplacée (cela peut contribuer à diminuer les pertes d'eau par sublimation). En agissant comme une barrière physique, les arbres bloquent la neige qui s'amoncelle à leurs pieds (du côté au vent). De plus, l'ombrage des arbres protège la neige des rayons du soleil qui fondra donc plus lentement (KORT *et al.*, 2012).

1.1.4. L'impact des arbres sur la température

Dans les parcelles agroforestières les arbres ont un effet sur les températures. Ils agissent comme des tampons : en journée, les arbres abaissent la température en dessous de leur canopée tandis qu'ils réchauffent l'air pendant la nuit. En journée, les arbres interceptent une partie des radiations directes du soleil ce qui réduit la charge de rayonnement thermique atteignant les cultures. Cet effet d'ombrage, couplé à l'évapotranspiration des végétaux permet de refroidir l'air environnant de 1,2 à 2 °C environ, pouvant même réduire la température jusqu'à 6°C lors les jours très chauds (INURRETA-AGUIRRE *et al.*, 2018 ; GOSME *et al.*, 2016 ; KANZLER *et al.*, 2019). Comme il est possible de voir sur l'image infrarouge de la figure 5, les températures sont plus faibles à la surface des plantes autour des arbres. Ces températures infrarouges sont corrélées avec la température de l'air (KARVATTE *et al.*, 2020). Cet effet tampon est cependant moins marqué lors de jours nuageux et en hiver, car les températures sont moins élevées et les arbres perdent généralement leurs feuilles en hiver (GOSME *et al.*, 2016). Il est aussi possible que cet effet soit inversé. Dans une jeune plantation de pins à feuille longue, les chercheurs KARKI et GOODMAN (2013) ont observé en journée une température plus chaude en AF qu'en monoculture. Cela serait dû au fait que les jeunes arbres ne produisent pas un ombrage important alors qu'ils contribuent quand même à réduire la vitesse du vent (KARKI, GOODMAN, 2013). Bien qu'ils aient aussi remarqué l'effet de refroidissement de l'air de l'AF pendant les journées d'été, ZONG *et al.* (2020) et LIU *et al.* (2019) ont cependant trouvé que les arbres permettaient de réchauffer légèrement l'air en hiver en protégeant leur espace proche des vents froids (ZONG *et al.*, 2020). Si la région est particulièrement venteuse, la température aux abords d'une haie brise-vent peut être plus grande. En effet, la réduction de la vitesse du vent peut engendrer une augmentation des températures. Par exemple, dans leur étude, CAMPI *et al.* (2009) ont montré qu'en restant en dessous de 41% de réduction de la vitesse

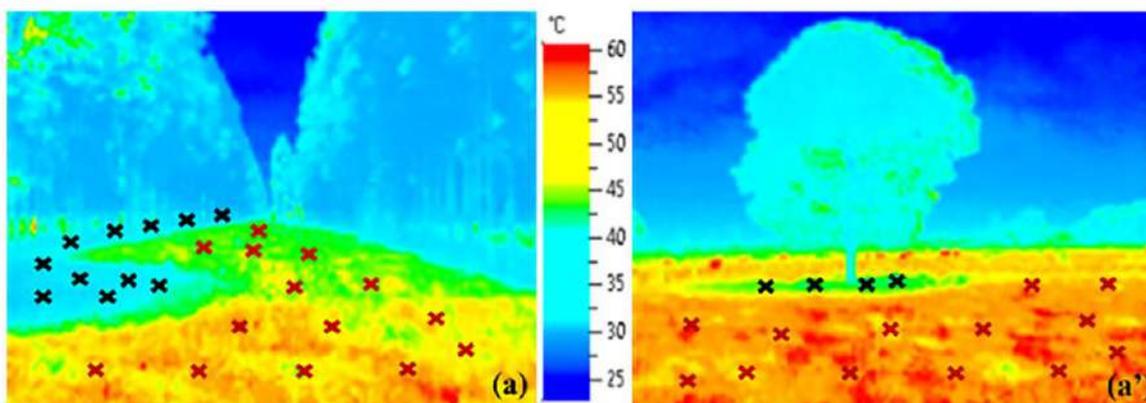


Figure 5 : Image infrarouge de la température à la surface des végétaux dans des SAF en alley cropping (a) ou avec des arbres isolés (a'). Les croix noires (à l'ombre) et rouges (au soleil) représentent les points de contrôle (KARVATTE *et al.*, 2020)

du vent, la température ne varie pas dans la parcelle, mais si elle dépasse ce seuil, la température augmente proche de la haie brise-vent (pour une distance inférieure à 5m) : pour une réduction de la vitesse du vent de 65%, la température augmente jusqu'à 9.4%. L'effet des arbres sur la température de l'air dépend donc des conditions climatiques dans lesquelles se trouve le SAF mais aussi des caractéristiques des arbres, de leur implantation et de leur conduite.

Les arbres ne permettent pas seulement d'abaisser la température de l'air, ils peuvent aussi avoir un effet sur la température du sol. Ils abaissent la température du sol pendant le jour, même à 30 cm de profondeur. Cette diminution de température peut atteindre 5°C. Plus la distance aux arbres est faible, plus cet effet est important. Pendant la nuit, cet effet est moins important et légèrement différent. La température à la surface du sol semble rester plus basse dans la parcelle agroforestière tandis que juste au pied des arbres la température du sol est plus élevée. Plus en profondeur, de 15 à 30cm, la température reste plus fraîche en AF, même au pied des arbres (SANCHEZ *et al.*, 2009).

Comme le montre la figure 5, l'AF intraparcellaire permet d'étendre la zone de diminution des températures car il y a un nombre plus important d'arbres (KARVATTE *et al.*, 2020). Selon une étude de INURRETA-AGUIRRE *et al.*, 2018, l'AF intraparcellaire permettrait d'abaisser la température jusqu'à 6°C dans les allées, par rapport à une parcelle en monoculture, lors de jours particulièrement chauds. Quant à la température du sol, KARKI et GOODMAN (2015) ont montré qu'à 5 et à 10 cm de profondeur, elle pouvait être diminuée respectivement de 1 à 10% et de 1 à 8% dans le sol d'un système sylvopastoral en allée par rapport à une pâture sans arbre.

1.1.5. L'impact des arbres sur l'humidité

Dans une parcelle agroforestière les arbres peuvent avoir un effet sur l'humidité relative. Ils permettent généralement de l'augmenter (MONTEITH *et al.*, 1991), notamment en conditions climatiques extrêmes (KUEMMEL, 2003). Comme le montre la figure 5, proche des arbres l'humidité est généralement plus importante que dans le reste de la parcelle. L'ombre des arbres et leur action coupe-vent contribuent à limiter le taux d'élimination de la vapeur d'eau (CAMPI *et al.*, 2009 ; KANZLER *et al.*, 2019 ; KARVATTE *et al.*, 2016). De plus, en transpirant, les arbres contribuent à humidifier l'air, mais cet effet peut être supprimé par le vent (BLANCHET, 2021). Dans leur étude en AF méditerranéenne, CAMPI *et al.* (2009) ont trouvé que l'humidité relative juste derrière une haie brise-vent était de 3% supérieure à celle mesurée à une douzaine de mètres de la haie.

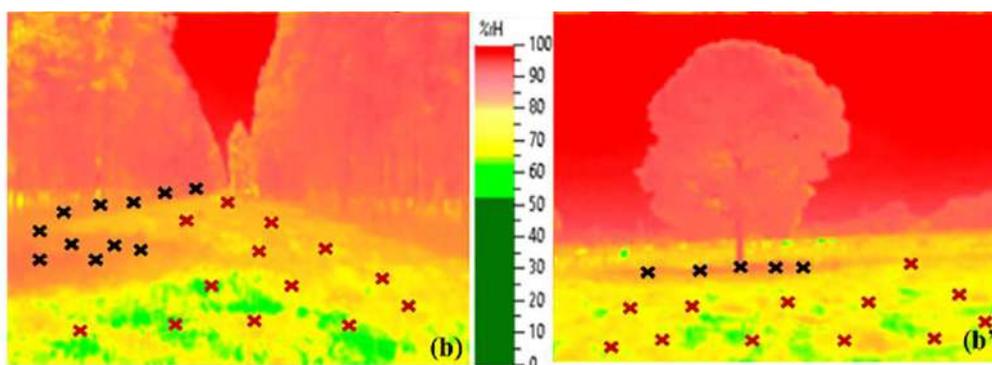


Figure 6 : Image infrarouge de l'humidité à la surface des végétaux dans des SAF en alley cropping (b) ou avec des arbres isolés (b'). Les croix noires (à l'ombre) et rouges (au soleil) représentent les points de contrôle (KARVATTE *et al.*, 2020)

Une autre partie des études parlent plutôt du déficit hygrométrique*. Ce dernier dépend grandement de l'humidité relative de l'air et de la température (KANZLER *et al.*, 2019). Plus la température est haute, plus la capacité de l'atmosphère à stocker l'humidité, sous forme de vapeur, augmente (BLANCHET, 2021). Comme décrit précédemment, les arbres permettent généralement d'abaisser les températures en journée. Par conséquent, le déficit hygrométrique est lui aussi réduit par rapport à une parcelle sans arbre (BLANCHET, 2021 ; KANZLER *et al.*, 2019 ; MANTOVANI *et al.*, 2016). Au contraire, pendant la nuit, le déficit hygrométrique peut être plus élevé dans une parcelle agroforestière (KANZLER *et al.*, 2019).

Les arbres affectent aussi l'humidité dans le sol. D'un côté, ils peuvent diminuer la teneur en eau du sol en la prélevant pour leur propre utilisation ou en interceptant une partie des pluies. De l'autre, ils peuvent l'augmenter en diminuant l'évapotranspiration du sol (grâce à l'effet d'ombrage et de coupe-vent) ou en transférant l'eau des profondeurs du sol vers la surface du sol, plus sèche, par l'intermédiaire des racines (ce phénomène s'appelle ascenseur/soulèvement hydraulique). Les arbres peuvent aussi gêner la croissance d'adventices plus gourmandes en eau qui pourrait faire concurrence à la culture (RADERSMA, ONG, 2004 ; LISTE, WHITE, 2008 ; FERNANDEZ *et al.*, 2008). De plus, ils diminuent le ruissellement et améliorent l'infiltration de l'eau dans le sol en augmentant la macroporosité dans le sol par la pénétration des racines et en favorisant l'activité de la macrofaune qui creuse des galeries comme les vers de terre (JOFFRE ET

RAMBAL, 1988). Il reste difficile de caractériser les flux d'eau dans le sol d'une parcelle agroforestière et donc de savoir précisément si les arbres vont diminuer ou augmenter l'humidité dans les sols. Certaines études montrent que l'humidité du sol peut être plus élevée dans le sol de parcelles agroforestières. Cet effet est nettement plus marqué proche des arbres. (QUINKENSTEIN *et al.*, 2009 ; MANTOVANI *et al.*, 2016 ; GUILLOT *et al.*, 2018 ; GUILLOT *et al.*, 2021). Dans leur étude sur des systèmes sylvopastoraux espagnols, JOFFRE & RAMBAL (1988) ont mesuré une réserve en eau dans le sol de 215 à 266 mm sous le couvert des arbres alors que hors du couvert elle n'était que de 137 à 172mm. Au contraire, d'autres études montrent l'effet inverse surtout quand la densité d'arbres est élevée (QUINKENSTEIN *et al.*, 2009). Par exemple en profondeur (de 1 à 3 m) la teneur en eau du sol autour de l'arbre peut être plus faible dû au prélèvement d'eau par les racines des arbres, notamment en été (CUBERA, MORENO, 2007).

1.2. L'impact des arbres sur les cultures

Les interactions entre les arbres et les cultures peuvent être regroupées en trois types : la compétition, la facilitation et la complémentarité (FERNANDEZ *et al.*, 2008). Les SAF sont des systèmes complexes. L'impact, négatif (compétition) ou positif (facilitation), des arbres sur les cultures est très variable dans l'espace et dans le temps. Il dépend notamment des conditions abiotiques (climat, sol etc.), des caractéristiques des végétaux (cultures et arbres) cultivés mais aussi des pratiques culturales des agriculteurs (INURRETA-AGUIRRE *et al.*, 2022). Généralement ce sont les arbres, plus grands, dominants et pérennes qui ont une plus grande influence dans les SAF que les cultures (KOHLI *et al.*, 2007) bien qu'à leur plantation, lorsque les arbres sont très jeunes et peu développés cela puisse être l'inverse (BLANCHET, 2021)

Lorsque les conditions abiotiques sont difficiles, les interactions négatives entre les arbres et les cultures peuvent s'atténuer en laissant plus de place aux interactions positives, car comme il est décrit ci-dessus, les arbres peuvent modifier les conditions microclimatiques ce qui peut être bénéfique pour les plantes cultivées. Ainsi, il est possible que l'amélioration des conditions environnementales surpassent les effets de la compétition pour les ressources (TEMANI *et al.*, 2021).

1.2.1. La compétition entre les arbres et les cultures

La compétition entre les arbres et les cultures dépend de nombreux facteurs : la synchronicité des besoins des arbres et des plantes, de l'efficacité et de l'architecture des organes de capture des ressources (comme les racines ou les feuilles), de la disponibilité de la ressource etc. Lorsque les espèces ont accès à la même ressource, le terme de compétition par réduction de la ressource est utilisé. Si une espèce réduit la quantité de la ressource disponible pour l'autre espèce sans que celle-ci ne puisse agir, il faut alors parler de compétition par préemption de la ressource (BLANCHET, 2021 ; CRAINE, DYBZINSKI, 2013). Si les besoins des arbres et des cultures se chevauchent et que les ressources ne sont pas assez abondantes, alors cela peut entraîner de la compétition et donc une productivité plus faible qu'en monoculture pour les deux espèces (QUERNÉ *et al.*, 2017 ; FERNANDEZ *et al.*, 2008).

1.2.1.1. La compétition pour la lumière

Comme décrit dans la partie 1.1.1., les arbres interceptent la lumière réduisant ainsi la quantité de radiation pour les cultures ; il faut donc parler de compétition par préemption pour cette ressource. La réduction de la lumière disponible pour la culture engendrée par les arbres limite l'activité photosynthétique des plantes et donc leur potentiel de production de biomasse (BLANCHET, 2021). QUERNÉ *et al.* (2017) ont trouvé que la biomasse aérienne de la luzerne en SAF méditerranéen augmentait avec la quantité de lumière reçue par les plantes. La luzerne la plus à l'ombre des arbres était 28% plus basse que celle la plus au soleil. De plus, les retards de développement phénologique, et une réduction de croissance des plantes, et de tallage pour les céréales, sont assez fréquentes dans les SAF principalement dues à l'ombrage (TEMANI *et al.*, 2021 ; INURRETA-AGUIRRE *et al.*, 2018). L'ombrage peut induire des modifications morphologiques et/ou

physiologiques des plantes. Chez la plupart des plantes, la masse surfacique des feuilles diminue avec la disponibilité de la lumière. En effet lorsque la lumière n'est pas limitante, les plantes ont tendance à augmenter leur biomasse foliaire pour améliorer la photosynthèse. Au contraire, dans des conditions limitantes en termes de luminosité, les plantes vont augmenter la surface de leurs feuilles pour capter le plus de radiations possibles. Le blé par exemple peut augmenter sa surface foliaire, jusqu'à 48% si la diminution des radiations est de 50%. Concernant les changements physiologiques, les cultures peuvent par exemple augmenter leur chlorophylle, ce qui leur permet d'utiliser plus efficacement la lumière disponible (ARENAS-CORRALIZA *et al.*, 2019). Cependant, ces modifications morphologiques et/ou physiologiques ne sont pas systématiques : ARTRU *et al.* (2017) n'ont pas observé de différences morphologiques entre le blé en AF et en système conventionnel.

L'impact de l'ombre sur le rendement n'est pas négligeable. Elle peut engendrer environ 10 à 30 % de perte de rendement des cultures dans les systèmes agri-sylviculturaux en fonction des différentes cultures et conditions. Cette perte peut même s'élever à 50% si la densité d'arbres est très élevée, que le feuillage est permanent et/ou que les arbres ne sont pas taillés (TEMANI *et al.*, 2021). La figure 7 montre l'intensité de l'impact de l'ombre sur le rendement en fonction du type de culture. La qualité du rendement peut aussi être diminuée. Dans le cas du blé par exemple, l'ombre entraîne une diminution du taux de protéines dans les grains (ARTRU *et al.*, 2017).

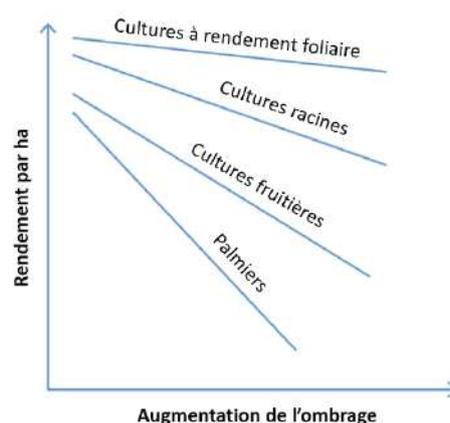


Figure 7: Réponses générales de différentes cultures à l'ombrage (adapté de MUSCHLER, 2016)

L'impact de l'ombrage sur les cultures peut être modéré en fonction de quand il a lieu : si l'ombrage sur les cultures se produit lorsque le soleil est plutôt bas (tôt ou tard dans la journée), il impactera possiblement moins le rendement que si il a lieu à la mi-journée où le flux de photons est à son maximum (CHIRKO *et al.*, 1996). De plus certains stades de développement des plantes sont plus sensibles que d'autres à l'ombrage selon les cultures, l'ombrage effectué lors de ses stades aura donc plus d'impact (DUFOR *et al.*, 2013 ; TEMANI *et al.*, 2021). Enfin, les effets de cette compétition seront moins importants dans les zones méditerranéennes par exemple, où la quantité de radiations est généralement supérieure aux besoins des plantes et où les principales contraintes photosynthétiques sont les fortes températures et le manque d'eau (FLEXAS *et al.*, 2014).

Pour diminuer la compétition pour la lumière et donc ses effets, il est important de réfléchir à l'orientation et à l'espacement des rangées, à la taille¹ des arbres et aux temporalités du développement des cultures et des arbres (DUFOR *et al.*, 2013). Il est aussi possible de sélectionner des plantes (variétés et espèces) plus tolérantes à l'ombrage (VARELLA *et al.*, 2011) car les plantes ont des besoins différents en termes de radiations (ARENAS-CORRALIZA *et al.*, 2019).

1.2.1.2. La compétition pour l'eau et les nutriments

La compétition pour les ressources du sol dépend des espèces d'arbres et de plantes cultivées (ayant des besoins plus ou moins importants en eau) plantés mais aussi de comment sont distribuées leurs racines (QUINKENSTEIN *et al.*, 2009). Si les racines de l'arbre sont uniquement profondes et celles de la culture superficielles alors la compétition pour l'eau des pluies et les nutriments entre les arbres et les cultures est par préemption. Cependant si les racines occupent le même espace dans le sol alors ce sera de la compétition par réduction (BLANCHET, 2021). La longueur des racines peut être réduite si les cultures se situent assez proche des arbres, ce qui diminue leur compétitivité pour les ressources (LIVESLEY *et al.*, 2004). La compétition pour les ressources diminue leur quantité dans le sol et donc contribue à diminuer sa fertilité.

¹ Dans le sens manière de tailler les arbres et à quelle période

L'impact de la diminution de la fertilité du sol sur le rendement de certains types de culture est représenté par la figure 8.

La compétition pour l'eau peut avoir plus d'impact sur les plantes que la compétition pour la lumière (JOSE *et al.*, 2000 a ; SINGH *et al.*, 1989). Par exemple, dans le Midwest des États-Unis une surface foliaire inférieure de 20% et un rendement 30% plus bas chez le maïs ont été observés pour un système en alley cropping dont les rangées d'arbres étaient peu espacées (8,5 m) à cause de la compétition pour l'eau. Dans un SAF en alley cropping d'une région tropicale semi-aride où les rangées d'arbres étaient proches (10 m), la perte de rendement en grain du sorgho a même atteint 74,2% majoritairement à cause de la compétition pour l'eau (QUINKENSTEIN *et al.*, 2009).

Lorsque les pluies sont suffisantes, ou que l'arbre a accès à l'eau d'une nappe phréatique, les arbres ne semblent pas entrer en compétition avec les cultures pour l'eau, le rendement des cultures n'est donc pas impacté (EVERSON *et al.*, 2009 ; QUINKENSTEIN *et al.*, 2009). Cependant, en climat méditerranéen, les périodes de sécheresse, plus ou moins intenses sont fréquentes. La compétition pour l'eau dans le sol (surtout si il est peu profond) entre les arbres et les cultures peut alors être assez rude, surtout quand les arbres sont jeunes et que leur feuillage n'est pas assez développé pour faire assez d'ombre aux cultures (PARIS *et al.*, 1998) et/ou que le système racinaire des arbres n'est pas capable d'aller chercher l'eau en profondeur (BLANCHET, 2021). Dans les zones semi-arides la compétition pour l'eau est le principal problème dans les SAF en AF intraparcellaire (FERNANDEZ *et al.*, 2008).

Les processus d'acquisition des nutriments dans les SAF sont représentés dans l'annexe 7. Dans le volume du sol où se rencontrent les racines des arbres et des cultures, la compétition pour les nutriments peut avoir lieu, notamment pour les éléments les plus mobiles. Plus la densité de racines dans le sol est élevée, plus la compétition est forte (GILLESPIE, 1989). Cette compétition peut aussi entraîner la réduction de potentiel de production de biomasse (BLANCHET, 2021). JOSE *et al.* (2000 b) ont observé qu'elle pouvait entraîner une perte de rendement chez le maïs en alley cropping : la biomasse des grains et des tiges du maïs en SAF était plus petite. Comme pour l'eau, plus les cultures sont proches des arbres, plus elles entrent en compétition avec eux pour les nutriments (ISAAC, BORDEN, 2019).

Pour diminuer la compétition pour les ressources du sol certaines solutions peuvent être utilisées. Augmenter l'espacement entre les rangées d'arbres peut être une bonne solution (QUINKENSTEIN *et al.*, 2009 ; GILLESPIE, 1989). Il est aussi possible de creuser des tranchées entre les arbres et les cultures, mettre en place des barrières physiques dans le sol, ou tailler les racines des arbres (ISAAC, BORDEN, 2019 ; INURRETA-AGUIRRE, *et al.*, 2022). Enfin, choisir des espèces adaptées peut aussi réduire cette compétition (QUINKENSTEIN *et al.*, 2009 ; GILLESPIE, 1989), par exemple, pour les ressources du sol, les céréales semblent être plus compétitives que les légumineuses (TEMANI *et al.*, 2021).

1.2.2. La complémentarité entre les arbres et les cultures

Si les arbres et les cultures occupent des niches écologiques* fondamentales différentes alors ils n'entreront pas en compétition et seront donc complémentaires. Cependant, comme il est décrit ci-dessus, arbres et cultures partagent une partie, plus ou moins importante en fonction des caractéristiques des SAF, de leur niche écologique. Cette partie s'appelle alors niche réalisée. Dans certains cas, les plantes s'adaptent pour sortir de cette niche et aller chercher les ressources jusqu'alors inaccessibles. Pour ce faire elles peuvent par exemple allonger leurs racines ou leurs tiges. (BLANCHET, 2021). La complémentarité est très importante

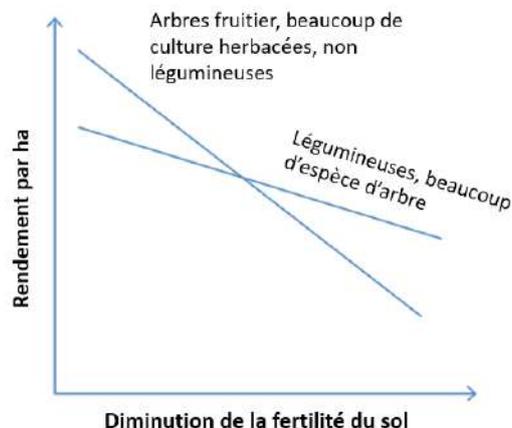


Figure 8: Réponses générales de différentes cultures à la compétition (adapté de MUSCHLER, 2016)

dans les SAF, elle peut aussi bien être spatiale que temporelle. C'est l'un des éléments clef pour éviter la compétition et optimiser l'utilisation des ressources. Pour qu'un SAF soit fructueux, « les arbres doivent acquérir des ressources que la culture n'aurait pas acquises autrement » (CANNELL *et al.*, 1996 : p.27).

De manière générale, les arbres ont un système racinaire plus important que les cultures : ils peuvent donc aller chercher les ressources plus en profondeur, où la culture n'a pas accès, ce qui par ailleurs permet l'utilisation des nutriments entrainés en profondeur par lixiviation ou lessivage comme l'azote, le potassium, le calcium ou le magnésium (KOHLI *et al.*, 2007 ; DUPRAZ, LIAGRE, 2011). De plus des études ont montré que des cultures compétitives, comme les céréales, pouvaient avoir un effet sur les racines des arbres qui descendent encore plus en profondeur pour aller chercher l'eau et les nutriments. Cet effet va donc diminuer la compétition dans la couche supérieure du sol et donc augmenter la complémentarité dans l'utilisation des ressources (FERNANDEZ *et al.*, 2008 ; ISAAC, BORDEN, 2019). FERNANDEZ *et al.* (2008) ont montré que l'eau des 20 premiers centimètres du sol était utilisée à 80-100% par les cultures et que l'eau prélevée par les arbres se trouvait à 80% dans les profondeurs du sol. La complémentarité dépend aussi des conditions environnementales. Dans leur étude sur le millet dans un SAF au Sahel SMITH *et al.* (1997) ont montré que si la nappe phréatique est accessible au système racinaire des arbres alors le prélèvement d'eau des cultures et des arbres sera différencié.

La complémentarité peut aussi se trouver dans les périodes d'utilisations des ressources. Il peut alors être intéressant d'implanter une culture d'hiver dans un SAF avec des arbres au feuillage caduc pour que celle-ci puisse profiter de la lumière lors de son développement hivernal (BLANCHET, 2021).

1.2.3. La facilitation

La facilitation est le processus par lequel une espèce va augmenter la productivité d'une autre espèce notamment en augmentant les ressources à partager. Il peut s'agir de l'amélioration de la fertilité du sol (quantité de ressources disponible) mais aussi des effets de régulation microclimatique et des populations de bioagresseurs (BLANCHET, 2021). Un tableau présentant les facilitations rencontrées en AF tempérée se trouve en annexe F.

1.2.2.1. Régulation du climat

La modification du microclimat sous les arbres peut favoriser le développement des plantes présentes sous la canopée. Le terme effet refuge est alors utilisé (BLANCHET, 2021).

Dans les régions subhumides ou sèches semi-arides, l'évaporation à la surface du sol peut représenter 30 à 60% des pluies annuelles. En réduisant les températures, les radiations et le vent, les arbres peuvent permettre la réduction de l'évaporation de l'eau du sol et donc augmenter la quantité d'eau disponible pour les plantes, notamment lors des périodes de sécheresse (LIVESLEY *et al.*, 2004 ; QUINKENSTEIN *et al.*, 2009 ; BLANCHET, 2021).

Les SAF peuvent permettre de limiter l'évaporation du sol et la transpiration des plantes : l'évapotranspiration. En effet, les températures y sont plus basses, le vent réduit, les radiations et le déficit hygrométrique moins importants (BLANCHET 2021). CAMPI *et al.* (2009) ont observé que l'évapotranspiration du blé était de 16% inférieur dans les 14 m après une haie brise-vent à l'évapotranspiration du blé dans un système méditerranéen similaire sans arbre. L'ombrage des arbres permet de réduire la demande évaporative des cultures (QUINKENSTEIN *et al.*, 2009). Dans les SAF avec des caféiers par exemple, une diminution de la transpiration des plants de caféiers de 32% a été observée (LIN, 2010). De plus, même si l'eau dans le sol est abondante, un déficit hygrométrique de l'air important peut entrainer un stress hydrique chez la plante (KANZLER *et al.*, 2019). La transpiration de la feuille est presque proportionnelle au déficit hygrométrique à sa surface et est approximativement proportionnelle au déficit hygrométrique de l'air. En réduisant le déficit hygrométrique, les arbres réduisent la transpiration des plantes, ce qui aide à limiter le stress hydrique de la plante (MONTEITH

et al., 1991 ; KANZLER *et al.*, 2019). De plus l'évaporation de l'eau des pluies peut aussi permettre de diminuer la quantité d'eau transpirée par les plantes. En effet, cette eau nécessite moins d'énergie pour s'évaporer et s'évapore donc en premier, protégeant les plantes pendant ce temps (MONTEITH *et al.*, 1991).

En diminuant la variabilité du microclimat de la parcelle agroforestière, les arbres protègent les cultures des événements climatiques extrêmes comme les fortes chaleurs, tempêtes etc. (LASCO *et al.*, 2014). Pendant les années climatiquement défavorables, les rendements des cultures peuvent être meilleurs en AF qu'en monoculture : ARENAS-CORRALIZA *et al.* (2018) ont par exemple observé de meilleurs rendements pour les céréales grâce aux diminutions des températures pendant les stades sensibles d'élaboration du rendement. Dans le cas des régions venteuses où les arbres permettent une augmentation des températures, la germination des plantes peut être plus précoce et la croissance en début de saison plus importante (SMITH *et al.*, 2013). La diminution de la vitesse du vent peut quant à elle favoriser l'activité des insectes pollinisateurs, limiter les dommages mécaniques causés par le fouettement des tiges, des feuilles, des bourgeons, des fleurs et des fruits et donc améliorer le rendement (NORTON, 1988).

La sécheresse a tendance à renforcer la facilitation entre les espèces. Ces effets tampons sur la température, la diminution de l'évapotranspiration des arbres semblent être plus importants que la compétition dans des conditions semi-arides et permettent donc d'augmenter les rendements. De plus grands rendements peuvent alors être obtenus en AF que pour une monoculture (TEMANI *et al.*, 2021 ; GAO *et al.*, 2018). En AF, il peut même arriver que les rendements soient meilleurs en cas de sécheresse qu'en condition de pluie car l'allocation s'oriente vers les organes reproducteurs (BLANCHET, 2021).

1.2.2.2. Amélioration de la fertilité du sol

Dans les terres agricoles, les arbres peuvent contribuer à augmenter la fertilité du sol. En effet le feuillage et/ou les résidus de taille des arbres forment une litière sur le sol qui en se minéralisant libère des éléments nutritifs disponibles pour les cultures. La litière et la décomposition des racines permettent aussi l'enrichissement du sol en matière organique dans la couche supérieure (KOHLI *et al.*, 2007 ; MORENO MARCOS *et al.*, 2007 ; BALDY *et al.*, 1993). Cette matière organique dans le sol améliore la rétention des nutriments sous forme disponible pour les plantes. Elle a aussi un impact bénéfique sur la structure du sol et donc aussi sur l'infiltration et la rétention d'eau dans le sol (MUSCHLER, 2016 ; BALDY *et al.*, 1993). Aussi les arbres agissent comme pompe à nutriments : de par leurs racines profondes, ils peuvent permettre aux cations issus de l'altération de la roche-mère de remonter vers la surface et ainsi d'être disponibles pour les cultures (DUPRAZ, LIAGRE, 2011).

Les arbres peuvent également améliorer la disponibilité de certains nutriments en favorisant la mise en place d'interactions avec des microorganismes du sol (BLANCHET, 2021). Chez les légumineuses, les arbres peuvent augmenter la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. En effet, la compétition pour l'azote avec l'arbre et dans certains cas l'inhibition de la nitrification (voir partie 1.2.4.) entraîne une diminution d'azote dans le sol et donc une augmentation de la fixation (QUERNÉ *et al.*, 2017). De plus, une partie de l'azote atmosphérique fixée par une légumineuse est partiellement disponible pour l'autre espèce (DUPRAZ, LIAGRE, 2011). La matière organique de la litière des arbres sert de nourriture aux organismes du sol qui peuvent la minéraliser et ainsi libérer des nutriments pour les cultures (MUSCHLER, 2016). Les arbres favorisent aussi la présence et la diversité de champignons mycorhizien arbusculaire, qui en s'associant aux racines des plantes augmentent le potentiel d'acquisition des nutriments et d'eau (BATTIE-LACLAU *et al.*, 2020).

Enfin, par la porosité créée par les racines des arbres et l'activité importante de la faune du sol, l'AF permet une meilleure infiltration de l'eau dans le sol. Cette eau peut alors être utilisée par les arbres et les cultures (BAYALA, PRIETO, 2020). Aussi, par assenseur hydraulique, les arbres peuvent remonter l'eau des profondeurs du sol la rendant accessible pour les cultures, surtout pendant les périodes sèches (FERNANDEZ *et al.*, 2008). Pendant la nuit, il est possible que les racines des arbres se trouvant dans la zone la plus sèche du sol (généralement en surface) exsude de l'eau provenant des racines se trouvant dans la zone plus humide du sol (généralement en profondeur) lorsque l'arbre ne transpire pas (DUPRAZ, LIAGRE, 2011).

L'amélioration de la fertilité du sol n'est cependant pas systématique et dépend de nombreux facteurs comme la qualité et de la quantité de litière, des conditions climatiques, du type de sol etc. (KOHLI *et al.*, 2007)

1.2.4. Les effets allélopathiques

L'allélopathie est une interaction négative qui peut survenir entre les arbres et les cultures si l'une des espèces libère (dans l'air ou le sol) des composés chimiques nocifs qui peuvent ralentir ou bloquer la croissance et le développement de l'autre espèce. Elle peut entraîner une diminution des rendements lorsque la combinaison arbre-culture est inadéquate. L'effet de ces molécules dépend de leur concentration et donc des conditions environnementales. (KOHLI *et al.*, 2007). Certains arbres comme les peupliers (*Populus*), les eucalyptus (*Eucalyptus*), ou les noyers (*Juglans*) etc. (une liste détaillée des composés allélopathiques libérés par les arbres utilisés en AF et leurs effets est donnée par RIZVI *et al.*, 1999) sont connus pour libérer des composés allélopathiques par leurs feuilles, leurs racines, leurs tiges, leurs fruits mais aussi par la décomposition de la litière. Le noyer noir (*Juglans nigra* L.) par exemple est un arbre très allélopathique et a un impact important sur les plantes se trouvant proche de lui, notamment sur les légumineuses, les légumes et les plantes ornementales. Dans les bourgeons, les racines et les coques de noix se trouve du juglon* qui, au contact de l'air, s'active et devient toxique. Il peut causer le flétrissement, le brunissement des tissus, la nécrose ou même la mort des plantes voisines (BATISH *et al.*, 2007). Pour le maïs et le soja, la croissance est réduite près de ces arbres. En s'éloignant de l'arbre, la concentration en juglon diminue et les plantes sont donc moins affectées. Pour protéger les cultures du juglon, il est possible d'installer des barrières en polyéthylène dans le sol pour diminuer la concentration de juglon dans le sol où se trouvent les cultures (JOSE GILLESPIE, 1998).

Les effets allélopathiques n'affectent pas seulement les plantes : les composés chimiques libérés peuvent avoir un impact sur d'autres organismes vivants et donc affecter les communautés microbiennes du sol, inhibant les processus de minéralisation et de nitrification. Il y aura donc moins de nutriments disponibles pour les cultures (QUERNÉ *et al.*, 2017). Cependant, l'effet allélopathique des arbres peut aussi être bénéfique dans certaines situations pour réduire les populations d'adventices ou de ravageurs (insectes, nématodes ou agents pathogènes) (BATISH *et al.*, 2007).

1.3. Les performances agronomiques des PPAM en agroforesterie

De nombreuses PPAM poussent sous couverts forestiers et sont donc tolérantes à l'ombrage. Il semble donc pertinent de tester ces espèces dans des SAF, d'autant plus ces systèmes peuvent être assez rémunérateurs (RAO *et al.*, 2004 ; DAGAR, 2016 ; PALADA *et al.*, 2004). Les PPAM (pérennes ou annuelles) peuvent être cultivées dans de nombreux types de SAF où elles peuvent être la strate herbacée mais aussi la strate arborée. En Inde, par exemple, le tamarinier (*Tamarindus indica* L.), arbre médicinal dont la pulpe du fruit est utilisée comme laxatif peut être planté dans des terres cultivées et la menthe des champs (*Mentha arvensis* L.) peut être cultivée sous des peupliers (*Populus deltoides*) (RAO *et al.*, 2004).

Comme les autres cultures, les PPAM, lorsqu'elles sont utilisées comme strates herbacées, sont impactées par les arbres (RAO *et al.*, 2004) mais dans le cas de ces plantes, il faut aussi prendre en compte l'effet sur la production de métabolites secondaires dont l'HE. La quantité et qualité de l'HE produites par les plantes dépendent des conditions climatiques. Cependant les plantes ne réagissent pas toutes de la même façon à ces conditions (FIGUEIREDO *et al.*, 2008 ; KATSOUULIS *et al.*, 2022).

Aux premiers stades d'établissement des arbres la culture des PPAM peut se faire sans perte de rendement trop importante (PALADA *et al.*, 2004). Lorsque les arbres sont matures, le rendement, en biomasse et en HE peut parfois être plus important que pour une monoculture, bien que dans la majorité des cas il soit légèrement inférieur comme le présente l'annexe H (RAO *et al.*, 2004 ; SINGH *et al.*, 1998). ZUBAY *et al.* (2021) ont quant à eux montré que certaines espèces de PPAM cultivées en milieu tempéré, comme la mélisse officinale (*Melissa officinalis* L.), la sariette d'été (*Satureja hortensis* L.), le soucis officinal (*Calendula officinalis* L.) etc.

peuvent produire des rendements corrects avec une qualité conforme aux standards des industries pharmaceutiques. D'autres plantes comme la camomille matricaire (*Matricaria chamomilla* L.) et l'anis (*Pimpinella anisum* L.) ont montré de bons résultats sous des oliveraies. Chez la camomille, même si l'ombrage a réduit la teneur en certains composés (oxyde d' α -bisabolone A et l'hamazulène) elle a permis d'augmenter la teneur pour d'autres (oxyde d' α -bisabolol B). L'AF a eu d'autres effets sur la camomille comme le retard de la floraison et l'augmentation de sa hauteur. Au contraire, l'ombrage a diminué la hauteur des plants d'anis mais n'a pas affecté la production de graines et la production d'HE (KATSOU LIS *et al.*, 2022). Il est aussi possible que certaines espèces de PPAM aient de meilleur rendement en AF tropicale comme les différentes espèces de menthe (*Mentha sp.*), le poivrier long (*Piper longum* L.) le vétiver (*Vetiveria zizanioides* L.), le galanga camphré (*Kaempferia galanga* L.) etc. (SUJATHA *et al.*, 2011 ; RAO *et al.*, 2004).

Le manque de lumière en SAF avec des PPAM pourrait être un facteur limitant important pour la production des composés actifs contenus dans l'HE. Très peu d'informations sur la relation entre l'ombrage et l'accumulation de composés volatils (COV) dans l'HE pour les PPAM des climats tempérés sont disponibles. Il a cependant été observé qu'un ombrage léger (30%) peut permettre à certaines espèces, comme la mélisse officinale (*Melissa officinalis* L.) ou la sariette d'été (*Satureja hortensis* L.), d'augmenter leur rendement en HE ou la teneur en COV. Cependant un ombrage trop important (50%) n'apporte aucun bénéfice aux cultures (ZUBAY *et al.*, 2021).

La disponibilité de l'eau peut aussi être un facteur important dans la production d'HE. Pour certaines espèces comme le basilic ou l'estragon, la production de COV augmente lorsque les plantes subissent un stress hydrique tandis que celle du thym est meilleure lorsqu'il n'est pas stressé (FIGUEIREDO *et al.*, 2008).

De manière générale, les études sur les PPAM en AF ne sont pas nombreuses notamment pour les systèmes sous climat tempéré et méditerranéen. Il existe aussi un manque de recherche sur la composition et donc la qualité de l'HE produite par les PPAM en AF (ZUBAY *et al.*, 2021 ; RAO *et al.*, 2004 ; KATSOU LIS *et al.*, 2022).

1.3.1. La mélisse officinale (*Melissa officinalis* L.)

La mélisse (*Melissa officinalis* L.) est une plante méditerranéenne vivace appartenant à la famille des lamiacées. Elle pousse notamment dans les lieux ombragés frais comme les bois. Elle mesure généralement entre 30 et 150 cm. Ses feuilles, disposées de manière opposée, ont une forme de cœur et mesurent de 2 à 8 cm, leurs bords sont largement crénelés, voir dentés. Les tiges sont quadrangulaires et ramifiées. La croissance de la plante peut se dérouler rapidement entre 15°C et 35°C. Concernant les besoins en eau en culture conventionnelle, la culture aura besoin d'irrigation si les précipitations n'atteignent pas 500-600 mm pendant la période de croissance. Sa floraison a lieu de juin à septembre. Son système racinaire est composé de nombreuses racines poilues latérales ce qui la rend plus adaptative aux conditions environnementales. Les parties supérieures de la plante meurent au début de l'hiver mais de nouvelles pousses émergent des racines au début du printemps suivant (iteipmai, 2020 ; MORADKHANI *et al.*, 2010 ; SHAKERI *et al.*, 2016).

Les feuilles de la mélisse peuvent être utilisées comme épice, aromate ou en tisane. Les parties aériennes des feuilles peuvent aussi servir à la production d'extraits, en particulier l'acide rosmarinique, ou d'HE. La mélisse officinale contient assez peu d'HE : 0,02 à 0,3%. Les principaux composés phytochimiques présents dans l'HE de la plante sont présenté par le tableau 1 et une liste plus détaillée se trouve en annexe J (iteipmai, 2020 ; MORADKHANI *et al.*, 2010 ; SHAKERI *et al.*, 2016). Les facteurs pouvant influencer la teneur en HE et sa composition en AF sont la luminosité, la température et la disponibilité de l'eau et des nutriments (MORADKHANI *et al.*, 2010).

La mélisse officinale semble être une bonne candidate pour la culture en AF. En effet, elle semble plutôt tolérante à l'ombrage et les rendements en biomasse fraîche et sèche ne semblent pas significativement affectés par la présence des arbres (ZUBAY *et al.*, 2021). Dans leur étude ZUBAY *et al.* (2021) ont observé que lorsque l'année est assez chaude et pluvieuse, la taille de la plante était négativement impactée par les arbres, surtout la première année de la culture. La largeur n'était quant à elle pas affectée. La teneur en HE et en acide rosmarinique était elle aussi diminuée par les arbres. Cela peut être dû à la luminosité : de 1000 à 1500 lux, le taux d'HE et les teneurs en tanin augmentent avec l'intensité lumineuse (MORADKHANI *et al.*, 2010). Cependant, le taux d'acide rosmarinique n'est pas descendu en dessous de 2% ce qui est le seuil minimal des normes de la pharmacopée (iteipmai, 2020). Lors de la dernière année de leur étude, qui était plus froide et sèche, ZUBAY *et al.* (2021) ont au contraire remarqué que la hauteur et la largeur et donc les rendements de la mélisse officinale étaient plus grands en AF. De même, les teneurs en HE et en acide rosmarinique étaient plus importantes que pour la culture sans arbre. Ils en ont conclu que l'AF permettait de protéger cette plante des effets de la sécheresse, bien qu'il ait aussi été observé qu'un léger déficit hydrique entraînerait une plus grande production d'HE (MORADKHANI *et al.*, 2010). MOSQUERA-LOSADA *et al.* (2018 a) ont quant à eux observé que les merisiers (*Prunus avium* L.) n'avaient aucun impact sur la production de biomasse de la mélisse. Une plus forte densité d'arbres pouvait permettre une plus grande teneur en acide rosmarinique due au retard de la floraison causé par l'arbre.

Tableau 1: Principaux composants phytochimiques présents dans l'HE de *Melissa officinalis* L. (adapté de MORADKHANI *et al.*, 2010)

| Composants | Pourcentage de la masse d'HE |
|---------------------|------------------------------|
| Beta-ocimene Z | 0.2 |
| Beta-ocimene E | 0.1 |
| Citronellal | 0.01 |
| Neral | 43.8 |
| Geraniol | 5.3 |
| Geranial | 5.2 |
| Thymol | 7.9 |
| Carvacrol | 0.8 |
| Citronellyl formate | 0.2 |
| Geranyl acetate | 2.3 |
| Germacrene D | 0.3 |
| Beta- caryophyllene | 13.5 |
| Alpha-humulene | 0.7 |
| Caryophyllene oxide | 0.3 |
| Globulol | 6.8 |
| Humulene epoxide | 0.3 |
| 5-cedranone | 0.2 |
| Total | 89.01 |

L'azote est aussi un facteur important pour les rendements en biomasse et en HE de la mélisse officinale. Un manque d'azote peut entraîner une diminution de la taille des plantes mais aussi de leur nombre de tiges et de la teneur en HE. De plus un déficit hydrique trop important : supérieur à 25% provoque une perte significative de rendement (MORADKHANI *et al.*, 2010). Une compétition trop sévère entre les arbres et les cultures pour cet élément pourrait alors avoir des effets négatifs sur la mélisse.

1.3.2. La verveine odorante (*Aloysia citrodora* Palau)

La verveine odorante (*Aloysia citrodora* Palau [syn. *Verbena triphylla* L'Hér., *Lippia triphylla* (L'Hér.) Kuntze, *Zapania citrodora* (Palau) Lam, *Aloysia citriodora* Ort. etc.]) aussi appelée verveine citronnelle, est une plante vivace originaire d'Amérique du Sud appartenant à la famille des verbenaceae. Ce petit arbuste a été introduit en Europe au XVII^{ème} siècle où il y est depuis cultivé pour ses propriétés médicinales et aromatiques. Il peut atteindre 1,5 m à 2 m de haut. Ses feuilles ont une forme lancéolée, à bords entiers et sont verticillées par trois. Ses tiges sont anguleuses cannelées et ramifiées. La verveine est une plante plutôt robuste qui peut pousser au soleil ou en condition de semi-ombre, sur une assez grande plage de température. Cependant elle craint les gelées. Sa floraison a lieu en été (ARGYROPOULOU *et al.*, 2010 ; iteipmai, 1992). La plante a besoin d'une assez grande quantité d'eau pour atteindre son potentiel de croissance maximum : 7000-9000 m³ ha⁻¹ (BENSABAH *et al.*, 2015).

Les feuilles de la verveine peuvent être séchées puis utilisées dans des infusions pour leurs propriétés médicinales. L'HE est utilisée en parfumerie mais aussi en pharmacie (ARGYROPOULOU *et al.*, 2010 ; iteipmai, 1992). Selon les standards de la pharmacopée, les feuilles entières doivent contenir au minimum 3 ml.kg⁻¹ d'HE et les feuilles fragmentées 2 ml.kg⁻¹. Cette huile doit être composée d'au moins 2,5 % d'actéoside. Les principaux composés phytochimiques présents dans l'HE de la plante sont présentés par le tableau 2 et

une liste plus détaillée se trouve en annexe K. Comme pour la mélisse, les conditions climatiques et l'ombrage peuvent influencer les rendements et la composition de l'HE (GOMES *et al.*, 2009 ; SGARBOSSA *et al.*, 2019).

L'ombrage ne semble pas avoir d'effet sur la teneur en HE dans les plants de verveine odorante. Cependant, plus il y a de lumière, plus les plantes produisent de biomasse aérienne (et de biomasse racinaire) donc plus la production d'HE est importante. Aussi, un plus grand nombre de trichomes glandulaires, où est stockée la majorité de l'HE, a été compté chez les plantes en plein soleil. Une ombre légère, de 30% n'a que peu d'impact sur les rendements par rapport à des conditions de plein soleil. Cependant, une ombre plus importante, de 50% à un impact plus négatif (GOMES *et al.*, 2009).

Une étude menée par PROCHNOW *et al.* (2017) a montré que la composition de l'HE de verveine ne semble pas dépendre de la situation de stress hydrique de la plante.

Il semblerait aussi que de grandes quantités d'azote et de phosphore amélioreraient la production de biomasse mais diminueraient la teneur en HE dans les plantes (BARROSO *et al.*, 2014).

Aucune étude n'a été réalisée sur la verveine odorante en AF. Il est tout de même possible de supposer que la plante pourrait s'adapter à un SAF qui laisserait passer au moins 30% de lumière. Au-delà de ce seuil, les rendements seraient trop affectés.

Tableau 2 : Principaux composants phytochimiques présents dans l'HE de *Aloysia citrodora* Palau (adapté de HEMATIAN SOURKI *et al.*, 2021)

| Compostant | Pourcentage de la masse d'HE |
|--------------------------|------------------------------|
| 6- methyl-5-Hepten-2-one | 1,914 |
| Limonene | 6,860 |
| 1,8- Cineole | 4,612 |
| Citronellal | 0,584 |
| Terpinen-4- ol | 0,598 |
| α- Terpeneol | 1,412 |
| Neral | 20,005 |
| Géranial | 27,206 |
| Geranyl acetate | 1,438 |
| (E)- Caryophyllene | 1,562 |
| ar- Curcumene | 4,636 |
| Spathulenol | 7,275 |
| Caryophyllene oxide | 6,767 |
| epi-α- Cadino | 1,002 |
| α- Cadinol | 1,266 |
| Total | 87,137 |

1.4. Bilan

L'ajout d'arbres dans une parcelle modifie donc le microclimat généralement en réduisant la luminosité et la vitesse des flux d'air, en diminuant les températures en journée et en augmentant légèrement l'humidité de l'air. Des interactions entre les arbres et les cultures se mettent aussi en place : compétition (pour la lumière, l'eau et les nutriments), complémentarité (optimisation de l'utilisation des ressources), facilitation (protection contre les fortes chaleurs et les intempéries, amélioration de la fertilité du sol) et possiblement allélopathie. Plus les plantes sont proches des arbres plus elles seront impactées par ces derniers (BLANCHET, 2021 ; KOHLI *et al.*, 2007). Un schéma récapitulatif des principaux impacts des arbres dans un SAF avec des PPAM sous climat méditerranéen est présenté par la figure 9.

Généralement, bien que la productivité des SAF soit plus importante que celle des systèmes en monoculture, le rendement des cultures est plus faible que dans un système agricole sans arbres (BLANCHET, 2021). De plus la production d'HE (quantité et composition) peut être affectée par la présence des arbres mais cela dépend des espèces (KATSOUKLIS *et al.*, 2022). Il est possible que, sous certaines conditions climatiques comme de longues sécheresses, l'impact des arbres sur les rendements des cultures soit positif (ARENAS-CORRALIZA *et al.* 2018). Dans le sud-est de la France, en climat méditerranéen, il est possible d'émettre l'hypothèse que les arbres aient un impact positif sur les performances agronomiques des PPAM :

- Les oliviers pourraient modifier le microclimat de la parcelle. Grâce à leur ombre ils permettraient d'abaisser les températures dans la parcelle pendant les journées d'été.
- L'agroforesterie aurait un impact positif sur l'activité primaire des PPAM : les effets de la facilitation, notamment contre le stress hydrique, seraient plus importants que ceux de la compétition. Les plants de verveine odorante et surtout de mélisse officinale bénéficiant de l'ombre des arbres pourraient donc produire plus de biomasse que les autres.

- L'agroforesterie aurait un impact négatif ou pas d'impact sur l'activité secondaire des PPAM : la production d'HE (quantité et composition) de la mélisse et surtout de la verveine serait moins importante et de moins bonne qualité à cause du manque de lumière.

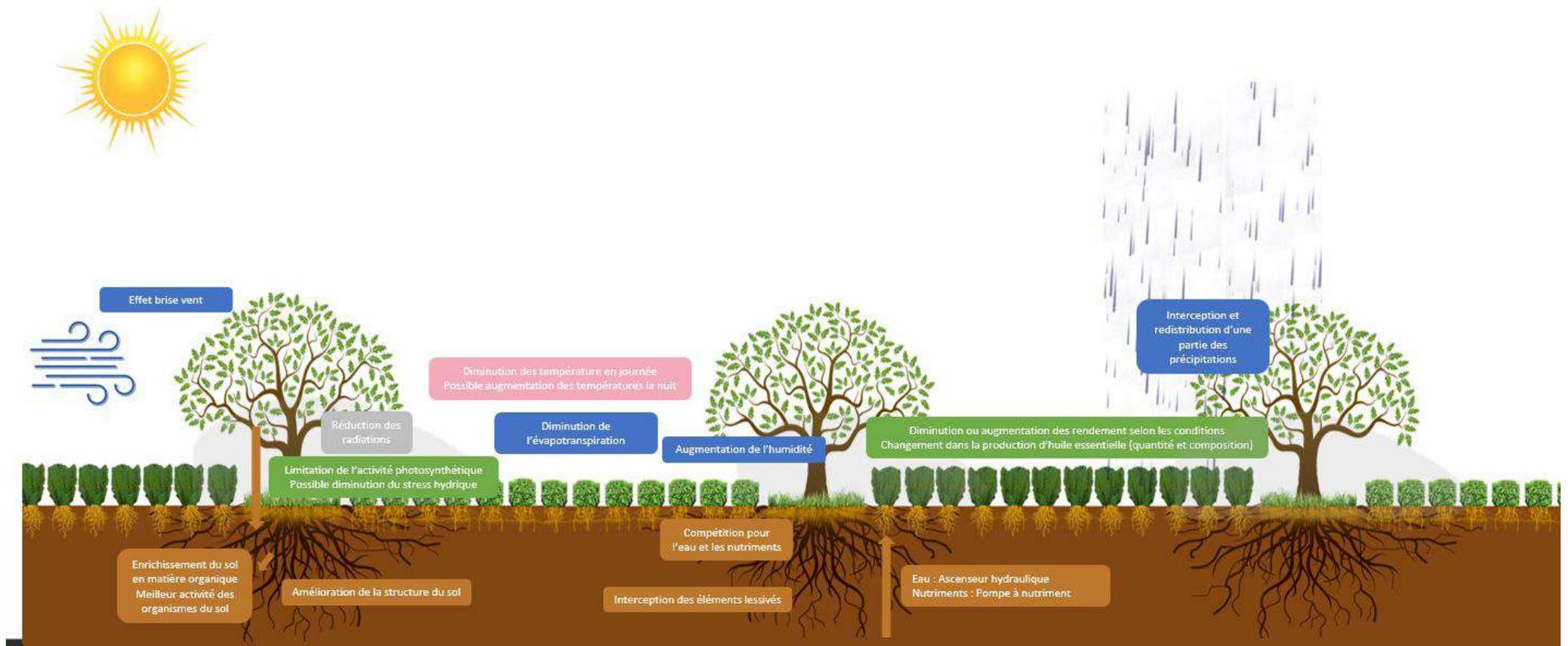


Figure 9 : Schéma des principaux impacts des arbres dans un SA avec des PPAM sous climat méditerranéen

2. Matériel et méthodes

2.1 Présentation de la zone d'étude

Dans le cadre du projet une parcelle de mélisse officinale (*Melissa officinalis* L.) et une autre de verveine odorante (*Aloysia citrodora* Palau) ont été étudiées sur le même site, présenté par la figure 10, à Valensole, dans le département Alpes-de-Haute-Provence (43°52'35.0"N 5°54'22.5"E, altitude : 334-335 m) (Géoportail, 2022). Des capteurs météorologiques ont été placés sur une parcelle de verveine en monoculture située à environ 400m des parcelles agroforestières Le climat y est méditerranéen avec une température moyenne annuelle de l'air environ égale à 13.4°C et des précipitations moyennes annuelles d'environ 490 mm. En été il y a très peu de précipitations, les températures moyennes et moyennes maximales se trouvent respectivement autour de 23°C et de 30°C. Les hivers sont assez doux : les températures moyennes avoisinent les 5°C mais les températures minimales moyennes sont proches de 0°C (Infoclimat, 2022).



Figure 10 : Site d'étude et sa localisation (Google Maps, 2022)

2.2. Pratiques culturales

Les parcelles ont été implantées sur une ancienne oliveraie d'environ 25 ans où une rangée sur deux a été retirée en 2018. Les distances entre les arbres et l'orientation des rangées sont représentées dans la figure 11. La mélisse officinale et la verveine odorante, implantées en 2019, sont cultivées en agriculture biologique. Entre les rangées d'oliviers hauts de 2 à 3 m, se trouvent 10 rangs de cultures.

La parcelle de verveine a reçu 3 irrigations de 55 m³ : une fin juin après une fertilisation avec de l'engrais organique (10N-4P-0K à 500 kg.ha⁻¹), une mi-juillet et une dernière en mi-août. Une irrigation de maintien d'environ 18 m³ a été réalisée fin juillet. La parcelle de mélisse n'a quant à elle pas été irriguée mais elle a tout de même bénéficié des embruns de l'irrigation des bandes voisines. Elle a reçu la même fertilisation que la parcelle de verveine.

La récolte de mélisse a eu lieu le 7 juin 2022 et celle de la verveine le 24 juin 2022.

2.3. Collecte des données

2.3.1. Les données microclimatiques

Les conditions climatiques ont été mesurées dans chaque répétition sur les rangs A, E et I grâce à des capteurs reliés à un boîtier e-pepiPIAF 1.1. Ces capteurs prennent une mesure chaque minute. Des photographies des installations sont présentes en annexe M.

La température ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) et l'humidité relative ($\pm 1,5\%$) sont mesurées grâce à un capteur placé à 1,6 m du sol. La luminosité est mesurée avec un capteur PAR80. Pour mesurer la tension de l'eau dans le sol des capteurs Watermark ont été installés dans le sol à 30 et 60 cm de profondeur.

Grâce aux mesures des températures, la température moyenne sur 24 heures, la température moyenne en journée, la température moyenne pendant la nuit et la variation de température sur 24 heures ont été calculées.

2.3.2. Les données sur les performances agronomiques des PPAM

Pour caractériser le métabolisme primaire des plantes, des stations d'environ 4 m, suivant l'ombre des arbres, contenant à peu près 10 plantes ont été mises en place. Dans ces stations, 5 plantes ont été choisies aléatoirement à chaque relevé pour effectuer les mesures. Il y a 3 blocs par rang. Le dispositif d'étude est schématisé par la figure 11.

La hauteur et leur largeur ainsi que le stade de développement moyen ont été mesurés toutes les deux semaines environ à partir du redémarrage des plantes : le 5 avril 2022 pour la mélisse et le 25 avril 2022 pour la verveine, jusqu'à la récolte des plantes : le 6 juin pour la mélisse et le 23 juin pour la verveine. Grâce à ces données, la surface verticale des plantes a pu être calculée en multipliant la hauteur et la largeur de la plante. Les dates de relevés et de récoltes sont présentes en annexe L.

Le rendement a été évalué sur 1 m linéaire par station pour la mélisse et sur 4 plantes successives par station pour la verveine. Pour la mélisse, le pourcentage de feuilles a été calculé après séchage à l'étuve (24h à 105°C) de 50g de matière fraîche. Pour la verveine, ce ratio a été calculé sur environ 70g de matière fraîche.

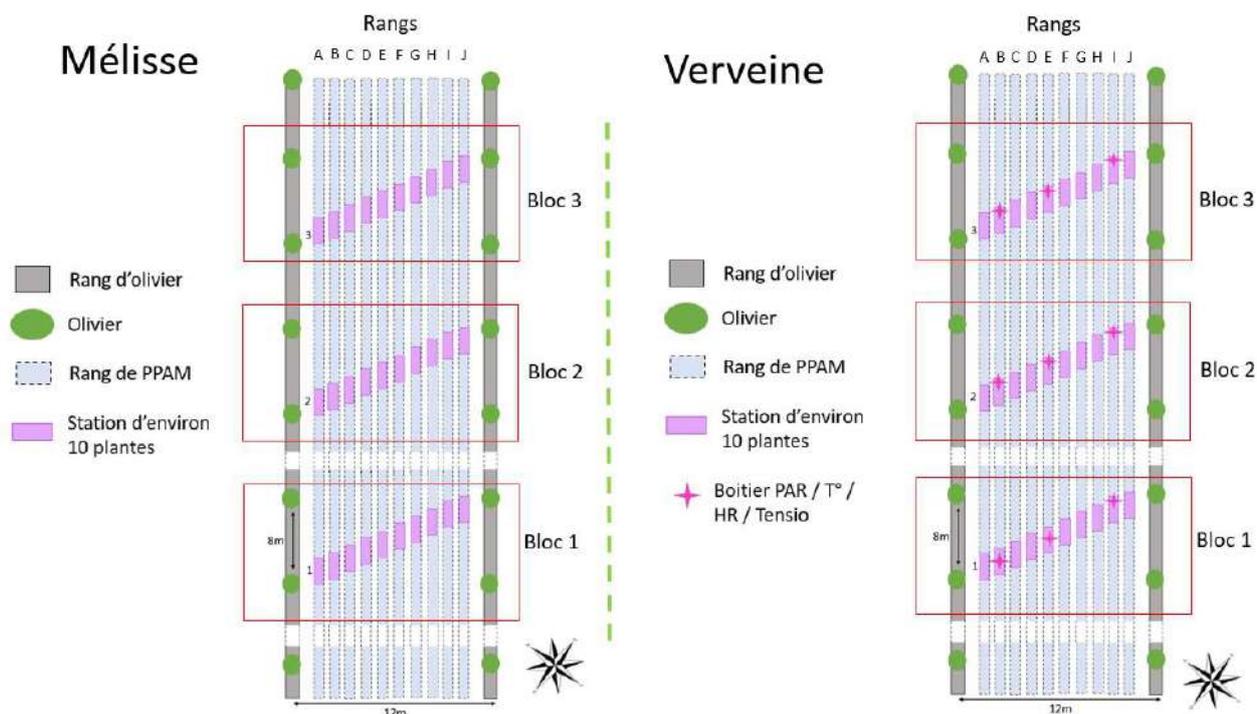


Figure 11 : Schéma du dispositif d'étude sur les parcelles de mélisse (à droite) et de verveine (à gauche). (PAR : capteur mesurant la luminosité, T° : capteur mesurant la température, HR : capteur mesurant l'humidité relative dans l'air, Tensio : sondes tentiométriques mesurant tension de l'eau dans le sol.)

Le métabolisme secondaire des plantes, a été évalué à partir d'échantillons provenant de la récolte. La teneur en HE de la mélisse a été mesurée par distillation sur 100g de matière sèche. Les échantillons ont été prélevés pendant la récolte. Pour cette mesure, les rangs ont été regroupés deux à deux (A-B, C-D, E-F, G-H, I-J) deux échantillons par modalité ont été analysés. L'analyse des constituants de l'huile essentielle de la mélisse s'est faite par chromatographie à l'aide d'une GCFID 2014A séries équipée d'une colonne DB-5 30 m, 0.25 mm, 0.25 u. La composition phytochimique de la verveine a été analysée grâce à une extraction faite

sur 1 g de feuilles à l'aide d'une solution d'azulène et d'acétate d'éthyle (après deux passages de 15 minutes du mélange aux ultrasons). L'extrait a ensuite été analysé grâce une chromatographie gazeuse couplée à un spectrophotomètre de masse. Pour cette mesure aussi, les rangs ont été regroupés deux à deux.

2.5. Analyses des données

Pour analyser les données microclimatiques, la période de mesure a été divisée par 15 jours pour plus de précision. Pour les mesures de température, d'hygrométrie, et d'humidité du sol, des moyennes ont ensuite été effectuées en regroupant les résultats par boitier et par jour.

Pour la luminosité, la somme des températures par période et par boitier a été calculée. Les mesures de la parcelle en AF ont ensuite été comparées avec la moyenne des résultats obtenus pour la parcelle en monoculture.

Des tests statistiques univariés (ANOVA ou test de Kruskal-Wallis + test post-hoc) ont ensuite été effectués selon la position des boitiers dans la parcelle (partie nord-ouest = rang B, milieu de la parcelle = rang E et partie sud-est = rang I). L'humidité du sol de la parcelle témoin n'a pas été prise en compte car la parcelle n'a pas été irriguée contrairement à la parcelle en AF.

Chez les deux plantes, le rendement, le pourcentage de feuilles, la teneur et la qualité de l'HE de mélisse et la qualité de l'extrait de verveine ont été analysés par groupe de deux rangs : A-B, C-D, E-F, G-H, I-J grâce à des tests statistiques univariés.

Pour l'analyse de la largeur, de la hauteur et de la surface verticale, les plantes ont aussi été regroupées par 2 rangs (A-B, C-D, E-F, G-H, I-J) pour augmenter le nombre d'individus par modalité et donc la précision des modèles statistiques. L'analyse de ces variables a été effectuée en fonction de la position (des rangs) des plantes dans la parcelle. Des effets d'interaction significatifs entre le bloc et les rangs ont empêché l'analyse univariée de la hauteur, la largeur et la surface verticale de la verveine. Cependant, des tests statistiques multivariés (modèles linéaires et modèles linéaires généralisés) ont été effectués pour tenter d'expliquer ces variables de croissance de la plante et fonction des variables microclimatiques (luminosité, température cumulée, humidité du sol à 30 cm et humidité du sol à 60 cm). Pour ces tests les mesures prises par un boitier ont été mises en relation avec les mesures prises sur les plantes se trouvant sur le même rang, et les plantes des deux rangs les plus proches.

3. Résultats

3.1. Les conditions microclimatiques

3.1.1 La luminosité

En prenant en compte l'ensemble de la parcelle, sur la période d'avril à aout, la luminosité est environ 16,62 % moins importante dans la parcelle agroforestière que dans la parcelle témoin. Cependant la quantité de lumière dans la parcelle agroforestière est assez hétérogène. Le tableau 3 présente les résultats obtenus pour chaque position. Même si les différences entre les modalités ne sont pas toujours significatives, des tendances sont observables : au milieu des rangées d'arbres (Rang E) la diminution de quantité de lumière est très faible, 5.4% en moyenne, tandis qu'au sud-est de la parcelle (Rang I) elle peut atteindre 30,9%. Au nord ouest de la parcelle, la réduction de la quantité de rayonnement est de 11.4% en moyenne.

Tableau 3 : Lumière transmise disponible (%) en fonction des modalités

| Mois | Rang B | Rang E | Rang I | Monoculture | P value | Test |
|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|---------------------------------------|
| Début avril | 87,91 ± 3,97 a | 93,89 ± 4,75 a | 67,67 ± 7,32 b | 100 a | 0,000185*** | ANOVA |
| Fin avril | 89,49 ± 3,76 ac | 95,88 ± 3,82 cb | 69,78 ± 7,87 a | 100 b | 0,01761* | Test de Kruskal-Wallis + test du Dunn |
| Début mai | 93,37 ± 5,10 ac | 97,02 ± 3,13 c | 66,84 ± 9,58 a | 100 bc | 0,02031* | Test de Kruskal-Wallis + test du Dunn |
| Fin mai | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| Début juin | 92,86 ± 6,23 | 91,05 ± 10,34 | 79,09 ± 12,53 | 100 | 0,1072 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin juin | 89,12 ± 5,53 | 93,57 ± 9,65 | 74,78 ± 15,60 | 100 | 0,07395 | Test de Kruskal-Wallis |
| Début juillet | 89,22 ± 5,97 | 92,67 ± 7,44 | 73,83 ± 15,69 | 100 | 0,0711 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin juillet | 72,33 ± 27,90 | 95,51 ± 5,48 | 69,51 ± 15,77 | 100 | 0,06711 | Test de Kruskal-Wallis |
| Début aout | 92,17 ± 0,22 ab | 96,38 ± 3,56 bc | 65,39 ± 13,22 a | 100 c | 0,0341* | Test de Kruskal-Wallis + test du Dunn |
| Fin aout | 90,99 ± 0,40 ac | 95,45 ± 3,22 bc | 54,27 ± 14,45 a | 100 b | 0,0341* | Test de Kruskal-Wallis + test du Dunn |

Peu importe la météo, la quantité de radiation au milieu de la parcelle est assez semblable à celle mesurée dans la parcelle en monoculture. Comme il est possible de voir sur la figure 12, les deux courbes suivent les mêmes tendances. Un très léger décalage est tout de même notable en début et en fin de journée, où le rang E reçoit légèrement moins de lumière. La quantité de lumière disponible est aussi plutôt similaire entre le nord-ouest de la parcelle agroforestière et la parcelle en monoculture. Cependant, lors de journées ensoleillées, la luminosité dans le rang B est moins importante en s'approchant du midi solaire que dans le rang B et la parcelle témoin. Aussi, elle diminue avant les autres modalités en fin de journée. Dans la partie sud-est de la parcelle, la luminosité suit la même tendance que les autres modalités par temps nuageux, tout en étant légèrement inférieure. Lorsque le temps est clair et dégagé, la luminosité commence à augmenter au même moment que les autres modalités mais semble stagner entre 8h et 12h avant d'augmenter. Après 16h, la luminosité mesurée dans le rang I est similaire à celle de la parcelle témoin.

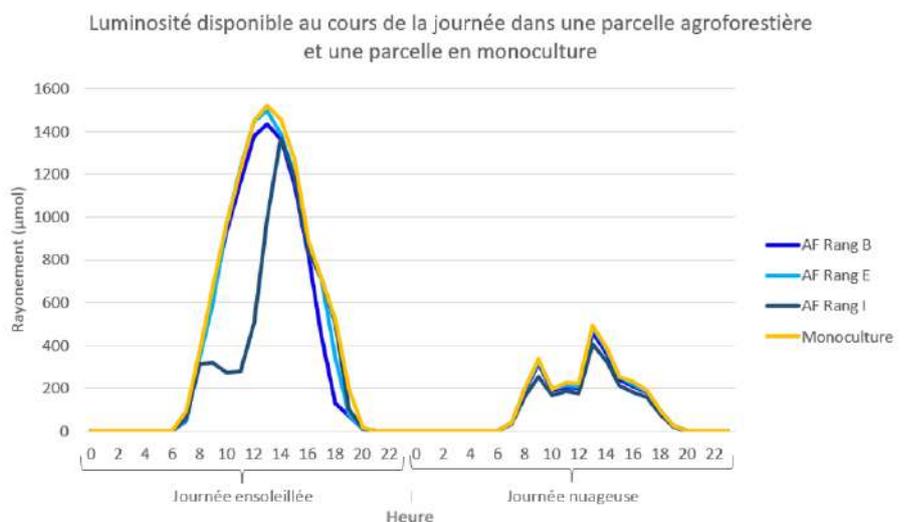


Figure 12: Luminosité disponible au cours d'une journée ensoleillée et d'une journée nuageuse dans une parcelle agroforestière et une parcelle en monoculture

3.1.2. La température

Sur la période de mesure des températures (températures moyennes sur 24h, température moyenne le jour, température moyenne la nuit et amplitude de températures sur 24h), il y a peu de différences significatives entre la parcelle en monoculture et les différentes modalités de la parcelle agroforestière. Lorsque les différences sont significatives, elles sont assez faibles : toujours en dessous d'un degré Celsius.

Comme il est possible de voir sur le graphique montrant l'évolution des températures moyennes au cours de la période de mesure (figure 13), les différences de température entre les modalités sont assez faibles.

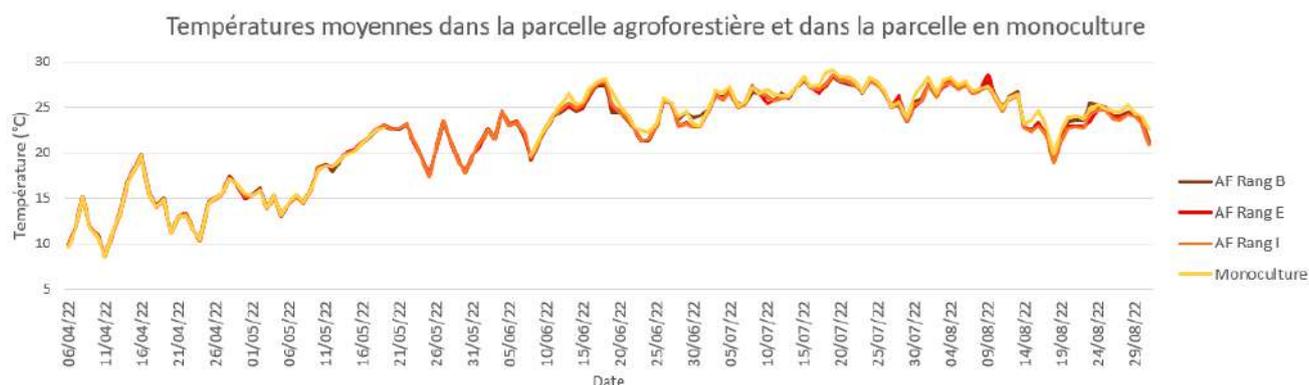


Figure 13 : Températures moyennes dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture

Les résultats des mesures de températures sont plus détaillés dans le tableau 4. Bien qu'il y ait parfois un effet significatif de la modalité sur les températures moyennes, les différences de température sont assez faibles. De début avril à début mai, les courbes se superposent et les différences entre les modalités ne dépassent pas les 0,2°C bien qu'elles soient significatives pour le mois d'avril. Pour cette période, c'est dans le sud est de la parcelle (rang I) que la température est la plus basse. Entre fin mai et fin juin, les différences de température entre les différentes modalités de la parcelle en AF sont très faibles et non significativement différentes les unes des autres. A partir de fin juin, les différences de température entre la parcelle agroforestière et la parcelle en monoculture sont un peu plus importantes et peuvent atteindre 0,5°C, bien qu'elles ne soient seulement significativement différentes à la fin du mois de juillet où il fait légèrement plus chaud dans la parcelle en monoculture.

Tableau 4 : Température moyenne sur 24h dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture

| Mois | AF Rang B | AF Rang E | AF Rang I | Monoculture | p-value | Test |
|---------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------|--------------------------------|
| Début avril | 12,81 ± 0,3 a | 12,78 ± 0,01 a | 12,65 ± 0,08 b | 12,72 ± 0,04 ab | 0,015* | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Fin avril | 14,55 ± 0,02 a | 14,51 ± 0,01 bc | 14,43 ± 0,09 b | 14,52 ± 0,02 ac | 0,027* | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Début mai | 16,62 ± 0,04 | 16,61 ± 0,06 | 16,53 ± 0,14 | 16,57 ± 0,01 | 0,545 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin mai | 21,00 ± 0,06 | 21,08 ± 0,08 | 21,06 ± 0,07 | NA | 0,461 | ANOVA |
| Début juin | 22,94 ± 0,02 | 23,02 ± 0,06 | 23,06 ± 0,05 | NA | 0,121 | ANOVA |
| Fin juin | 24,12 ± 0,02 | 24,23 ± 0,02 | 24,27 ± 0,14 | NA | 0,314 | ANOVA |
| Début juillet | 25,92 ± 0,10 | 25,96 ± 0,04 | 25,96 ± 0,16 | 26,23 ± 0,10 | 0,0532 | ANOVA |
| Fin juillet | 26,64 ± 0,01 a | 26,58 ± 0,06 a | 26,61 ± 0,18 a | 27,11 ± 0,12 b | 0,0074** | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Début aout | 26,28 ± 0,06 | 26,14 ± 0,03 | 26,06 ± 0,16 | 26,41 ± 0,09 | 0,071 | ANOVA |
| Fin aout | 23,22 ± 0,06 a | 23,04 ± 0,03 a | 22,87 ± 0,16 a | 23,18 ± 0,06 a | 0,048* | ANOVA + test post hoc de Tukey |

Le tableau 5 représente la moyenne des températures pendant la journée, entre le lever et le coucher du soleil. Les différences de température entre les modalités ne sont significatives que pour début avril, où il fait légèrement plus chaud dans la partie nord-ouest de la parcelle en AF que dans la partie sud-est et dans la parcelle témoin, et fin aout où il y a 0,14°C de plus dans nord-ouest de la parcelle en AF par rapport à la partie sud-est.

Tableau 5: Température moyenne pendant la journée dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture

| Mois | Rang B | Rang E | Rang I | Monoculture | p-value | Test |
|---------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------|--------------------------------|
| Début avril | 16,87 ± 0,04 a | 16,82 ± 0,02 ab | 16,63 ± 0,16 b | 16,62 ± 0,07 b | 0,019* | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Fin avril | 17,96 ± 0,03 | 17,90 ± 0,03 | 17,80 ± 0,16 | 17,92 ± 0,03 | 0,070 | Test de Kruskal-Wallis |
| Début mai | 19,83 ± 0,06 | 19,83 ± 0,10 | 19,73 ± 0,22 | 19,80 ± 0,02 | 0,747 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin mai | 24,44 ± 0,11 | 24,60 ± 0,10 | 24,58 ± 0,10 | NA | 0,309 | ANOVA |
| Début juin | 26,06 ± 0,04 | 26,16 ± 0,10 | 26,21 ± 0,06 | NA | 0,169 | ANOVA |
| Fin juin | 27,10 ± 0,07 | 27,27 ± 0,02 | 27,34 ± 0,18 | NA | 0,192 | ANOVA |
| Début juillet | 29,54 ± 0,06 | 29,61 ± 0,05 | 29,61 ± 0,19 | 29,90 ± 0,13 | 0,086 | ANOVA |
| Fin juillet | 30,34 ± 0,01 | 30,32 ± 0,06 | 30,28 ± 0,23 | 30,69 ± 0,15 | 0,083 | ANOVA |
| Début aout | 30,16 ± 0,11 | 29,89 ± 0,01 | 29,76 ± 0,22 | 30,06 ± 0,11 | 0,125 | ANOVA |
| Fin aout | 26,69 ± 0,06 a | 26,87 ± 0,08 ab | 26,57 ± 0,23 b | 26,69 ± 0,06 ab | 0,0323* | ANOVA |

La température moyenne pendant la nuit, entre le coucher et le lever du soleil, est présentée par le tableau 6. Début avril, il y a une différence significative d'environ 0,12°C entre les modalités de la parcelle agroforestière et la parcelle en monoculture où il fait plus chaud. Fin juillet il fait 0,73°C plus chaud dans la parcelle en monoculture que dans la parcelle agroforestière. Bien que les différences entre les modalités fin avril et début mai soient significatives, elles sont très faibles (<0.1°C). Début juillet, il y a une différence de température significative de 0.24°C entre la partie sud est de la parcelle en AF (rang I) et la parcelle en monoculture où il fait plus chaud.

Tableau 6 : Température moyenne pendant la nuit dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture

| Mois | AF Rang B | AF Rang E | AF Rang I | AF Témoin | p-value | Test |
|---------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------|--------------------------------|
| Début avril | 7,67 ± 0,04 a | 7,66 ± 0,02 a | 7,60 ± 0,02 a | 7,76 ± 0,03 b | 0,0008*** | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Fin avril | 9,79 ± 0,03 a | 9,77 ± 0,01 ab | 9,72 ± 0,01 b | 9,76 ± 0,02 ab | 0,0197* | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Début mai | 11,53 ± 0,01 a | 11,57 ± 0,01 a | 11,61 ± 0,01 b | 11,53 ± 0,01 b | 0,0011** | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Fin mai | 15,26 ± 0,03 | 15,23 ± 0,04 | 15,21 ± 0,05 | NA | 0,429 | ANOVA |
| Début juin | 17,39 ± 0,13 | 17,42 ± 0,02 | 17,47 ± 0,05 | NA | 0,466 | ANOVA |
| Fin juin | 18,70 ± 0,08 | 18,68 ± 0,02 | 18,66 ± 0,07 | NA | 0,784 | ANOVA |
| Début juillet | 19,54 ± 0,05 ab | 19,54 ± 0,01 ab | 19,52 ± 0,10 a | 19,76 ± 0,05 b | 0,0271* | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Fin juillet | 20,57 ± 0,07 a | 20,43 ± 0,26 a | 20,59 ± 0,06 a | 21,26 ± 0,06 b | 0,00106** | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Début aout | 20,52 ± 0,03 | 20,57 ± 0,04 | 20,56 ± 0,08 | 21,00 ± 0,06 | 0,206 | Test de Kruskal Wallis |
| Fin aout | 17,98 ± 0,02 | 18,00 ± 0,03 | 18,00 ± 0,08 | 18,60 ± 0,05 | 0,2055 | Test de Kruskal Wallis |

Enfin, le tableau 7 montre la différence entre la température la plus basse et la température la plus haute dans une journée en fonction des différentes modalités au cours de la période de mesure. Début avril, l'amplitude des températures est plus élevée de 0,92°C dans la parcelle en AF. Fin mai et fin juin la variation de température est plus faible au nord-ouest qu'au sud-est de la parcelle agroforestière. Début juin, c'est au milieu de la parcelle (rang E) que l'on retrouve la plus grande amplitude de température et au sud-est la plus faible. Fin aout, c'est dans la parcelle en monoculture que la plus faible amplitude est retrouvée. Pendant cette même période, l'amplitude est aussi plus faible dans la partie sud-est que pour le reste de la parcelle agroforestière.

Tableau 7: Amplitude des températures (sur 24h) dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture

| Mois | AF Rang B | AF Rang E | AF Rang I | Monoculture | p-value | Test |
|---------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------|--------------------------------|
| Début avril | 19,97 ± 0,16 a | 20,05 ± 0,15 a | 20,20 ± 0,45 a | 19,15 ± 0,23 b | 0,00563** | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Fin avril | 17,69 ± 0,12 | 17,62 ± 0,03 | 17,66 ± 0,23 | 17,29 ± 0,20 | 0,767 | ANOVA |
| Début mai | 18,51 ± 0,05 | 18,56 ± 0,16 | 18,76 ± 0,34 | 18,45 ± 0,21 | 0,5446 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin mai | 19,01 ± 0,09 a | 19,50 ± 0,18 ab | 19,96 ± 0,36 b | NA | 0,0255* | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Début juin | 18,65 ± 0,10 a | 18,97 ± 0,11 b | 19,39 ± 0,03 c | NA | 0,000585*** | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Fin juin | 18,13 ± 0,15 a | 18,52 ± 0,16 ab | 18,90 ± 0,15 b | NA | 0,027* | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Début juillet | 20,81 ± 0,40 | 21,07 ± 0,08 | 21,41 ± 0,13 | 21,30 ± 0,22 | 0,945 | ANOVA |
| Fin juillet | 21,07 ± 0,08 | 21,04 ± 0,44 | 21,27 ± 0,26 | 21,03 ± 0,07 | 0,628 | ANOVA |
| Début aout | 20,52 ± 0,03 | 20,57 ± 0,04 | 20,56 ± 0,08 | 21,00 ± 0,06 | 0,2005 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin aout | 19,86 ± 0,26 a | 18,98 ± 0,04 a | 19,08 ± 0,26 b | 18,09 ± 0,01 c | 0,0017** | ANOVA + test post hoc de Tukey |

3.1.3 L'humidité

L'humidité de l'air, présentée par le tableau 8, n'est significativement différente que pour le mois de juillet où elle est près de 2% plus haute dans la parcelle en AF. Même si les différences ne sont pas significatives pour l'ensemble des périodes, il est possible d'observer que l'humidité relative a tendance à être plus faible dans la parcelle en monoculture. Au sein de la parcelle agroforestière, l'humidité semble être très légèrement inférieure au milieu de la parcelle (différence < à 0.5%).

Tableau 8: Humidité relative dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière et dans la parcelle en monoculture

| Mois | AF Rang B | AF Rang E | AF Rang I | Monoculture | p-value | Test |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|------------------------|
| Début avril | 52,62 ± 1,31 | 51,38 ± 0,02 | 53,42 ± 1,04 | 52,47 ± 0,42 | 0,1834 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin avril | 65,64 ± 0,50 | 65,31 ± 0,13 | 66,04 ± 0,39 | 65,48 ± 0,04 | 0,07524 | Test de Kruskal-Wallis |
| Début mai | 70,15 ± 0,37 | 69,68 ± 0,24 | 70,15 ± 0,37 | 70,07 ± 0,27 | 0,292 | ANOVA |
| Fin mai | 59,48 ± 0,24 | 58,96 ± 0,38 | 59,25 ± 0,11 | NA | 0,204 | ANOVA |
| Début juin | 53,61 ± 0,37 | 53,08 ± 0,39 | 52,90 ± 0,23 | NA | 0,143 | ANOVA |
| Fin juin | 58,41 ± 0,43 | 57,78 ± 0,18 | 57,78 ± 0,71 | NA | 0,381 | ANOVA |
| Début juillet | 49,68 ± 0,59 a | 48,69 ± 0,28 a | 48,67 ± 0,72 a | 46,68 ± 0,28 b | 0,00625** | ANOVA |
| Fin juillet | 50,42 ± 0,84 a | 50,79 ± 0,83 a | 50,42 ± 0,84 a | 47,51 ± 0,38 b | 0,00372** | ANOVA |
| Début aout | 53,30 ± 0,37 | 53,20 ± 0,24 | 53,68 ± 0,89 | 51,63 ± 0,27 | 0,0598 | ANOVA |
| Fin aout | 65,44 ± 0,45 | 65,47 ± 0,13 | 66,24 ± 0,94 | 64,51 ± 0,15 | 0,131 | ANOVA |

La quantité d'eau dans le sol est mesurée indirectement avec les sondes tensiométriques. Plus la tension est faible plus il y a d'eau disponible dans le sol. Comme il est possible de voir dans le tableau 9, il n'y a pas de différences significatives entre les modalités de la parcelle en AF pour l'humidité à 30 cm de profondeur. Pour l'humidité du sol à 60 cm de profondeur (tableau 10), il n'y a de différences significatives que pour la fin du mois de juin où la partie sud-est de la parcelle (rang I) est plus sèche que la partie nord-ouest.

Tableau 9 : Tension (Kpa) dans le sol à 30 cm de profondeur dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière

| Mois | AF Rang B | AF Rang E | AF Rang I | p-value | Test |
|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------|------------------------|
| Début mai | 25,81 ± 2,29 | 23,98 ± 2,60 | 23,51 ± 1,02 | 0,498 | ANOVA |
| Fin mai | 44,74 ± 22,79 | 58,71 ± 21,13 | 68,64 ± 28,55 | 0,602 | ANOVA |
| Début juin | 11,71 ± 7,47 | 29,69 ± 20,55 | 99,46 ± 100,69 | 0,1521 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin juin | 19,26 ± 0,03 | 45,48 ± 26,97 | 129,62 ± 110,72 | 0,06853 | Test de Kruskal-Wallis |
| Début juillet | 42,28 ± 28,72 | 55,93 ± 42,65 | 95,08 ± 65,98 | 0,561 | ANOVA |
| Fin juillet | 30,00 ± 7,04 | 41,68 ± 3,10 | 107,04 ± 78,21 | 0,06866 | Test de Kruskal-Wallis |
| Début aout | 72,85 ± 29,50 | 54,96 ± 20,91 | 139,73 ± 9,15 | 0,2082 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin aout | 73,33 ± 4,16 | 71,38 ± 12,74 | 93,44 ± 25,44 | 0,26 | Test de Kruskal-Wallis |

Tableau 10: Tension (Kpa) dans le sol à 60 cm de profondeur dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière

| Mois | AF Rang B | AF Rang E | AF Rang I | p-value | Test |
|---------------|----------------|-----------------|-----------------|----------|--|
| Début mai | 32,35 ± 8,70 | 26,23 ± 5,35 | 25,30 ± 6,72 | 0,396 | ANOVA |
| Fin mai | 33,10 ± 0,75 | 36,42 ± 7,07 | 49,25 ± 21,85 | 0,3628 | Test de Kruskal-Wallis |
| Début juin | 14,47 ± 3,59 | 26,10 ± 14,48 | 80,17 ± 81,42 | 0,1512 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin juin | 16,51 ± 3,15 a | 27,40 ± 8,82 ab | 99,72 ± 99,29 b | 0,04394* | Test de Kruskal-Wallis + test post hoc de Dunn |
| Début juillet | 24,39 ± 5,52 | 24,84 ± 7,97 | 70,30 ± 58,87 | 0,1054 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin juillet | 24,17 ± 0,92 | 24,41 ± 2,11 | 79,26 ± 57,87 | 0,1054 | Test de Kruskal-Wallis |
| Début aout | 113,47 ± 80,84 | 35,55 ± 10,62 | 48,08 ± 10,53 | 0,1335 | Test de Kruskal-Wallis |
| Fin aout | 75,93 ± 11,31 | 60,21 ± 15,37 | 91,22 ± 3,85 | 0,0528 | ANOVA |

Il est aussi possible de remarquer une tendance selon laquelle, à 30 et à 60 cm de profondeur, le sol de la partie sud-est de la parcelle est plus sec que dans le reste de la parcelle en AF. Il semble aussi que le sol soit plus humide au milieu de la parcelle. Il est tout de même important de noter des écarts types très importants entre les différentes mesures pour une modalité, surtout pour la partie nord ouest de la parcelle pour les mois de juin, juillet et août.

L'humidité du sol évolue rapidement : sur la figure 14 est présentée l'évolution de l'humidité dans le sol pour le mois de juillet. Les graphiques pour les mois de mai, juin et août se trouvent en annexe N. Comme ces graphiques le montrent, le sol à 30 cm est souvent plus sec mais aussi sèche plus vite après un apport d'eau que le sol à 60 cm. Cependant, pour toute la période de mesure, il reste difficile de dégager des tendances plus précises selon les différentes modalités

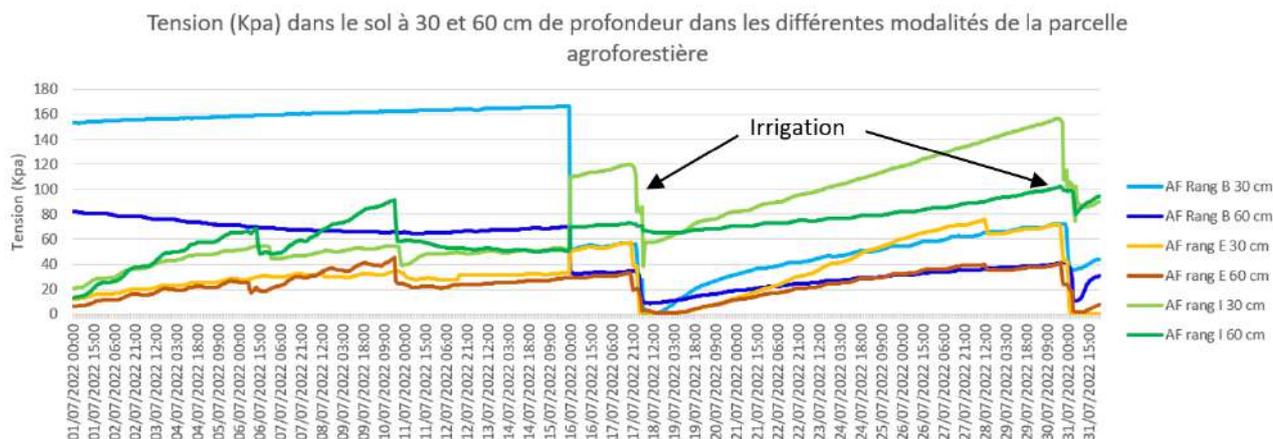


Figure 14 : Tension (Kpa) dans le sol à 30 et 60 cm de profondeur dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière au cours du mois de juillet

3.2. Les performances agronomiques des PPAM

3.2.1 Résultats pour la mélisse officinale (*Melissa officinalis* L.)

3.2.1.1. Le métabolisme primaire de la mélisse officinale

Aucune différence pour les stades de développement n'a été remarquée pour la mélisse entre les différentes modalités de la parcelle agroforestière.

Au contraire, pour les variables de croissance, hauteur, largeur et surface verticale, il y a des différences significatives entre les différentes modalités comme le montre le tableau 11.

Tableau 11 : Hauteur, largeur et surface verticale des plants de mélisse par rang à 3 dates différentes (au démarrage le 11/04/2022, avant la récolte le 07/06/2022 et entre les deux le 12/05/2022)

| Date | Rangs A-B | Rangs C-D | Rangs E-F | Rangs G-H | Rangs I-J | p-value | Test |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------|--|
| Hauteur le 11/04/2022 | 4,23 ± 0,94 a | 3,97 ± 0,76 a | 4,10 ± 0,99 a | 3,57 ± 0,90 b | 4,40 ± 0,89 a | 0,001548** | Test de Kruskal-Wallis + test post hoc de Dunn |
| Largeur le 11/04/2022 | 41,73 ± 5,60 a | 39,60 ± 6,95 a | 44,67 ± 9,50 b | 40,17 ± 6,28 a | 40,37 ± 4,42 a | 0,001601** | Test de Kruskal-Wallis + test post hoc de Dunn |
| Surface verticale le 11/04/2022 | 117,37 ± 45,30 a | 156,90 ± 41,14 ab | 179,37 ± 46,87 a | 143,03 ± 40,50 b | 177,27 ± 39,78 a | 0,00272** | ANOVA + test de Tukey |
| Hauteur le 12/05/2022 | 26,30 ± 6,82 a | 28,37 ± 6,39 a | 33,43 ± 4,14 b | 32,53 ± 3,59 b | 34,17 ± 4,96 b | <0,0001*** | Test de Kruskal-Wallis + test post hoc de Dunn |
| Largeur le 12/05/2022 | 53,87 ± 8,56 | 57,53 ± 7,30 | 65,63 ± 4,72 | 58,73 ± 5,97 | 60,00 ± 6,10 | NA | NA |
| Surface verticale le 12/05/2022 | 144,03 ± 521,77 a | 1646,80 ± 469,69 ab | 2196,93 ± 331,66 c | 1913,03 ± 301,36 bc | 2066,63 ± 440,04 c | <0,0001*** | ANOVA + test de Tukey |
| Hauteur le 07/06/2022 | 43,83 ± 9,84 a | 44,07 ± 6,43 a | 52,67 ± 5,66 b | 53,07 ± 7,57 b | 54,20 ± 10,29 b | <0,0001*** | Test de Kruskal-Wallis + test post hoc de Dunn |
| Largeur le 07/06/2022 | 70,70 ± 8,47 a | 73,87 ± 9,80 a | 80,93 ± 8,53 b | 80,77 ± 8,53 b | 77,77 ± 9,18 b | <0,0001*** | Test de Kruskal-Wallis + test post hoc de Dunn |
| Surface verticale le 07/06/2022 | 3136,70 ± 867,25 a | 3291,73 ± 778,62 a | 4273,93 ± 693,72 b | 4293,80 ± 767,62 b | 4277,10 ± 1083,76 b | <0,0001*** | ANOVA + test de Tukey |
| Hauteur et largeur en cm | | | | | | | |
| Surface verticale en cm ² | | | | | | | |

Comme il est aussi possible de le voir sur la figure 15, au redémarrage des plantes il y a peu de différences entre les différentes modalités mais avec le temps elles s'accroissent entre la partie nord-ouest et le reste de la parcelle. Le 11/04/2022, seule la hauteur des plantes se situant dans les rangs G et H est légèrement plus petite que les autres. A cette date, les plantes des rangs E et F sont légèrement plus larges que les autres mais seule la surface verticale des plantes des rangs G et H est plus faible que les autres (sauf des rangs C et D). A partir de 12/05/2022 il y a une différence plus marquée entre les rangs A, B, C et D et les autres rangs de la parcelle. Les plantes situées au milieu et au sud est sont plus hautes, plus larges et donc ont une plus grande surface verticale que les autres.

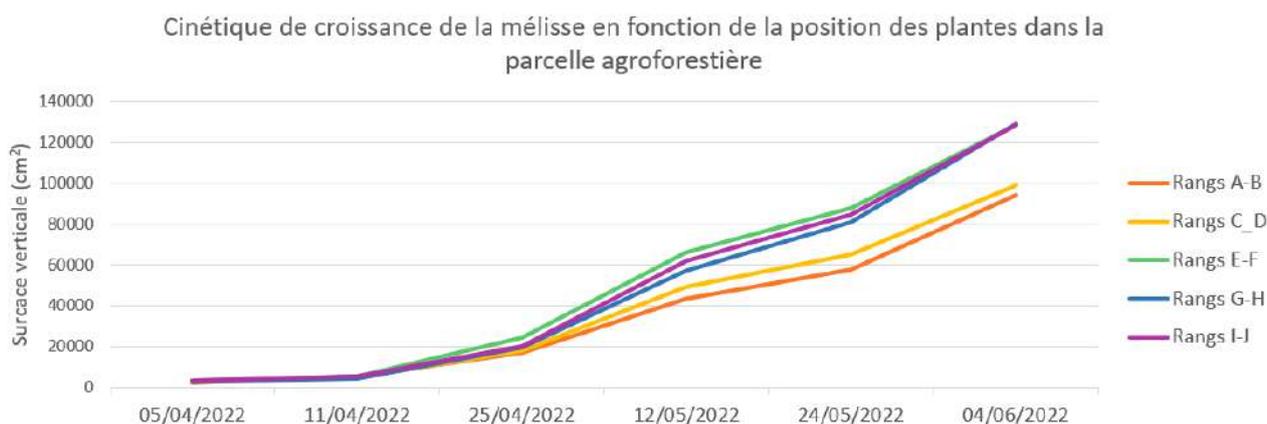


Figure 15 : Cinétique de croissance de la mélisse en fonction des rangs dans la parcelle agroforestière

Bien que la surface verticale soit significativement différente entre les rangs A, B, C, D et le reste de la parcelle, la position de la mélisse n'a eu aucun effet significatif sur les rendements. Cependant, comme le montre la figure 16, il se dégage là aussi une tendance : les rangs A-B sont les rangs où les plus faibles rendements sont obtenus (725 g.m⁻¹). Au contraire les rangs du milieu E et F obtiennent les meilleurs rendements (1071,66 g.m⁻¹). Il semblerait aussi que les rangs situés dans le sud-est de la parcelle aient aussi un meilleur rendement que les rangs situés dans la partie nord-ouest.

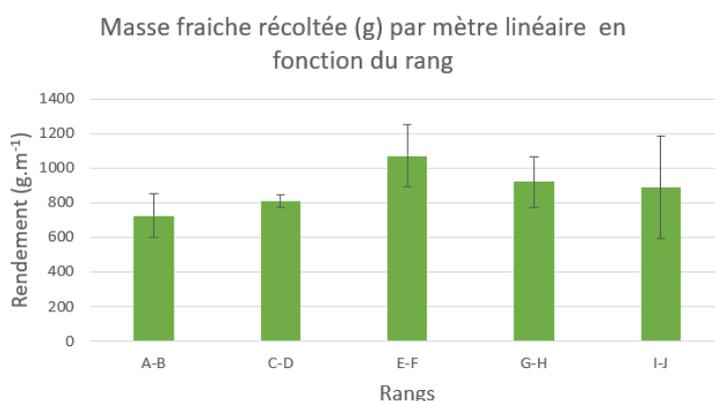


Figure 16: Rendement (g.m⁻¹) de la mélisse officinale en fonction du rang

Le pourcentage de feuilles, présenté par le tableau 12 est significativement différent entre les rangs A-B de la parcelle et les rangs E-F, G-H et I-J : les plantes des rangs A-B produisent plus de feuilles. Cependant, le rendement en feuilles n'est pas différent d'une modalité à l'autre. Il semblerait tout de même qu'il soit légèrement supérieur pour les rangs E-F.

Tableau 12 : Pourcentage de feuilles sur les plants de mélisse officinale en fonction des rangs

| Rang | A-B | C-D | E-F | G-H | I-J | p-value | Test |
|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------|------------------------|
| Pourcentage de feuille | 66,40 ± 2,57 a | 62,58 ± 2,57 ab | 52,11 ± 12,30 b | 52,60 ± 11,60 b | 59,56 ± 3,81 b | 0,03771* | Test de Kruskal-Wallis |

3.1.1.2. Le métabolisme secondaire de la mélisse officinale

Comme le montre le tableau 13, aucune différence significative n'a été observée concernant la quantité d'HE contenue dans les plants de mélisse. Il n'y a pas non plus de différence significative pour les différents composants de l'HE, mis à part pour le sabinène qui n'a été retrouvé que chez les rangs A-B et C-D. Les résultats plus précis pour chacun des composants sont présentés en annexe O.

Tableau 13: Teneur en HE dans les plants de mélisse officinale en fonction du rang

| Rang | Teneur en HE (mL.100g ⁻¹) |
|-------|---------------------------------------|
| A-B | 0,1256 ± 0,0229 |
| C-D | 0,1181 ± 0,0071 |
| E-F | 0,1246 ± 0,0230 |
| G-H | 0,1139 ± 0,183 |
| I-J | 0,1144 ± 0,0374 |
| ANOVA | p-value = 0,953 |

3.2.2. Résultats pour la verveine odorante (*Aloysia citrodora* Palau)

Il est tout d'abord important de spécifier que toutes les plantes de la parcelle n'ont pas redémarré au printemps. Un grand nombre d'entre elles sont mortes, surtout dans la partie sud est dans la parcelle. Comme le montre la figure 17, du premier piquet de la station 1 au dernier piquet de la station 3, les rangs G, H et I contiennent seulement une soixantaine de plants alors qu'il y en a plus du double dans les rangs A, B et C. La mortalité reste faible dans les rangs du nord-ouest de la parcelle mais à partir du rang D elle commence à augmenter. Le rang J contient plus de plantes vivantes que les rangs de E à I.

Nombre de plants de verveine odorante vivants du premier piquet de la station 1 au dernier piquet de la station 3

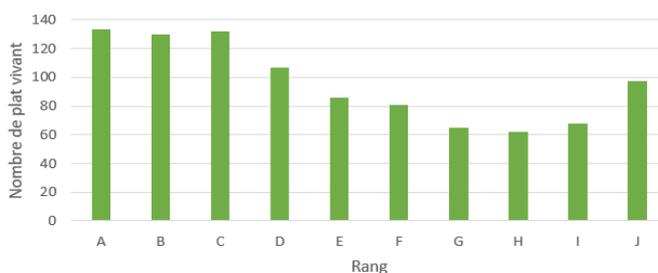


Figure 17 : Nombre de plants de verveine odorante vivants par rang dans la parcelle agroforestière

3.2.2.1. Le métabolisme primaire de la verveine odorante

Aucunes différences pour les stades de développement n'ont été remarquées pour la verveine entre les différentes modalités de la parcelle agroforestière.

Comme il est possible de le voir sur la figure 18, les cinétiques de croissance sont similaires en début de saison bien que les rangs E-F semblent avoir une croissance légèrement plus rapide. A partir de mai, les rangs E-F et G-H se différencient un peu plus du reste de la parcelle en ayant une meilleure croissance. Les plantes des rangs C-D et I-J ont une croissance assez similaire tout au long de la saison. La croissance des rangs A-B suit la même tendance que les rangs C-D et I-J, bien qu'elle soit légèrement plus faible, en début de saison. Début juin la croissance est ralentie pour les plantes des rangs AB, puis reprend mi-juin. Les courbes montent aussi que les plantes des rangs E-F et G-H ont une surface verticale plus grande celles des autres rangs. Les plantes les rangs A-B ont au contraire une surface verticale plus petite que les autres. Ceci est principalement dû au fait que les plantes du rang A soient moins grandes et larges que les autres.

La variation du microclimat au sein de la parcelle ne semble pas avoir d'effet sur la croissance des plantes. Comme le montre le tableau 14, il n'existe pas de corrélations entre les variables microclimatiques et la hauteur, la largeur et la surface verticale des plantes. Il y a seulement une corrélation entre la largeur des plantes et la luminosité mais aussi entre la température cumulée et la largeur des plantes au démarrage le 25/04/2022.

Cinétique de croissance de la verveine en fonction de la position des plantes dans la parcelle agroforestière

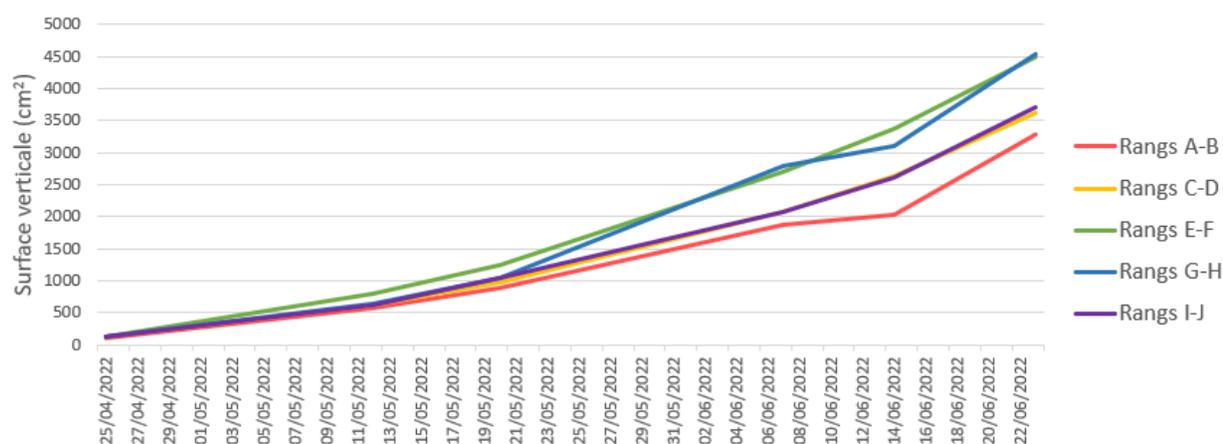


Figure 18 : Cinétique de croissance de la verveine odorante en fonction de la position des plantes dans la parcelle agroforestière

Tableau 14: Résultats des modèles linéaires et des modèles linéaires généralisés entre les variables microclimatique et la hauteur, la largeur et la surface verticale des plantes

| Date | Variable | Test | Température cumulée | Luminosité | Humidité du sol à 30 cm | Humidité du sol à 60 cm |
|------------|---|------|---------------------|------------|-------------------------|-------------------------|
| 25/04/2022 | Hauteur | GLM | 0,158 | 0,78 | NA | NA |
| | Largeur | GLM | 0,0224* | 0,0265* | NA | NA |
| | Largeur (température cumulée et luminosité) | GLM | | 0,470 | NA | NA |
| | Surface verticale | GLM | 0,617 | 0,376 | NA | NA |
| 20/05/2022 | Hauteur | GLM | 0,699 | 0,226 | 0,334 | 0,854 |
| | Largeur | LM | 0,266 | 0,75 | 0,306 | 0,362 |
| | Surface verticale | GLM | 0,292 | 0,789 | 0,3 | 0,657 |
| 23/06/2022 | Hauteur | LM | 0,992 | 0,335 | 0,49 | 0,674 |
| | Largeur | LM | 0,275 | 0,301 | 0,62 | 0,787 |
| | Surface verticale | GLM | 0,558 | 0,334 | 0,439 | 0,654 |

Il n'est pas possible d'analyser statistiquement les effets de la position (les rangs) sur la hauteur, la largeur et la surface verticale des plantes car il y a des effets d'interactions entre les blocs et les rangs. Il est cependant possible d'observer des tendances. Le tableau 15 expose les résultats obtenus pour ces variables. Au démarrage les différences entre les modalités sont plutôt faibles. Avec le temps, les plantes des rangs E-F semblent plus hautes que les autres. Cette tendance se confirme lors du dernier relevé avant la récolte. Les plantes des rangs A-B sont elles moins hautes et légèrement moins larges que les autres. Le dernier relevé montre aussi que les plantes des rangs G et H sont plus larges que les autres.

Tableau 15: Hauteur, largeur et surface verticale des plants de mélisse par rang à 3 dates différentes (au démarrage le 11/04/2022, avant la récolte le 07/06/2022 et entre les deux le 12/05/2022)

| Date | Rangs A-B | Rangs C-D | Rangs E-F | Rangs G-H | Rangs I-J |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Hauteur le 25/04/2022 | 7,23 ± 2,90 | 8,20 ± 1,97 | 9,00 ± 3,81 | 7,81 ± 5,09 | 8,83 ± 2,21 |
| Largeur le 25/04/2022 | 12,97 ± 2,98 | 14,23 ± 3,37 | 12,43 ± 4,34 | 10,26 ± 6,21 | 12,87 ± 3,17 |
| Surface verticale le 25/04/2022 | 96,67 ± 47,51 | 118,57 ± 46,83 | 123,83 ± 64,52 | 104,78 ± 73,78 | 116,27 ± 48,88 |
| Hauteur le 20/05/2022 | 30,27 ± 8,44 | 33,20 ± 6,13 | 39,13 ± 11,70 | 34,26 ± 15,07 | 34,53 ± 8,63 |
| Largeur le 20/05/2022 | 28,03 ± 6,12 | 29,13 ± 5,06 | 29,40 ± 9,83 | 26,56 ± 11,02 | 28,60 ± 7,27 |
| Surface verticale le 20/05/2022 | 889,87 ± 410,02 | 977,93 ± 289,10 | 1238,30 ± 657,42 | 1034,59 ± 662,67 | 1037,50 ± 511,32 |
| Hauteur le 23/06/2022 | 61,90 ± 15,11 | 67,17 ± 10,26 | 73,93 ± 19,23 | 69,88 ± 15,83 | 65,52 ± 17,57 |
| Largeur le 23/06/2022 | 50,70 ± 12,22 | 53,40 ± 9,07 | 57,83 ± 15,82 | 62,54 ± 15,22 | 53,48 ± 16,49 |
| Surface verticale le 23/06/2022 | 3279,77 ± 1450,62 | 3628,13 ± 1048,22 | 4488,37 ± 2129,84 | 4535,08 ± 1752,33 | 3706,31 ± 2038,30 |

Hauteur et largeur en cm
Surface verticale en cm²

Le rendement et le pourcentage de feuilles (tableau 16) ne sont pas significativement différents d'une modalité à l'autre. Cependant les plantes des rangs A-B ont un rendement plus faible que les autres. Au contraire, les plantes des rangs E-F et G-H ont, en moyenne, un rendement plus important bien que l'écart type pour les rangs G-H soit assez important.

Le pourcentage de feuilles est assez similaire entre les différentes modalités sauf pour les rangs A-B où il semble légèrement plus bas.

Le rendement en feuilles (Figure 19) n'est, lui non plus, pas significativement différent entre les rangs (ANOVA p-value = 0,276). Il est tout de même possible de remarquer que le rendement des rangs A-B est environ 2 fois inférieur à ceux des rangs C-D, E-F et G-H. L'écart type des rangs C-D, G-H et I-J est assez important.

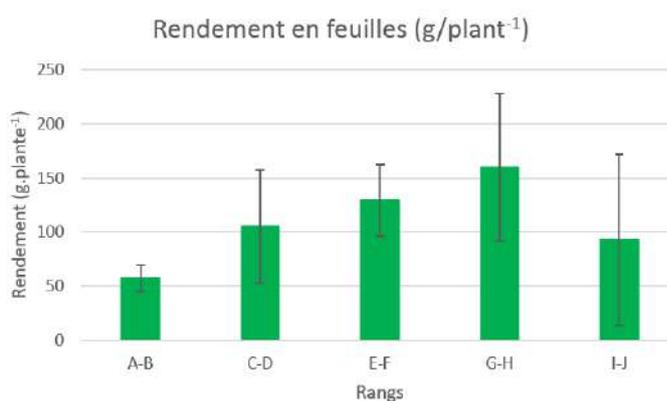


Figure 19 : Rendement en feuilles (g.plant⁻¹) de la verveine odorante en fonction des rangs

Tableau 16 : Rendement (g.plant⁻¹) et pourcentage de feuilles sur les plants chez la verveine odorante en fonction des rangs

| Rangs | A-B | C-D | E-F | G-H | I-J | p-value | Test |
|------------------------------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|---------|------------------------|
| Rendement (g.plant ⁻¹) | 120,00 ± 9,01 | 186,67 ± 92,91 | 223,19 ± 84,03 | 269,17 ± 120,92 | 159,72 ± 140,30 | 0,457 | ANOVA |
| Pourcentage de feuille (%) | 50,08 ± 14,50 | 57,24 ± 6,60 | 58,96 ± 5,80 | 59,93 ± 4,30 | 57,39 ± 3,95 | 0,8746 | Test de Kruskal-Wallis |

3.2.2.2. Le métabolisme secondaire de la verveine odorante

Il n'y a pas de différences significatives dans la teneur en COV de l'extrait des différentes modalités. Le tableau 17 montre la « puissance en composés volatils » de l'extrait, qui est une valeur représentant la teneur en COV, en fonction des rangs. Même si les différences ne sont pas significatives, l'extrait des rangs A-B semble contenir légèrement plus de COV que les autres.

La composition de l'extrait de verveine odorante mesurée (détail en annexe P) est globalement similaire. Seule la teneur en *cis*-Sabinène hydrate, α -Terpineol, Nerol et (E)-Nerolidol est significativement différente entre les modalités (tableau 18). L'extrait des plantes des rangs A-B

contient plus de *cis*-Sabinène hydrate et d' α -Terpineol que l'HE contenue dans les plantes des rangs C-D, E-F et G-H. L'HE des plantes des rangs E-F contient moins de Nerol que celle des plantes des rangs A-B. Enfin l'HE de la verveine odorante des rangs E-F et G-H contient moins de (E)-Nerolidol que celle des autres rangs.

Tableau 17 : Puissance en composés volatils de l'extrait de verveine odorante en fonction des rangs

| Rang | Puissance en composés volatils |
|-------|--------------------------------|
| A-B | 23,31 ± 5,83 |
| C-D | 17,73 ± 3,38 |
| E-F | 17,57 ± 0,72 |
| G-H | 15,53 ± 2,51 |
| I-J | 18,11 ± 2,87 |
| ANOVA | p-value = 0,159 |

Tableau 18 : Différences significatives entre les modalités dans la composition (%) de l'HE de verveine odorante

| Composants | A-B | C-D | E-F | G-H | I-J | p-value | Test |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|---------------------------------------|
| <i>cis</i> -Sabinène hydrate | 0,15 ± 0,011 a | 0,11 ± 0,021 b | 0,10 ± 0,020 b | 0,09 ± 0,01 b | 0,13 ± 0,023 ab | 0,00645** | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| α -Terpineol | 0,040 ± 0,035 a | 0,28 ± 0,035 b | 0,28 ± 0,021 b | 0,25 ± 0,02 b | 0,33 ± 0,045 ab | 0,00142** | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Nerol | 0,24 ± 0,04 a | 0,18 ± 0,031 ab | 0,14 ± 0,058 b | 0,16 ± 0,015 ab | 0,20 ± 0,021 ab | 0,0439* | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| (E)-Nerolidol | 0,30 ± 0,06 a | 0,22 ± 0,01 ab | 0,20 ± 0,006 bc | 0,18 ± 0,006 c | 0,22 ± 0,025 ab | 0,01716* | Test de Kruskal-Wallis + Test de Dunn |

4. Discussion

4.1. Les limites de l'échantillonnage

La première limite rencontrée pour la collecte des données est la localisation de la parcelle car celle-ci se trouve à 2h30 de route du lieu de travail. Avec les contraintes de temps et de budget, les déplacements vers la parcelle n'avaient lieu que toutes les deux semaines pour la notation des plantes et les relevés des données microclimatiques des boitiers. Il est donc possible d'avoir manqué le passage précis d'un stade phénologique à un autre. Si il y a eu des différences entre les stades phénologiques des plantes en fonction des rangs pendant moins de deux semaines, elles n'ont pas pu être observées. De plus, les problèmes techniques liés aux boitiers et aux capteurs n'ont pas pu être réglés rapidement. Il y a parfois eu des pertes de données de plus d'une semaine à cause de changements de dates et d'heures inexplicables des boitiers ou de plus d'un mois lorsqu'un boitier est tombé en panne. Le manque de temps sur place n'a pas permis de pouvoir analyser en détail les données collectées par les boitiers : si il y avait de petites erreurs comme l'arrêt de la prise de données pour un capteur pendant deux ou trois heures par exemple, le problème ne pouvait pas être réglé immédiatement. Il n'est donc pas rare que pour certaines mesures, les moyennes par rangs aient été réalisées à partir des données de deux boitiers au lieu de trois, ce qui entraîne de la perte de précision dans les résultats.

Le manque de temps a aussi limité le nombre de plantes suivies, 5 par station, et le nombre de stations. Les rangs ont donc été regroupés deux par deux pour gagner en précision dans l'analyse statistique. Il pourrait être pertinent d'augmenter le nombre de stations pour pouvoir analyser la croissance des plantes rang par rang. En effet, les plantes du rang A sont en générale plus petites que les autres. Cet effet est assez estompé par le regroupement avec les plantes du rang B.

Une autre limite est le fait que les parcelles se trouvent chez un producteur, qui lui aussi subit des contraintes qui peuvent l'empêcher de réaliser son itinéraire technique comme envisagé. Il était initialement prévu de comparer la verveine odorante de la parcelle en AF avec celle de la parcelle en monoculture. Cependant le producteur n'a pas eu le temps de désherber cette parcelle en début de saison ni d'irriguer la culture tout le long de la saison. L'itinéraire technique entre les deux parcelles étant donc très différent et la verveine odorante de la monoculture étant trop impactée par le manque d'eau, la comparaison manquait de sens et n'a donc pas été réalisée.

De plus, comme le précise la partie 3.2.2. beaucoup de plants de verveine odorante de la partie sud-est de la parcelle agroforestière sont morts et n'ont donc pas redémarré. Bien que les stations de mesures aient été positionnées au mieux, certaines d'entre elles ont des plants manquants surtout pour les rangs G et H du bloc 2, ce qui peut influencer la croissance et le développement des plantes vivantes restantes. Il est aussi possible que deux variétés de verveine soient mélangées dans la parcelle. Bien que le pépiniériste ait assuré à l'agriculteur que tous les plants étaient de la même variété, certaines plantes, aléatoirement présentes dans la parcelle, sont légèrement plus petites et beaucoup plus ramifiées que les autres.

Le nombre de capteurs limite aussi la précision des mesures à l'échelle de la parcelle. Le positionnement des capteurs de luminosité et d'humidité dans le sol ne permettent pas de caractériser toute la station. En effet, il se trouve plutôt vers la fin des stations et il est possible que ces paramètres changent le long de la station. Par exemple, il se peut qu'au début des stations du rang A il y ait moins d'eau dans le sol car l'arbre est très proche des cultures à cet endroit et l'environnement lumineux n'est pas non plus exactement le même.

Enfin, par manque d'espace et de temps, les échantillons relevés pour le rendement (sur 1 m linéaire pour la mélisse officinale et 4 plantes successives pour la verveine) ne sont peut-être pas suffisants pour pouvoir caractériser l'ensemble de la station.

4.2. Les limites de la méthode

Le matériel de mesure de l'hygrométrie et de la température n'est peut-être pas idéal. En effet, le premier boîtier dans lequel était présent le capteur ne laissait pas suffisamment passer l'air. Les mesures de température n'étaient donc pas très fidèles à la réalité. Un deuxième dispositif sous forme de toit a été installé mais il est possible qu'il ait légèrement fait de l'ombre au capteur de luminosité en fin de matinée quelques semaines (le capteur ne pouvant pas être placé plus bas à cause de la hauteur des plantes). Il aurait fallu placer le capteur de luminosité autrement de façon qu'il ne soit ni gêné par les plantes, ni gêné par le toit.

La mesure de l'humidité dans le sol a été réalisée grâce à des sondes tentiométriques, qui ont l'avantage de pouvoir réaliser des mesures de manière continue mais qui ne permettent pas de mesurer l'état hydrique de la plante. Pour avoir des résultats plus solides un plus grand nombre de capteurs aurait pu être installé mais le budget n'était pas suffisant. Une autre méthode de mesure comme la mesure du potentiel hydrique du sol et de la plante grâce à une chambre à pression aurait pu être utilisée. Elle est plus précise mais plus coûteuse et plus contraignante.

D'autres méthodes pour caractériser la croissance des plantes auraient pu être utilisées, comme par exemple la mesure de la masse des plantes au fil du temps, mais ces méthodes sont destructives. Les parcelles en AF étant destinées à la production et pas uniquement à l'expérimentation, il n'était pas possible d'y avoir recours.

Il pourrait aussi être possible de mesurer la température à la surface des plantes pour pouvoir observer l'effet de l'ombrage sur la température des plantes et son impact.

4.3. Les limites de l'approche

Tout d'abord, étudier un système agroforestier est assez compliqué, un nombre important de facteurs pouvant entrer en compte. De plus, suivre autant de variables en même temps est assez compliqué, la caractérisation de celle-ci se fait donc plus de manière globale et moins de manière précise.

Pour voir au mieux l'effet des arbres, les stations ont été positionnées de manière à se trouver au plus proche d'eux et dans leur ombre, mais cela ne représente pas l'ensemble de la parcelle agroforestière. Il aurait aussi été intéressant de pouvoir avoir un regard plus global sur la parcelle.

Il aurait aussi pu être pertinent de réaliser des analyses de sol pour pouvoir expliquer certaines différences entre les plantes et pour pouvoir observer au mieux les effets de compétition/facilitation pour les nutriments du sol entre les arbres et la culture.

Enfin, il aurait pu être intéressant de pouvoir comparer les résultats des PPAM en AF avec une parcelle témoin en monoculture. Cela devait être le cas pour la verveine odorante mais il y a eu trop de différences dans les itinéraires techniques des deux parcelles (manque d'irrigation et de désherbage pour la parcelle témoin).

4.4. Discussion et interprétation des résultats

4.4.1. Discussion et interprétation des données microclimatiques

Les résultats obtenus pour les variables climatiques sont à prendre avec du recul. En effet, de nombreux problèmes techniques sont survenus au cours de l'utilisation des boîtiers et des données ont été perdues. Pour certaines mesures il n'y a donc que les résultats de deux boîtiers par rang sur trois.

4.4.1.1. La luminosité dans la parcelle agroforestière

La perte de luminosité dans la parcelle agroforestière par rapport à la parcelle témoin est assez faible : environ 16.62%. Cette valeur est aussi assez faible par rapport aux mesures effectuées par INURRETA-AGUIRRE *et al.* (2018), MANTINO *et al.* (2021) et ZHAO *et al.* (2003). Cependant les oliviers de la parcelle sont bien plus petits que les peupliers de l'étude d'INURRETA-AGUIRRE *et al.* (2018) et les oliviers sont plus espacés que dans les études de MANTINO *et al.* (2021) et ZHAO *et al.* (2003). De plus l'orientation des rangées d'arbres n'est pas tout à fait la même, ce qui explique aussi cette différence. L'orientation des rangées explique la courbe de luminosité. Comme le montre l'annexe Q, les arbres de la rangée de la partie sud-est de la parcelle font de l'ombre aux cultures le matin et ceux de la partie nord-ouest font de l'ombre le soir. N'étant pas assez grands, les arbres au sud-est de la parcelle ne font pas d'ombre aux cultures des rangs du nord-ouest de la parcelle. C'est pour cela que la luminosité en matinée n'est pas différente dans le nord-ouest que dans la parcelle en monoculture. Le milieu de la parcelle est lui aussi peu impacté en matinée. L'ombre portée par les arbres à cet endroit le matin n'est pas très intense car le rang E reste assez loin des arbres et que le feuillage des oliviers n'est pas très dense. L'ombre sur le rang I est plus forte, due à la proximité avec les arbres. L'ombre des arbres au nord-ouest n'est pas assez grande pour atteindre le rang I en fin de soirée. C'est pour cela qu'après 14 h la courbe de la luminosité du rang I est semblable à celle de la parcelle en monoculture. L'ombre des arbres du nord ouest arrive à atteindre tout de même le rang E en fin de soirée, car il est légèrement plus proche des arbres du nord-ouest que des arbres du sud ouest. Lors de journée nuageuse le rayonnement est diffus (ARTRU, 2017), c'est pour cela que le rayonnement est semblable dans toutes les modalités.

L'ombre du matin dure plus longtemps que l'ombre du soir. De ce fait, il est normal que les plantes du rang I aient moins de lumière disponible que les plantes situées au nord-ouest et au milieu de la parcelle. Comme dans les autres études menées sur l'ombrage (AGUIRRE *et al.*, 2018, MANTINO *et al.*, 2021 et ZHAO *et al.*, 2003), ce sont les plantes les plus éloignées des arbres (rangs E) qui bénéficient de plus de lumière disponible.

Les écarts types plus importants de début juin à début juillet au milieu de la parcelle s'expliquent par le fait qu'un des boîtiers de ce rang ne fonctionnait pas. Enfin, les écarts types plus importants tout au long de la période de mesure dans le rang I par rapports aux autres sont sûrement liés au fait que ce soit eux qui soient le plus impactés par l'ombre des arbres et donc les plus impactés par la forme et la densité des arbres qui est assez variable d'un arbre à un autre.

4.4.1.2. La température dans la parcelle agroforestière

Contrairement à ce qui était attendu, l'agroforesterie n'a pas eu beaucoup d'impact sur les températures. La température moyenne par jour (24h) ne varie pas beaucoup entre la parcelle agroforestière et la parcelle sans arbre. La température en journée (entre le levé et le couché du soleil) non plus n'est pas très différente entre les deux parcelles mais aussi entre les différentes modalités à l'intérieur de la parcelle agroforestière. En effet, pour chaque période de 15 jours, ces différences ne dépassent pas les 1°C et ne sont significatives que pour le début du mois d'avril et la fin du mois d'août. Ces résultats sont différents de ceux observés par INURRETA-AGUIRRE *et al.* (2018) et GOSME *et al.* (2016). Dans leurs études, les arbres permettaient de réduire la température pendant la journée respectivement de 1,13 à 1,72°C de janvier à début juin (allant jusqu'à 6°C pour les jours particulièrement chauds), et de 1,2°C d'avril à début juin. KARKI et GOODMAN (2013) ont quant à eux étudié la température pour chaque mois dans un système sylvo-pastoral. Ils ont aussi trouvé des différences significatives, la parcelle sans arbre étant plus chaude, parfois de plus de 3°C lors des mois les plus chauds. Les résultats dans la parcelle de verveine odorante en juin, juillet et août où les températures dépassaient très souvent les 30°C dans l'après midi, ne sont pas aussi marqués. En étudiant des périodes plus longues comme les auteurs précédents, des différences plus importantes auraient pu être retrouvées. Les résultats n'ont montré qu'une différence fin août entre la partie nord-est, et la partie sud-est, où il faisait seulement 0,12°C plus froid. Ce manque de différence s'explique sûrement par l'ombrage qui n'était pas très important dans la parcelle. De plus, il n'était pas présent aux heures où le rayonnement est

le plus important. L'effet brise vent des arbres a aussi pu contribuer à contrebalancer la perte de chaleur qui aurait pu être engendrée par l'ombre (KARKI et GOODMAN, 2013).

Début avril, il fait légèrement plus chaud dans la partie nord ouest de la parcelle que dans la partie sud-est. Cela semble normal car l'ombre apportée par les arbres du sud-est empêche les rayonnements du soleil de réchauffer l'air. Cependant ces températures sont aussi plus chaudes que celles mesurées dans la parcelle en monoculture. Comme expliqué précédemment, cet effet peut être dû à l'effet brise vent des arbres couplé à l'ombrage plutôt faible dans cette partie de la parcelle (KARKI et GOODMAN, 2013).

Pendant certaines périodes les températures pendant la nuit sont étonnamment légèrement plus hautes dans la parcelle en monoculture que dans la parcelle en AF. Cela est contraire aux résultats retrouvés dans la littérature, où l'AF permet d'augmenter les températures ou n'a pas d'effet sur la température la nuit (GOSME *et al.*, 2016 ; SANCHEZ *et al.*, 2009 ; KARKI et GOODMAN, 2013 et INURRETA-AGUIRRE *et al.*, 2018). Les différences de température entre les deux parcelles sont cependant très faibles, même si elles sont statistiquement différentes en avril, début mai et en juillet. Il est possible que les arbres coupent le vent chaud qui réchauffe l'air pendant la nuit.

4.4.1.3. L'humidité dans la parcelle agroforestière

Pour cette mesure, il y a seulement eu des différences significatives en juillet entre les parcelles avec et sans arbres, bien que l'air de la parcelle en AF semble être légèrement plus humide. Cela paraît cohérent car grâce à leur ombre et leur action coupe vent, les arbres contribuent à limiter le taux d'élimination de la vapeur d'eau (KANZLER *et al.*, 2019 ; CAMPI *et al.*, 2009 ; KARVATTE *et al.*, 2016). L'humidité relative était près de 2% supérieure en juillet, ce qui coïncide avec les résultats de CAMPI *et al.* (2009) qui ont trouvé une humidité relative juste derrière une haie brise-vent 3% supérieure à celle 12 m plus loin. Le mois de juillet était en moyenne 2°C plus chaud que les mois de juin et d'août, ce qui a peut-être contribué à une transpiration plus importante des plantes et donc à augmenter l'humidité dans l'air de la parcelle en AF. L'air de parcelle en monoculture est peut-être aussi moins humide à cause du manque d'irrigation.

Aucune différence significative pour l'humidité du sol, à 30 et 60 cm, entre les différentes modalités de la parcelle en AF n'a été observée à part pour le rang I où le sol à 30 cm est plus sec fin juin. L'absence de différences significatives et les écarts types très importants des différentes mesures sont sûrement dus au fait que les sondes mesurent la tension du sol à un endroit très précis. Cela n'est pas représentatif de toute la station. De plus, la position des capteurs en fonction de celle du dispositif d'irrigation peut jouer un rôle important. Il est possible qu'une partie de la parcelle où se trouve un capteur soit assez loin des asperseurs et reçoit donc moins d'eau qu'une autre partie (où se trouve un autre capteur) de la parcelle où l'irrigation est plus efficace. Cela a pu contribuer à augmenter les écarts types des résultats d'un même rang.

De manière générale, il est tout de même possible de remarquer que l'humidité du sol au milieu de la parcelle (à 30 et à 60 cm) est légèrement plus élevée que celle des rangs près des arbres. Cela peut être dû à la compétition. Bien que les oliviers, par rapport à d'autres arbres, n'aient pas de besoins importants en eau (Chambre Régionale d'Agriculture Provence Alpes Côte d'Azur, 2014), ils peuvent entrer en compétition avec les cultures et donc diminuer la quantité d'eau dans le sol. En effet, dans des systèmes irrigués la majorité de leurs racines semble se trouver autour de 60 cm de profondeur (Fernández *et al.*, 1991). Les trop grandes différences entre les mesures sur un même rang empêchent de voir si l'ombre a eu un impact positif sur la quantité d'eau dans le sol.

Pour conclure sur les variables climatiques, les résultats obtenus montrent que dans le SAF étudié les oliviers n'ont pas un grand impact sur les variables microclimatiques. Leur ombre ne permet pas d'abaisser de manière significative les températures en été. Cela est explicable par petite taille des oliviers et leur espacement assez important.

4.4.2. Discussion et interprétation des résultats obtenus sur la performance agronomique des PPAM

4.4.2.1. Performance agronomique de la mélisse officinale

Les arbres ne semblent pas avoir eu d'impact sur le développement de la mélisse mais les différences ont pu être gommées par la fréquence des relevés.

Au redémarrage des plantes, le 11/05/2022 il n'y a pas beaucoup de différences entre les différentes modalités de la parcelle. Seules les plantes des rangs G-H sont légèrement plus petites que les autres et les plantes des rangs E-F plus larges. Les différences se voient peu car les plantes viennent juste de redémarrer. Pour la date intermédiaire, la largeur n'est pas impactée par sa position dans la parcelle. Cependant, l'ombre des arbres semble avoir un effet sur la hauteur des plantes des rangs E-F, G-H, et I-J qui est plus importante que celles des rangs A-B et C-D. Juste avant la récolte, la hauteur, la largeur et la surface verticale sont supérieures pour les rangs du milieu et de la partie sud-est de la parcelle. Il est alors possible que l'ombre des arbres, qui n'a pas pu être quantifiée dans cette parcelle, ait eu un effet positif sur la croissance des plantes. En effet, cette parcelle n'est pas irriguée : les effets de facilitation, et notamment celui de l'ombrage ont pu protéger les plants de mélisse officinale de la sécheresse. Dans leur étude ZUMBAY *et al.* (2021) ont aussi observé ce résultat. Il est aussi possible que les plantes des rangs G-H et I-J soient plus hautes et larges car elles auraient peut-être bénéficié des embruns d'irrigation de la parcelle située à côté.

Les écarts types de la hauteur, la largeur et la surface verticale, plus importants pour les rangs A-B et I-J sont causés par le fait que les plantes qui se trouvent le plus proche des arbres subissent des effets de compétitions plus forts et donc sont plus petites que les autres.

Même si la surface verticale est plus petite pour les rangs A-B et C-D, le rendement en biomasse n'est pas affecté par la position des plantes dans la parcelle comme dans l'étude de MOSQUERA-LOSADA *et al.* (2018 a). Cependant, il suit les mêmes tendances que celle des variables de croissance : le rendement semble plus haut pour les plantes à partir des rangs E-F, ces derniers obtenant le meilleur rendement. Récolter les plantes sur seulement 1 mètre linéaire n'est peut-être pas assez représentatif de toute la station et donc insuffisant pour observer des différences significatives.

Contrairement à ZUMBAY *et al.* (2021), qui avaient observé que les arbres diminuaient la teneur en HE dans les plantes, la position de la mélisse dans la parcelle n'a aussi eu aucun effet significatif sur la teneur en HE de la mélisse officinale. La composition globale de l'HE ne varie pas en fonction des rangs. Seul le sabinène n'est présent que chez les plantes des rangs A-B et C-D. Cela peut être expliqué par le fait que la production de sabinène est augmentée lorsque la plante subit un léger stress (NIK *et al.*, 2013). Les plantes de la partie nord-ouest se trouvant moins à l'ombre et proche des arbres, devaient être plus stressées que les autres. Il est tout de même possible que le sabinène n'est pas été détecté dans les plantes des rangs E-F, G-H et I-J car le seuil de détection ne permet pas d'observer l'élément lorsque les concentrations sont très faibles. L'acide rosmarinique, normalement impacté par l'ombrage (MORADKHANI *et al.*, 2010) n'a pas pu être quantifié par contrainte de budget.

Les arbres ont donc eu un effet plutôt bénéfique sur les plants de mélisse officinale qui semblent avoir produit plus de biomasse. La teneur en HE n'a quant à elle pas été impactée et sa composition n'a globalement pas changé, à part pour le sabinène.

4.4.2.2. Performance agronomique de la verveine odorante

Le premier impact de l'agroforesterie sur la verveine se trouve dans la mortalité des plantes. En effet pendant l'hiver, l'ombre des arbres a dû empêcher le rayonnement du soleil de réchauffer et dégeler rapidement les plants le matin. La verveine odorante étant une plante gélive (ARGYROPOULOU *et al.*, 2010), près de la moitié des plantes des rangs G, H et I n'a pas survécu. L'effet protecteur de la canopée des arbres a permis de limiter la mortalité sur le rang le plus proche (J), mais elle reste tout de même élevée (25%). Les rangs D, E et F ont été moins impactés, car moins à l'ombre, mais ils ont tout de même perdu près de 20% des plantes.

Comme pour la mélisse, l'AF ne semble pas avoir eu d'impact sur le développement de la verveine, mais les relevés effectués toutes les deux semaines n'ont pas permis d'observer si il y avait un décalage de moins de quinze jours.

Les variables microclimatiques (somme des températures, luminosité, et humidité du sol) n'ont pas permis d'expliquer les variables représentant la croissance des plantes. Ceci peut être justifié par le fait qu'il n'y a quasiment pas eu de variations microclimatiques dans la parcelle. La largeur des plantes au démarrage seulement, pourrait être expliquée par la température cumulée ou par la luminosité mais les modèles ne sont pas précis ni vraiment représentatifs. Cet effet significatif peut être dû au hasard. En effet, à cette date les différences de températures cumulées étaient d'un degré à peine. De plus, les études ne précisent pas spécifiquement les effets de la luminosité sur la largeur des plantes.

Il n'a pas été possible d'expliquer statistiquement la hauteur, la largeur et la surface verticale des plantes car il y avait des effets d'interaction entre le bloc et les rangs. Il est tout de même possible d'observer des tendances semblables à celles de la mélisse officinale (figure 20).

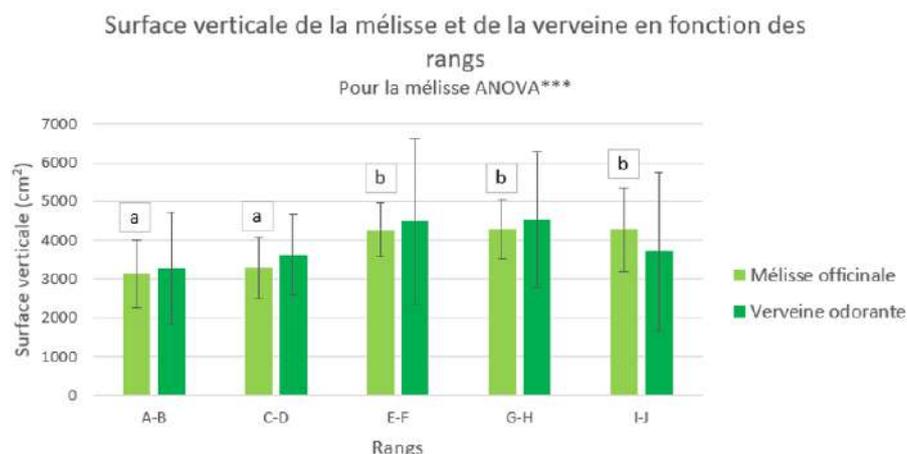


Figure 20 : Surface verticale de la mélisse officinale et de la verveine odorante avant la récolte en fonction des rangs

Comme pour la mélisse officinale, les différences de croissance de la verveine en début de saison sont très faibles mais avec le temps, il est possible d'observer trois groupes. Les plantes des rangs A-B semblent plus petites et légèrement moins larges que les autres. Cet effet est principalement dû au fait que les plantes les plus proches des arbres soient plus petites à cause de la compétition avec les arbres. Il est aussi possible que, les plantes entrent plus en compétition entre elles car elles sont plus nombreuses sur le rang. Les plantes des rangs E-F et G-H sont assez similaires et plus hautes et larges que les autres. Les rangs E-F étant moins proches des arbres, ils subissent moins la compétition. Les plantes des rangs G-H se trouvent assez loin des arbres et sont parfois moins nombreuses dans la station. Cela explique le fait qu'elles semblent un peu plus hautes mais surtout plus larges que les autres.

Le rendement n'est pas significativement impacté par la position des plantes dans la parcelle. Cela peut être dû aux écarts types assez importants au sein des modalités G-H et I-J. Les écarts types des rangs I-J sont principalement affectés par le fait que les plantes soient plus petites près des arbres et plus grandes dans le reste de la station. La mortalité importante dans les stations du bloc 2 dans les rangs G-H explique ces grands écarts types. En effet, les plantes se retrouvent parfois assez isolées et ont donc plus de place pour se

développer et subissent moins de compétition. Elles sont alors plus hautes et larges que d'autres plus nombreuses dans la station.

La composition de l'extrait était aussi globalement la même entre les différentes modalités mais il y a tout de même quelques différences. Les concentrations en cis-Sabinène hydrate étaient plus fortes dans les rangs les plus proches des arbres (A-B et I-J), ce qui peut être dû à la compétition, qui engendrant un stress, augmente ainsi la production de cette molécule (NIK *et al.*, 2013 ; RADWAN *et al.*, 2017). Le nérol est quant à lui plus présent chez les rangs A-B et moins présent dans les rangs E-F. L'inverse aurait dû être observé car le stress des plantes diminue normalement la production de cette molécule (JORDAN *et al.*, 2017). La quantité de terpinéol est plus importante dans les plantes des rangs A-B que dans celles des autres rangs. Ceci paraît aussi logique étant donné que cette molécule est produite en plus grande quantité lorsque la plante est stressée (RADWAN *et al.*, 2017).

La verveine odorante ne semble pas être une bonne candidate dans un SAF où l'orientation des rangées d'arbres ne permet pas aux plantes de bénéficier de la lumière matinale qui permet le dégel des cultures. La mortalité des plantes réduit la solidité des résultats obtenus. Il semble tout de même que les plantes les plus à l'ombre aient été avantagées par cette dernière dans la production de biomasse. La composition des extraits est légèrement différente, les plantes les plus stressées ont produit plus de sabinène et de terpinéol que les autres mais moins de nérol.

Conclusion

Les SAF sont connus pour être des systèmes de cultures résilients. Ils pourraient être une solution pour limiter l'impact du changement climatique sur la production de PPAM dans le sud-ouest de la France. Cependant, les interactions entre les arbres et les cultures : facilitation et compétition dépendent d'un grand nombre de facteurs comme le climat, la nature des cultures et des arbres, les pratiques culturales (dont l'orientation des rangées) etc. Il semble cependant que lorsque les conditions sont difficiles (sécheresse, forte chaleur), les effets des arbres soient bénéfiques sur la culture, notamment en réduisant le stress hydrique de celle-ci.

Sans études préalables sur le sujet, il est difficile de pouvoir prédire les performances agronomiques des PPAM en agroforesterie méditerranéenne. Le projet PPAM a pour but de pallier ce manque de connaissance en initiant des recherches sur les SAF avec des PPAM, afin d'en valider la pertinence. Dans le SAF étudié, les arbres n'ont pas eu beaucoup d'impact sur le microclimat de la parcelle. La luminosité a été faiblement réduite (30,9 % pour les plantes les plus à l'ombre). Les différences de températures entre la parcelle en AF et la parcelle en monoculture, et au sein de la parcelle agroforestière ne sont pas souvent significatives et toujours inférieures à 1°C. Il est tout de même possible d'observer une tendance selon laquelle dans la partie la plus à l'ombre il fait généralement légèrement plus frais. L'humidité du sol, semble être un peu plus élevée au milieu de la parcelle, bien que non significativement différente des autres modalités. Du fait de l'irrigation, les effets sur le stress hydrique des cultures n'ont pas pu être observés. Enfin l'humidité relative de l'air semble être légèrement plus élevée dans la parcelle en AF même les différences ne sont pas significativement différentes. Ces faibles effets sont sûrement expliqués par la petite taille des arbres et leur espacement assez important.

Pour les deux PPAM étudiées, les arbres n'ont pas eu d'impact sur le développement. Pour la culture de mélisse l'ombre des arbres a eu un impact positif sur la production de biomasse. La production d'HE n'a globalement pas été impactée par les arbres. Seule la production de sabinène a été réduite pour les plantes au milieu de la parcelle et pour les plantes se trouvant à l'ombre car, à ces endroits, la culture était moins stressée. La verveine ne semble pas être une bonne candidate pour les SAF où il y a de l'ombre sur les cultures le matin car elle empêche le dégel rapide des plantes. En effet, comme la verveine odorante est sensible au gel, une grande mortalité a été observée dans la partie sud-est de la parcelle. Les faibles variations du microclimat n'ont eu aucun effet sur la croissance de la verveine odorante. Cependant, pendant la croissance, l'ombre semble avoir eu le même effet que pour la mélisse. La composition de l'extrait de verveine odorante n'a pas été très impactée par les arbres, seule la quantité de sabinène et de terpineol est plus élevée dans les plantes les plus proches des arbres et les plus au soleil. L'effet inverse est observé pour le nérol.

Une suite à ce projet pourrait être imaginée pour caractériser au mieux l'impact des variations du microclimat, et notamment de l'ombrage, sur les PPAM. Les caractéristiques de croissance, de développement et la production de métabolites secondaires en fonction de différents ombrages pourraient être déterminées de manière plus précise et scientifique. Des ombrages plus ou moins intenses, présents à différentes heures de la journée pourraient être testés. L'effet sur le stress hydrique des cultures pourrait aussi être étudié de manière très détaillée. Les plantes analysées pourraient être plus nombreuses, contenant différents métabolites secondaires, et choisies en fonction des parties de la plantes utilisées : racines, fleurs, biomasse aérienne et du type de plantes : plantes pérennes ou annuelles. Une plus grande diversité de SAF pourrait être étudiée, avec des espèces d'arbres différentes (arbres plus imposants que des oliviers). A la suite de cette étude, des connaissances. Ainsi, la pertinence de ces systèmes pour lutter contre le stress hydrique pourrait être confirmée pour certaines plantes. Des indicateurs de suivi de cultures et des outils d'aide à la décision pour guider les producteurs dans leur choix de SAF avec PPAM pourraient être créés.

Liste des références bibliographiques

- Agreste** 2021. Les plantes à parfum, aromatiques et médicinales en Provence-Alpes-Côte d'Azur : des surfaces et des exploitations en hausse rapide entre 2010 et 2020. Agreste PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR |ÉTUDES| [en ligne]. N° 123. Date de consultation : 21/04/2022. Disponible sur : <https://draaf.paca.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/RA2020-Etude123-PACA_cle072bb1.pdf>.
- AGRIDEA**, 2020. Alignement des rangées d'arbres. *In* : Agroforesterie [en ligne]. Date de consultation : 28/05/2022. Disponible sur : <<https://www.agroforesterie.ch/informations-pour-la-pratique/29399-2/>>.
- AGROOF SCOP**, 2021. Agroforesterie et projet R&D: PPAM PPAM. *In* : AGROOF SCOP [en ligne]. Date de consultation : 28/03/2022. Disponible sur : <<https://agroof.net/recherche/fichesR&D/ppamppam.html>>.
- AMITRANO, C., ARENA, C., ROUPHAEL, Y., DE PASCALE, S., ET DE MICCO, V.**, 2019. Vapour pressure deficit: The hidden driver behind plant morphofunctional traits in controlled environments. *Annals of Applied Biology*, volume 175, n° 3. p. 313-325.
- ARENAS-CORRALIZA, M.G., LÓPEZ-DÍAZ, M.L., MORENO, G.**, 2018. Winter cereal production in a Mediterranean silvoarable walnut system in the face of climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, volume 264. p. 111-118.
- ARENAS-CORRALIZA, M.G., ROLO, V., LÓPEZ-DÍAZ, M.L., ET MORENO, G.**, 2019. Wheat and barley can increase grain yield in shade through acclimation of physiological and morphological traits in Mediterranean conditions. *Scientific Reports*, volume 9, n° 1. p. 9547.
- ARGYROPOULOU, C., AKOUMIANAKI-IOANNIDOU, A., CHRISTODOULAKIS, N.S., FASSEAS, C.**, 2010. Leaf anatomy and histochemistry of *Lippia citriodora* (Verbenaceae). *Australian Journal of Botany*, volume 58, n° 5. p. 398.
- ARGYROPOULOU, C., DAFERERA, D., TARANTILIS, P.A., FASSEAS, C., POLISSIOU, M.**, 2007. Chemical composition of the essential oil from leaves of *Lippia citriodora* H.B.K. (Verbenaceae) at two developmental stages. *Biochemical Systematics and Ecology*, volume 35, n° 12. p. 831-837.
- ARTRU, S.**, 2017. Impact of spatio-temporal shade on crop growth and productivity, perspectives for temperate agroforestry. Thèse de doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique : Université de Liège – Gembloux Agro-bio tech. 169p.
- ARTRU, S., GARRE, S., DUPRAZ, C., HIEL, M.-P., BLITZ-FRAYRET, C., LASSOIS, L.**, 2017. Impact of spatio-temporal shade dynamics on wheat growth and yield, perspectives for temperate agroforestry. *European Journal of Agronomy*, volume 82. p. 60-70.
- BALDY, C., DUPRAZ, C., ET SCHILIZZI, S.**, 1993. Vers de nouvelles agroforesteries en climat tempérés et méditerranéens I. Aspects agronomiques. *Cahiers d'agriculture*, volume 2. p. 375-386.
- BARROSO, M., ARROBAS, M., RODRIGUES, M., SOUSA, M.**, 2014. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium and boron fertilizers on essential oils yield in Lemon verbena (*Aloysia triphylla*). *In*: DIAS, A., SILVA, P. (Eds.). 62nd International Congress and Annual Meeting of the Society for Medicinal Plant and Natural Product research – GA2014. 31 aout – 4 septembre Guimaraes (Portugal) p. 351
- BATISH, D.R., SINGH, H.P., KOHLI, R.K.**, 2007. Allelopathic Tree–Crop Interactions under Agroforestry Systems. *In*: BATISH, D.R., KOHLI, R.K., JOSE, S., SINGH, H.P. (Eds). *Ecological Basis of Agroforestry*. CRC Press. p. 3-14. ISBN 978-1-4200-4336-5.
- BATTIE-LACLAU, P., TASCHEN, E., PLASSARD, C., DEZETTE, D., ABADIE, J., ARNAL, D., BENEZECH, P., DUTHOIT, M., PABLO, A.-L., JOURDAN, C., LACLAU, J.-P., BERTRAND, I., TAUDIERE, A.**

- HINSINGER, P.**, 2020. Role of trees and herbaceous vegetation beneath trees in maintaining arbuscular mycorrhizal communities in temperate alley cropping systems. *Plant and Soil*, volume 453, n° 1. p. 153-171.
- BAYALA, J., PRIETO, I.**, 2020. Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems. *Plant and Soil*, volume 453, n° 1. p. 17-28.
- BLANCHET, G.**, 2021. La résilience des systèmes agroforestiers face au changement climatique: analyse de la réponse de cultures annuelles face à la sécheresse dans un système à base de noyer sous climat méditerranéen. Thèse de doctorat en Écologie Fonctionnelle et Sciences Agronomiques : MONTPELLIER SUPAGRO. 263p.
- BÖHM, C., KANZLER, M., FREESE, D.**, 2014. Wind speed reductions as influenced by woody hedgerows grown for biomass in short rotation alley cropping systems in Germany. *Agroforestry Systems*, volume 88, n° 4. p. 579-591.
- BRANDLE, J.R., HODGES, L., ZHOU, X.H.**, 2004. Windbreaks in North American Agricultural Systems. *Agroforestry Systems*, volume 61. p. 65-78.
- CAMPI, P., PALUMBO, A.D., MASTRORILLI, M.**, 2009. Effects of tree windbreak on microclimate and wheat productivity in a Mediterranean environment. *European Journal of Agronomy*, volume 30, n° 3. p. 220-227.
- CANNELL, M.G.R., VAN NOORDWIJK, M., ONG, C.K.**, 1996. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire. *Agroforestry Systems*, volume 34, n° 1. p. 27-31.
- Chambre Régionale d'Agriculture Provence Alpes Côte d'Azur**, 2014. Référentiel des besoins en eau d'irrigation des productions agricoles de Provence-Alpes-Côte d'Azur. 141p. Date de consultation : 01/10/2022. Disponible sur : <https://paca.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Provence-Alpes-Cote_d_Azur/referentiel_des_besoins_en_eau_d_irrigation_en_paca_2014.pdf>.
- CHIRKO, C.P., GOLD, M.A., NGUYEN, PHU.V., JIANG, J.P.**, 1996. Influence of orientation on wheat yield and photosynthetic photon flux density (Qp) at the tree and crop interface in a Paulownia—wheat intercropping system. *Forest Ecology and Management*, volume 89, n° 1. p. 149-156.
- CLEUGH, H.A.**, 1998. Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems*, volume 41. p. 55-84.
- CRAINE, J.M., DYBZINSKI, R.**, 2013. Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light (D Robinson, Ed.). *Functional Ecology*, volume 27, n° 4. p. 833-840.
- CUBERA, E., MORENO, G.**, 2007. Effect of single *Quercus ilex* trees upon spatial and seasonal changes in soil water content in dehesas of central western Spain. *Annals of Forest Science*, volume 64, n° 3. p. 355-364.
- DAGAR, J.C.**, 2016. Agroforestry: Four decades of research development. *Indian Journal of Agroforestry*, volume 18, n° 2. p. 1-32.
- DAVID, T.S., GASH, J.H.C., VALENTE, F., PEREIRA, J.S., FERREIRA, M.I., DAVID, J.S.**, 2006. Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrological Processes*, volume 20, n° 13. p. 2713-2726.
- DEN HERDER, M., MORENO, G., MOSQUERA-LOSADA, R.M., PALMA, J.H.N., SIDIROPOULOU, A., SANTIAGO FREIJANES, J.J., CROUS-DURAN, J., PAULO, J.A., TOMÉ, M., PANTERA, A., PAPANASTASIS, V.P., MANTZANAS, K., PACHANA, P., PAPADOPOULOS, A., PLIENINGER, T., BURGESS, P.J.**, 2017. Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, volume 241. p. 121-132.

DRAAF Occitanie, 2019 a. Le plan de filière PPAM (2017). *In* : Direction Régionale de l'Alimentation de l'Agriculture et de la forêt [en ligne]. Date de consultation : 21/04/2022. Disponible sur : <<https://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr/Le-plan-filiere-PPAM>>.

DRAAF Occitanie, 2019 b. Plantes à parfum, aromatiques et médicinales en Occitanie en 2018 - Premiers résultats - Octobre 2019 [en ligne]. Date de consultation : 14/04/2022. Disponible sur : <<https://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr/Plantes-a-parfum-aromatiques-et,5082>>.

DUFOUR, L., METAY, A., TALBOT, G., DUPRAZ, C., 2013. Assessing Light Competition for Cereal Production in Temperate Agroforestry Systems using Experimentation and Crop Modelling. *Journal of Agronomy and Crop Science*, volume 199, n° 3. p. 217-227.

DUPRAZ, C., BLITZ-FRAYRET, C., LECOMTE, I., MOLTO, Q., REYES, F., ET GOSME, M., 2018. Influence of latitude on the light availability for intercrops in an agroforestry alley-cropping system. *Agroforestry Systems*, volume 92. p. 1019-1033.

DUPRAZ, C., LIAGRE, F., 2011. *Agroforesterie Des arbres et des cultures*, 2^e édition. France : Edition France Agricole. 432p. ISBN : 978-2-85557-205-5.

EICHHORN, M.P., PARIS, P., HERZOG, F., INCOLL, L.D., LIAGRE, F., MANTZANAS, K., MAYUS, M., MORENO, G., PAPANASTASIS, V.P., PILBEAM, D.J., PISANELLI, A., DUPRAZ, C., 2006. Silvoarable Systems in Europe – Past, Present and Future Prospects. *Agroforestry Systems*, volume 67, n° 1. p. 29-50.

EVERSON, C.S., EVERSON, T.M., VAN NIEKERK, W., 2009. Soil water competition in a temperate hedgerow agroforestry system in South Africa. *Agroforestry Systems*, volume 75, n° 3. p. 211-221.

FAGERHOLM, N., TORRALBA, M., BURGESS, P.J., PLIENINGER, T., 2016. A systematic map of ecosystem services assessments around European agroforestry. *Ecological Indicators*, volume 62. p. 47-65.

FERNÁNDEZ, J.E., MORENO, F., CABRERA, F., ARRUE, J.L., MARTÍN-ARANDA, J., 1991. Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. *Plant and Soil*, volume 133, n° 2. p. 239-251.

FERNÁNDEZ, M.E., GYENGE, J., LICATA, J., SCHLICHTER, T., BOND, B.J., 2008. Belowground interactions for water between trees and grasses in a temperate semiarid agroforestry system. *Agroforestry Systems*, volume 74, n° 2. p. 185-197.

FIGUEIREDO, A.C., BARROSO, J.G., PEDRO, L.G., SCHEFFER, J.J.C., 2008. Factors affecting secondary metabolite production in plants: volatile components and essential oils. *Flavour and Fragrance Journal*, volume 23, n° 4. p. 213-226.

FLEXAS, J., DIAZ-ESPEJO, A., GAGO, J., GALLÉ, A., GALMÉS, J., GULÍAS, J., MEDRANO, H., 2014. Photosynthetic limitations in Mediterranean plants: A review. *Environmental and Experimental Botany*, volume 103, p. 12-23.

FranceAgriMer, 2021. Retrouvez le Panorama 2020 du Marché des plantes à parfum, aromatiques et médicinales. *In*: FranceAgriMer [en ligne]. Date de consultation : 21/04/2022. Disponible sur : <<https://www.franceagrimer.fr/Actualite/Filieres/Plantes-a-parfum-aromatiques-et-medicinales/2021/Retrouvez-le-Panorama-2020-du-Marche-des-plantes-a-parfum-aromatiques-et-medicinales>>.

FranceAgriMer, 2022. La filière Plantes à parfum, aromatiques et médicinales. *In* : FranceAgriMer [en ligne]. Date de consultation : 21/04/2022. Disponible sur : <<https://www.franceagrimer.fr/filiere-plantes-a-parfum-aromatiques-et-medicinales/La-filiere-Plantes-a-parfum-aromatiques-et-medicinales>>.

GAO, X., LIU, Z., ZHAO, X., LING, Q., HUO, G., WU, P., 2018. Extreme natural drought enhances interspecific facilitation in semiarid agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, volume 265, p. 444-453.

- GILLESPIE, A.R.**, 1989. Modelling nutrient flux and interspecies root competition in agroforestry interplantings. *Agroforestry Systems*, volume 8, n° 3. p. 257-265.
- GIORGI, F., LIONELLO, P.**, 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, volume 63, n° 2. p. 90-104.
- GOMES, A., SOUZA, M., JUNIOR, I., CARVALHO JÚNIOR, W., FIGUEIREDO, L., RONIE MARTINS, E.**, 2009. Influence of shade on the biomass and essential oil production of *Lippia citriodora* (Lam.), Brazil. *Biotemas*, volume 22, n°4. p. 9-14.
- GÓMEZ, J.A., VANDERLINDEN, K., GIRÁLDEZ, J.V., ET FERERES, E.**, 2002. Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural Water Management*, volume 55, n° 1. p. 53-70.
- GOSME, M., DUFOUR, L., AGUIRRE, H.D.I., DUPRAZ, C.**, 2016. Microclimatic effect of agroforestry on diurnal temperature cycle. *In: GOSME, M. (Eds.). 3rd European Agroforestry Conference Celebrating 20 years of innovation in European agroforestry. France : EURAF. 23-25 mai 2016, Montpellier. p. 183-186. ISBN: 978-2-87614-717-1.*
- GUILLOT, E., BERTRAND, I., RUMPEL, C., GOMEZ, C., ARNAL, D., ABADIE, J., HINSINGER, P.**, 2021. Spatial heterogeneity of soil quality within a Mediterranean alley cropping agroforestry system: Comparison with a monocropping system. *European Journal of Soil Biology*, volume 105, p. 103330.
- GUILLOT, E., HINSINGER, P., DUFOUR, L., ROY, J., BERTRAND, I.**, 2019. With or without trees: Resistance and resilience of soil microbial communities to drought and heat stress in a Mediterranean agroforestry system. *Soil Biology and Biochemistry*, volume 129, p. 122-135.
- HERTIG, E., JACOBET, J.**, 2008. Downscaling future climate change: Temperature scenarios for the Mediterranean area. *Global and Planetary Change*, volume 63, n° 2. p. 127-131.
- Infoclimat**, 2022. Normales et records climatologiques 1991-2020 à Manosque. *In : Infoclimat [en ligne]. Date de consultation : 01/09/2022. Disponible sur : <<https://www.infoclimat.fr/climatologie/normales-records/1991-2020/manosque/valeurs/00031.html>>.*
- INURRETA-AGUIRRE, H.D., LAURI, P.-É., DUPRAZ, C., GOSME, M.**, 2018. Yield components and phenology of durum wheat in a Mediterranean alley-cropping system. *Agroforestry Systems*, volume 92, n° 4. p. 961-974.
- INURRETA-AGUIRRE, H.D., LAURI, P.-É., DUPRAZ, C., GOSME, M.**, 2022. Impact of shade and tree root pruning on soil water content and crop yield of winter cereals in a Mediterranean alley cropping system. *Agroforestry Systems*, volume 96, n° 4. p. 747-757.
- ISAAC, M.E., BORDEN, K.A.**, 2019. Nutrient acquisition strategies in agroforestry systems. *Plant and Soil*, volume 444, n° 1-2. p. 1-19.
- iteipmai**, 1992. Verveine odorante. France : iteipmai. 11p.
- iteipmai**, 2020. Mélisse *Melissa officinalis* L. France : Ateliers MZH. 22p. ISBN : 978-2-918210-15-3.
- JOFFRE, R., RAMBAL, S.**, 1988. Soil-water improvement by trees in the rangelands of Southern Spain. *Acta Oecologica*, volume 9, n° 4. p. 405-422.
- JORDÁN, M.J., QUÍLEZ, M., LUNA, M.C., BEKHRADI, F., SOTOMAYOR, J.A., SÁNCHEZ-GÓMEZ, P., GIL, M.I.**, 2017. Influence of water stress and storage time on preservation of the fresh volatile profile of three basil genotypes. *Food Chemistry*, volume 221, p. 169-177.
- JOSE, S.**, 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, volume 76, n° 1. p. 1-10.

- JOSE, S., GILLESPIE, A.R.**, 1998. Allelopathy in black walnut (*Juglans nigra* L.) alley cropping. I. Spatio-temporal variation in soil juglone in a black walnut–corn (*Zea mays*L.) alley cropping system in the midwestern USA. *Plant and Soil*, volume 203, n° 2. p. 191-197.
- JOSE, S., GILLESPIE, A.R., SEIFERT, J.R., BIEHLE, D.J.**, 2000 a. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 2. Competition for water. *Agroforestry Systems*, volume 48, n° 1. p. 41-59.
- JOSE, S., GILLESPIE, A.R., SEIFERT, J.R., MENGEL, D.B., POPE, P.E.**, 2000 b. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 3. Competition for nitrogen and litter decomposition dynamics. *Agroforestry Systems*, volume 48, p. 61-77.
- KANZLER, M., BÖHM, C., MIRCK, J., SCHMITT, D., VESTE, M.**, 2019. Microclimate effects on evaporation and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems*, volume 93, n° 5. p. 1821-1841.
- KARKI, U., GOODMAN, M.S.**, 2013. Microclimatic differences between young longleaf-pine silvopasture and open-pasture. *Agroforestry Systems*, volume 87, n° 2. p. 303-310.
- KARKI, U., GOODMAN, M.S.**, 2015. Microclimatic differences between mature loblolly-pine silvopasture and open-pasture. *Agroforestry Systems*, volume 89, n° 2. p. 319-325.
- KARVATTE, N., KLOSOWSKI, E.S., DE ALMEIDA, R.G., MESQUITA, E.E., DE OLIVEIRA, C.C., ALVES, F.V.**, 2016. Shading effect on microclimate and thermal comfort indexes in integrated crop-livestock-forest systems in the Brazilian Midwest. *International Journal of Biometeorology*, volume 60, n° 12. p. 1933-1941.
- KARVATTE, N., MIYAGI, E.S., DE OLIVEIRA, C.C., BARRETO, C.D., MASTELARO, A.P., BUNGENSTAB, D.J., ALVES, F.V.**, 2020. Infrared thermography for microclimate assessment in agroforestry systems. *Science of The Total Environment*, volume 731, p. 139252.
- KATSOUKLIS, G.I., KIMBARIS, A.C., ANASTASAKI, E., DAMALAS, C.A., KYRIAZOPOULOS, A.P.**, 2022. Chamomile and Anise Cultivation in Olive Agroforestry Systems. *Forests*, volume 13, n° 1. p. 128.
- KOHLI, R.K., SINGH, H.P., BATISH, D.R., JOSE, S.**, 2007. Ecological Interaction in Agroforestry: An Overview. *In: BATISH, D.R., KOHLI, R.K., JOSE, S., SINGH, H.P. (Eds). Ecological Basis of Agroforestry.* CRC Press. p. 3-14. ISBN 978-1-4200-4336-5.
- KONÉ, K.P.F.O.**, 2019. Applications des techniques de chromatographie et de spectroscopie dans l'identification des métabolites secondaires de trois plantes antidiabétiques et antihypertensives de la pharmacopée ivoirienne. Thèse en sciences des procédés chimiques, alimentaires et environnementaux : Institut National Polytechnique Felix Houphoët Boigny - Yamoussoukro, 301 p.
- KORT, J., BANK, G., POMEROY, J., FANG, X.**, 2012. Effects of shelterbelts on snow distribution and sublimation. *Agroforestry Systems*, volume 86, n° 3. p. 335-344.
- KUEMMEL, B.**, 2003. Theoretical investigation of the effects of field margin and hedges on crop yields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, volume 95, n° 1. p. 387-392.
- LAMACQUE, L.**, 2020. Caractérisation physiologique de la réponse à la sécheresse de la Lavande et du Lavandin : impact de la culture inter-rang : Thèse de doctorat en biologie végétale : Université Clermont-Auvergne. 229p.
- LASCO, R.D., DELFINO, R.J.P., ESPALDON, M.L.O.**, 2014. Agroforestry systems: helping smallholders adapt to climate risks while mitigating climate change: Agroforestry systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, volume 5, n° 6. p. 825-833.
- LIN, B.B.**, 2010. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, volume 150, n° 4. p. 510-518.

- LISTE, H.H., WHITE, J.C.**, 2008. Plant hydraulic lift of soil water – implications for crop production and land restoration. *Plant and Soil*, volume 313, n° 1. p. 1-17.
- LIU, Q., PENG, P., WANG, Y., XU, P., GUO, Y.**, 2019. Microclimate regulation efficiency of the rural homegarden agroforestry system in the Western Sichuan Plain, China. *Journal of Mountain Science*, volume 16, n° 3. p. 516-528.
- LIVESLEY, S.J., GREGORY, P.J., BURESH, R.J.**, 2004. Competition in tree row agroforestry systems. 3. Soil water distribution and dynamics. *Plant and Soil*, volume 264, n° 1/2. p. 129-139.
- MANTINO, A., TOZZINI, C., BONARI, E., MELE, M., RAGAGLINI, G.**, 2021. Competition for Light Affects Alfalfa Biomass Production More Than Its Nutritive Value in an Olive-Based Alley-Cropping System. *Forests*, volume 12, n° 2. p. 233.
- MANTOVANI, D., BENINCASA, P., ROSATI, A.**, 2016. Olive (*olea europea L.*) and wild asparagus (*asparagus acutifolius L.*) agroforestry system: asparagus performance and its best positioning in the olive orchard. *In: GOSME, M. (Eds.). 3rd European Agroforestry Conference Celebrating 20 years of innovation in European agroforestry. France : EURAF. 23-25 mai 2016, Montpellier. p. 267-269.*
- MONTEITH, J.L., ONG, C.K., CORLETT, J.E.**, 1991. Microclimatic interactions in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, volume 45, n° 1. p. 31-44.
- MORADKHANI, H., SARGSYAN, E., BIBAK, H., NASERI, B., SADAT-HOSSEINI, M., FAYAZI-BARJIN, A. MEFTAHIZADE, H.**, 2010. *Melissa officinalis L.*, a valuable medicine plant: A review. *Journal of Medicinal Plants Research*, volume 4, n°25. p. 2753-2759.
- MORENO MARCOS, G., OBRADOR, J.J., GARCÍA, E., CUBERA, E., MONTERO, M.J., PULIDO, F., DUPRAZ, C.**, 2007. Driving competitive and facilitative interactions in oak dehesas through management practices. *Agroforestry Systems*, volume 70, n° 1. p. 25-40.
- MOSQUERA-LOSADA, M.R., FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N., ROMERO-FRANCO, R., GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ M.P., RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.**, 2018 a. Biomass production and concentration of rosmarinic acid in *melissa officinalis L.* established under *prunus avium L.* *In: 4th European Agroforestry Conference : Agroforestry as Sustainable Land Use. 28-30 Mai 2018, Nijmegen, Netherlands. Espagne: European Agroforestry Federation et University of Santiago de Compostela. p. 369-372. ISBN: 978-84-09-02384-4.*
- MOSQUERA-LOSADA, M.R., MCADAM, J.H., ROMERO-FRANCO, R., SANTIAGO-FREIJANES, J.J., RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.**, 2009. Definitions and Components of Agroforestry Practices in Europe. *In: RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A., MCADAM, J., MOSQUERA-LOSADA, M.R. (Eds.). Agroforestry in Europe: Current Status and Future Prospects. Dordrecht : Springer Netherlands. p. 3-19.*
- MOSQUERA-LOSADA, M.R., MORENO, G., PARDINI, A., MCADAM, J.H., PAPANASTASIS, V., BURGESS, P.J., LAMERSDORF, N., CASTRO, M., LIAGRE, F., RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.**, 2012. Past, Present and Future of Agroforestry Systems in Europe. *In: NAIR, P.K.R., GARRITY, D. (Eds.). Agroforestry - The Future of Global Land Use. Dordrecht : Springer Netherlands. p. 285-312.*
- MOSQUERA-LOSADA, M.R., MORENO, G., SANTIAGO-FREIJANES, J.J., FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N.**, 2015. Sistemas agroforestales y PAC. *Ambiata*, n°112. p. 110-124.
- MOSQUERA-LOSADA, M.R., SANTIAGO-FREIJANES, J.J., ROIS-DÍAZ, M., MORENO, G., DEN HERDER, M., ALDREY-VÁZQUEZ, J.A., FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N., PANTERA, A., PISANELLI, A., RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.**, 2018 b. Agroforestry in Europe: A land management policy tool to combat climate change. *Land Use Policy*, volume 78. p. 603-613.
- MUSCHLER, R.G.**, 2016. Agroforestry: Essential for Sustainable and Climate-Smart Land Use?. *In: PANCEL, L., KOHL, M. (Eds.). Tropical Forestry Handbook. 2nd ed. Springer-Verlag. p. 2013-2116.*
- NAIR, P.K.R.**, 1985. Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, volume 3, n° 2. p. 97-128.

- NERLICH, K., GRAEFF-HÖNNINGER, S., CLAUPEIN, W.**, 2013. Agroforestry in Europe: a review of the disappearance of traditional systems and development of modern agroforestry practices, with emphasis on experiences in Germany. *Agroforestry Systems*, volume 87, n° 2. p. 475-492.
- NIK, Z.B., MIRZA, M., GHAFARI, M.**, 2013. Effect of Drought Stress on Growth and Essential Oil Contents in *Parthenium argentatum* Gray. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* [en ligne] Date de consultation : 13/10/2022. Disponible sur : <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0972060X.2008.10643649>>.
- NORTON, R.L.**, 1988. 11. Windbreaks: Benefits to orchard and vineyard crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, volume 22-23, p. 205-213.
- PALADA, M., BECKER, B.N., MITCHELL, J.M.**, 2004. Cultivation of medicinal plants in alley cropping system with *Moringa oleifera* in the Virgin Islands. *In*: COMBIE, V., CLARKE, C.C. Annual agriculture and food fair of the U.S. 14-16 février: Virgin Islands. Virgin Islands: Kingshill, VI: University of the Virgin Islands Cooperative Extension Service. p. 34-39.
- PARIS, P., OLIMPIERI, G., TODARO, L., PISANELLI, A., CANNATA, F.**, 1998. Leaf-water potential and soil-water depletion of walnut mulched with polyethylene and intercropped with alfalfa in Central Italy. *Agroforestry Systems*, volume 40, p. 69-81.
- PISANELLI, A., RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.**, 2018. Agroforestry in Europe: A land management policy tool to combat climate change. *Land Use Policy*, volume 78. p. 603-613.
- POCHEVILLE, A.**, 2010. LA NICHE ÉCOLOGIQUE: CONCEPTS, MODÈLES, APPLICATIONS. Thèse de doctorat Sciences de la Vie et de la Santé : Ecole Normale Supérieure de Paris. 165 p.
- PPAM de France**, 2017. PPAM de France [en ligne]. Date de consultation : 28/04/2022. Disponible sur : <<https://www.ppamdefrance.com/>>.
- PROCHNOW, D., ALTISSIMO, B.S., HEINZMANN, B.M., SCHMIDT, D.**, 2017. Chemical composition of the essential oil of *Aloysia triphylla* (L'Hér) Britton due to water deficit and seasonality. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, volume 16 n°2. p. 121-128.
- PURNOMO, D., SITOMPUL, S.M., BUDIASTUTI, M.S.**, 2010. Solar radiation in agroforestry system. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, volume 1, n° 1. p. 14-19.
- QUERNÉ, A., BATTIE-LACLAU, P., DUFOUR, L., WERY, J., DUPRAZ, C.**, 2017. Effects of walnut trees on biological nitrogen fixation and yield of intercropped alfalfa in a Mediterranean agroforestry system. *European Journal of Agronomy*, volume 84, p. 35-46.
- QUINKENSTEIN, A., WÖLLECKE, J., BÖHM, C., GRÜNEWALD, H., FREESE, D., SCHNEIDER, B.U., HÜTTL, R.F.**, 2009. Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental Science & Policy*, volume 12, n° 8. p. 1112-1121.
- RADERSMA, S., ONG, C.K.**, 2004. Spatial distribution of root length density and soil water of linear agroforestry systems in sub-humid Kenya: implications for agroforestry models. *Forest Ecology and Management*, volume 188, n° 1. p. 77-89.
- RADWAN, A., KLEINWÄCHTER, M., SELMAR, D.**, 2017. Impact of drought stress on specialised metabolism: Biosynthesis and the expression of monoterpene synthases in sage (*Salvia officinalis*). *Phytochemistry*, volume 141, p. 20-26.
- RAO, M.R., PALADA, M.C., ET BECKER, B.N.**, 2004. Medicinal and aromatic plants in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, volume 61. p. 107-122.
- Région Auvergne Rhône-Alpes**, 2018. La filière des plantes aromatiques et médicinales a le vent en poupe. *In* : La Région Auvergne Rhône-Alpes [en ligne]. Date de consultation : 28/04/2022. Disponible sur : <<https://www.auvergnerhonealpes.fr/actualite/418/23-la-filiere-des-plantes-aromatiques-et-medicinales-a-le-vent-en-poupe.htm>>.

- REIFSNYDER, W.E.**, 1987. Control of solar radiation in agroforestry practice. *In*: REIFSNYDER, W.E., DARNHOFER, T. (Eds). METEOROLOGY AND AGROFORESTRY. 9-13 février 1987, Nairobi. Nairobi : International Council for Research in Agroforestry (ICRAF). p. 141-156. ISBN 92 9059 059 9
- RIZVI, S.J.H., TAHIR, M., RIZVI, V., KOHLI, R.K., ANSARI, A.**, 1999. Allelopathic Interactions in Agroforestry Systems. *Critical Reviews in Plant Sciences*, volume 18, n° 6. p. 773-796.
- SANCHEZ, I.A., LASSALETTA, L., MCCOLLIN, D., BUNCE, R.G.H.**, 2009. The effect of hedgerow loss on microclimate in the Mediterranean region: an investigation in Central Spain. *Agroforestry Systems*, volume 78, n° 1. p. 13.
- SGARBOSSA, J., SCHMIDT, D., SCHWERZ, F., SCHWERZ, L., PROCHNOW, D., CARON, B.O.**, 2019. Effect of season and irrigation on the chemical composition of *Aloysia triphylla* essential oil. *Revista Ceres*, volume 66. p. 85-93.
- Shakeri, A., Sahebkar, A., Javadi, B.**, 2016. *Melissa officinalis* L. – A review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacology. *Journal of Ethnopharmacology*, volume 188, p. 204-228.
- SINGH, K., RAJESWARA RAO, B.R., SINGH, C.P., BHATTACHARYA, A.K., KAUL, P.N.**, 1998. Production potential of aromatic crops in the alleys of *Eucalyptus citriodora* in semi - arid tropical climate of south India. *Journal of Medicinal and Aromatic Plant Sciences*, volume 20, p. 749-752.
- SINGH, R.P., SAHARAN, N., ONG, C.K.**, 1989. Above and below ground interactions in alley-cropping in semi-arid India. *Agroforestry Systems*, volume 9, n° 3. p. 259-274.
- SMITH, D.M., JARVIS, P.G., ODONGO, J.C.W.**, 1997. Sources of water used by trees and millet in Sahelian windbreak systems. *Journal of Hydrology*, volume 198, n° 1. p. 140-153.
- SMITH, J., PEARCE, B.D., WOLFE, M.S.**, 2013. Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems*, volume 28, n° 1. p. 80-92.
- SMITH, L.G., WESTAWAY, S., MULLENDER, S., GHALEY, B.B., XU, Y., LEHMANN, L.M., PISANELLI, A., RUSSO, G., BOREK, R., WAWER, R., BORZEĆKA, M., SANDOR, M., GLIGA, A., SMITH, J.**, 2022. Assessing the multidimensional elements of sustainability in European agroforestry systems. *Agricultural Systems* [en ligne], volume 197. Date de consultation 01/08/2022. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X21003103?casa_token=qYG8vYHn160AAAAA:OUd8hjyxzYEzQtiWEFQ3I7JuaiSTNDgyL0LntKWHY32pRvgMg_eBn2OCmbRlo5QUYg1WnbZEE5s>.
- SMITHA. G. R.**, 2018. Integration of Medicinal Plants in different cropping systems. *In*: Indian Institute of Horticultural Research (Eds). Conservation and Cultivation of Medicinal Plants. 30 aout - 3 septembre 2018, New Delhi. New Delhi: ICAR-IIHR. 106p.
- SUJATHA, S., BHAT, R., KANNAN, C., BALASIMHA, D.**, 2011. Impact of intercropping of medicinal and aromatic plants with organic farming approach on resource use efficiency in arecanut (*Areca catechu* L.) plantation in India. *Industrial Crops and Products*, volume 33, n° 1. p. 78-83.
- TEMANI, F., BOUAZIZ, A., DAOUI, K., WERY, J., BARKAOUI, K.**, 2021. Olive agroforestry can improve land productivity even under low water availability in the South Mediterranean. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, volume 307, p. 107234.
- TRAMBLAY, Y., RIBES, A., SOMOT, S., NEPPEL, L., LUCAS-PICHER, P., VINET, F., SAUQUET, E.**, 2021. Impacts du changement climatique sur les pluies intenses et les crues en Méditerranée. *LHB*, volume 107, n° 1. p. 1-5.
- TSONKOVA, P., MIRCK, J., BÖHM, C., FÜTZ, B.**, 2018. Addressing farmer-perceptions and legal constraints to promote agroforestry in Germany. *Agroforestry Systems*, volume 92, n° 4. p. 1091-1103.

VARELLA, A.C., MOOT, D.J., POLLOCK, K.M., PERI, P.L., LUCAS, R.J., 2011. Do light and alfalfa responses to cloth and slatted shade represent those measured under an agroforestry system? *Agroforestry Systems*, volume 81, n° 2. p. 157-173.

WANG, H., TAKLE, E.S., 1997. MOMENTUM BUDGET AND SHELTER MECHANISM OF BOUNDARY-LAYER FLOW NEAR A SHELTERBELT. *Boundary-Layer Meteorology*, volume 82, n° 3. p. 417-437.

WOLZ, K.J., DELUCIA, E.H., 2018. Alley cropping: Global patterns of species composition and function. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, volume 252, p. 61-68.

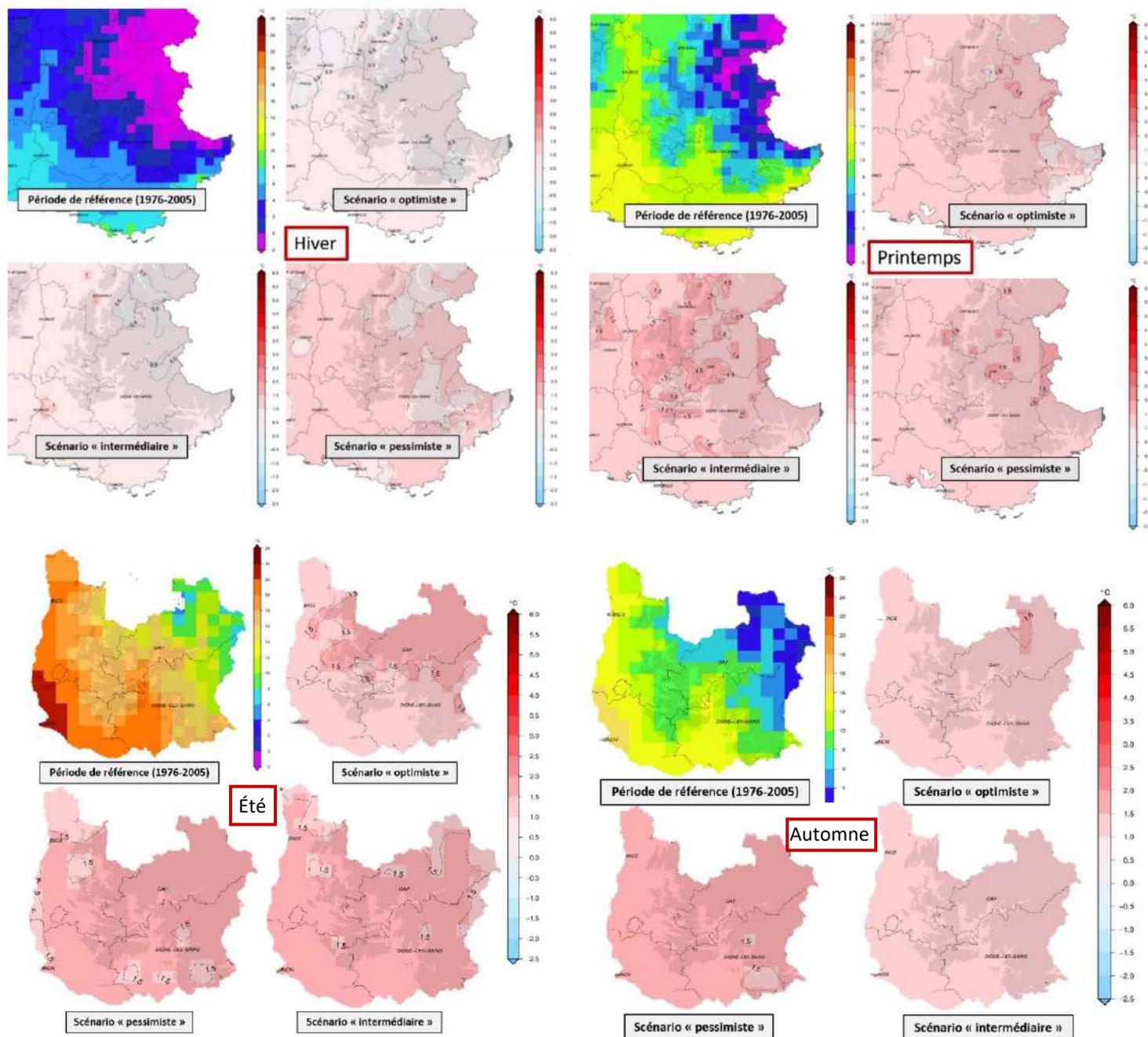
ZHAO, W., QUALLS, R.J., ET BERLINER, P.R., 2003. Modeling of the short wave radiation distribution in an agroforestry system. *Agricultural and Forest Meteorology*, volume 118, n° 3. p. 185-206.

ZUBAY, P., RUTTNER, K., LADANYI, M., DELI, J., NEMETH ZAMBORINE, É., SZABO, K., 2021. In the shade – Screening of medicinal and aromatic plants for temperate zone agroforestry cultivation. *Industrial Crops and Products*, volume 170, p. 113764.

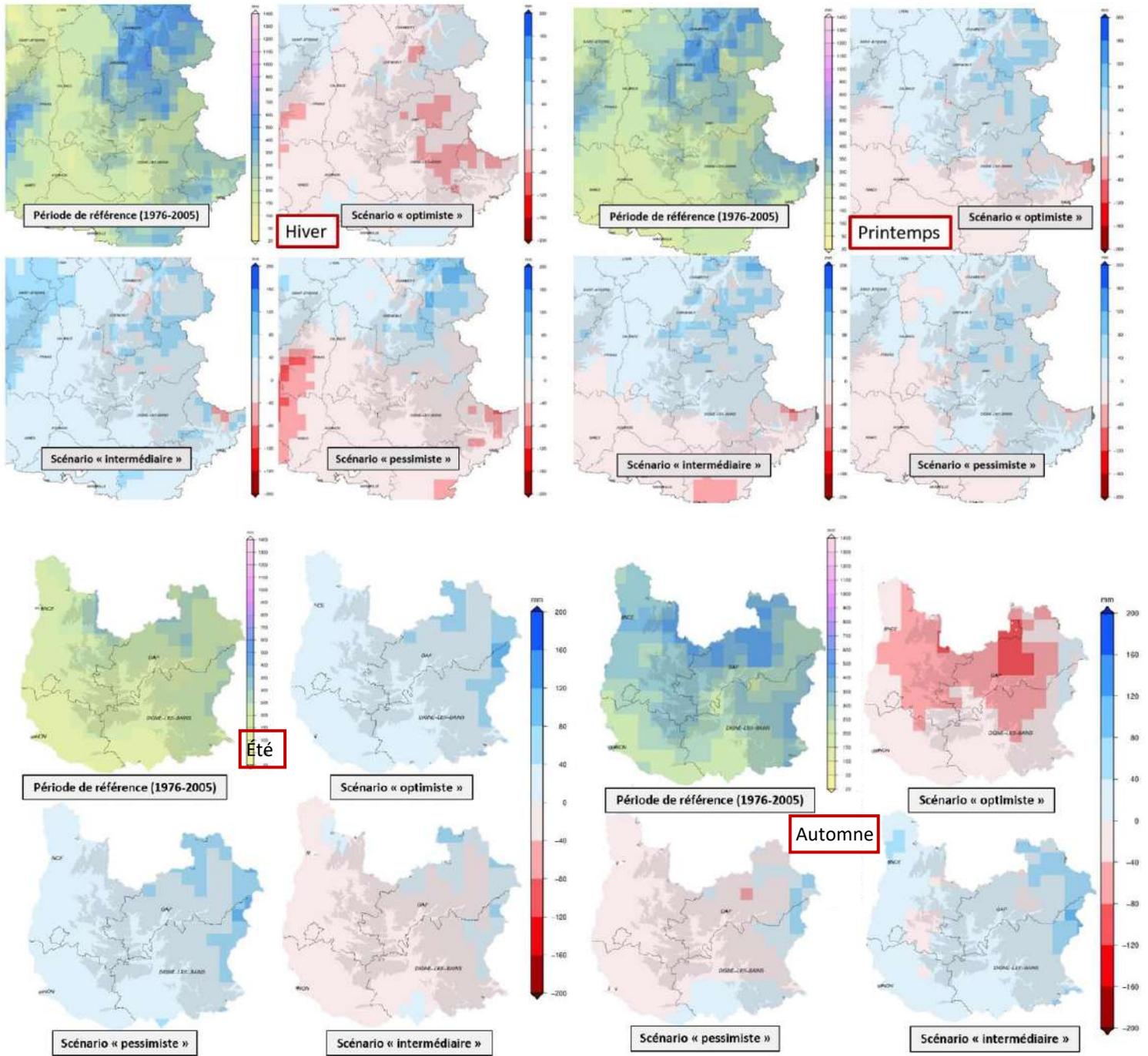
Annexes

Annexe A : Prévisions climatiques (température et précipitation) dans le sud est de la France, en fonction des différents scénarios RCP du GIEC (période de référence 1976-2005) (LAMACQUE, 2020)

Futur proche : d'aujourd'hui à 2050

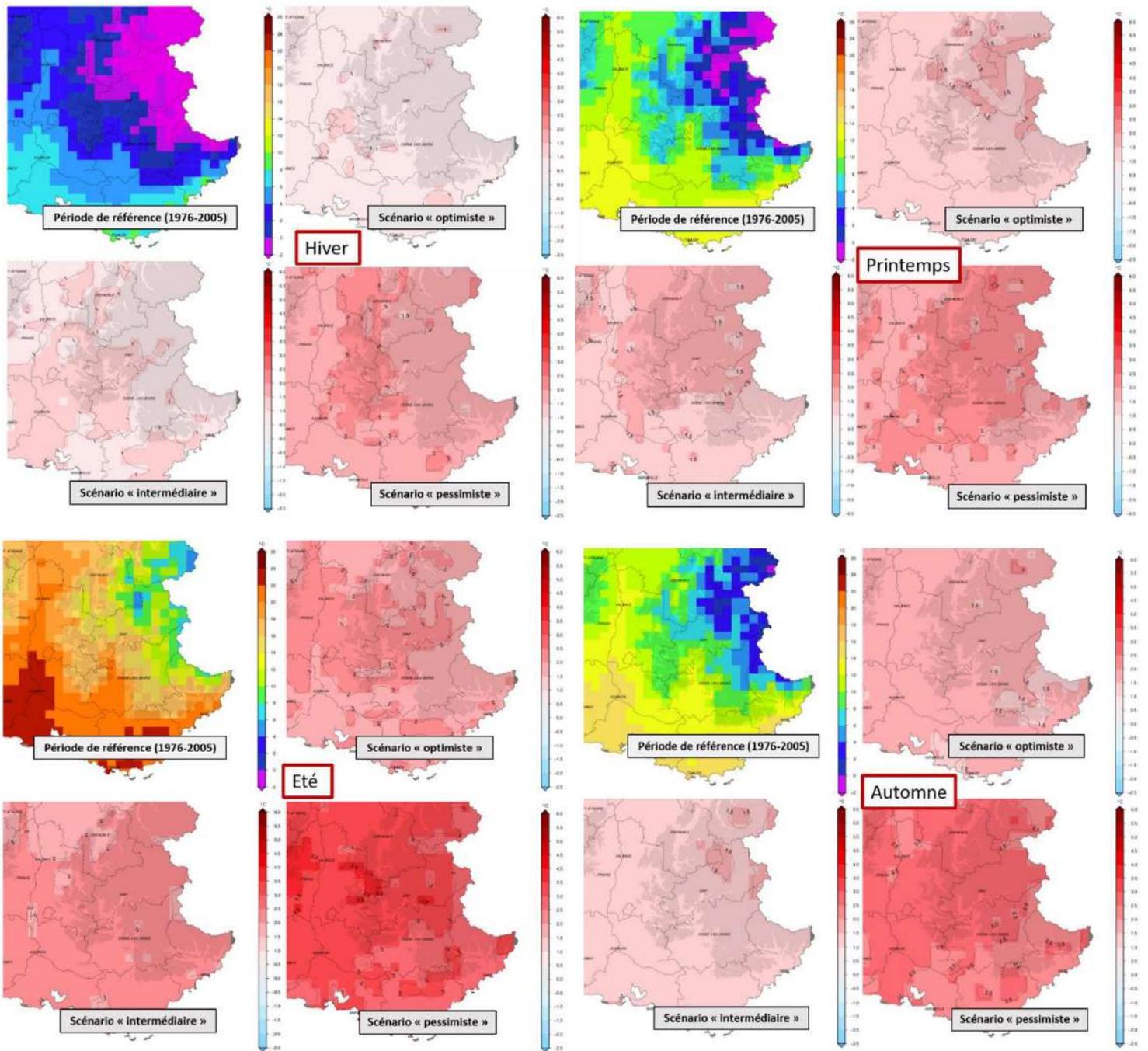


Évolution de la température moyenne quotidienne (°C) pour un futur proche (2021-2050) dans le sud est de la France

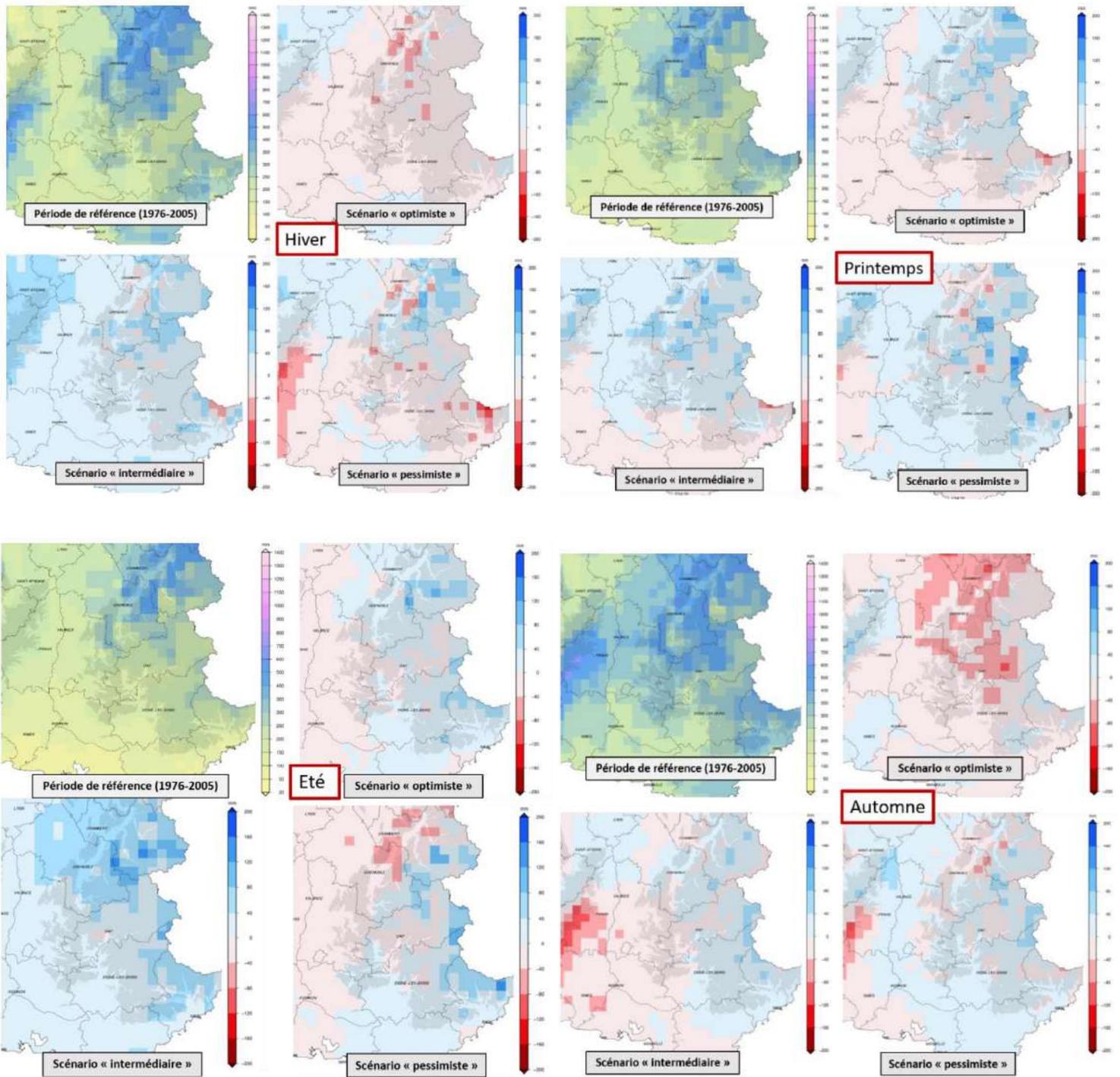


Évolution du cumul des précipitations moyennes (mm) pour un futur proche (2021-2050) dans le sud est de la France

Futur moyen : de 2050 à 2070

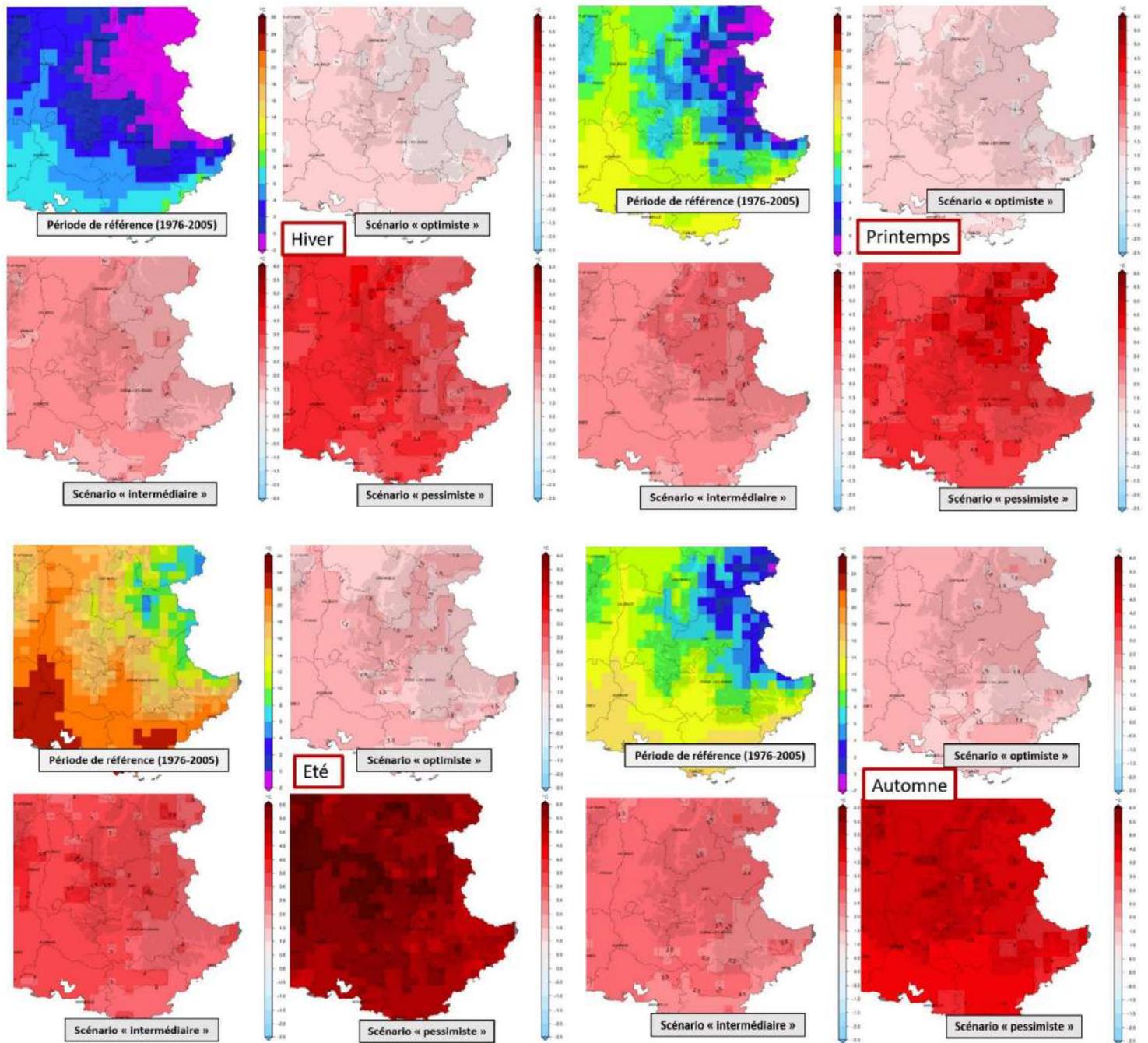


Évolution de la température moyenne quotidienne (°C) pour un futur moyen (2050-2070) dans le sud est de la France

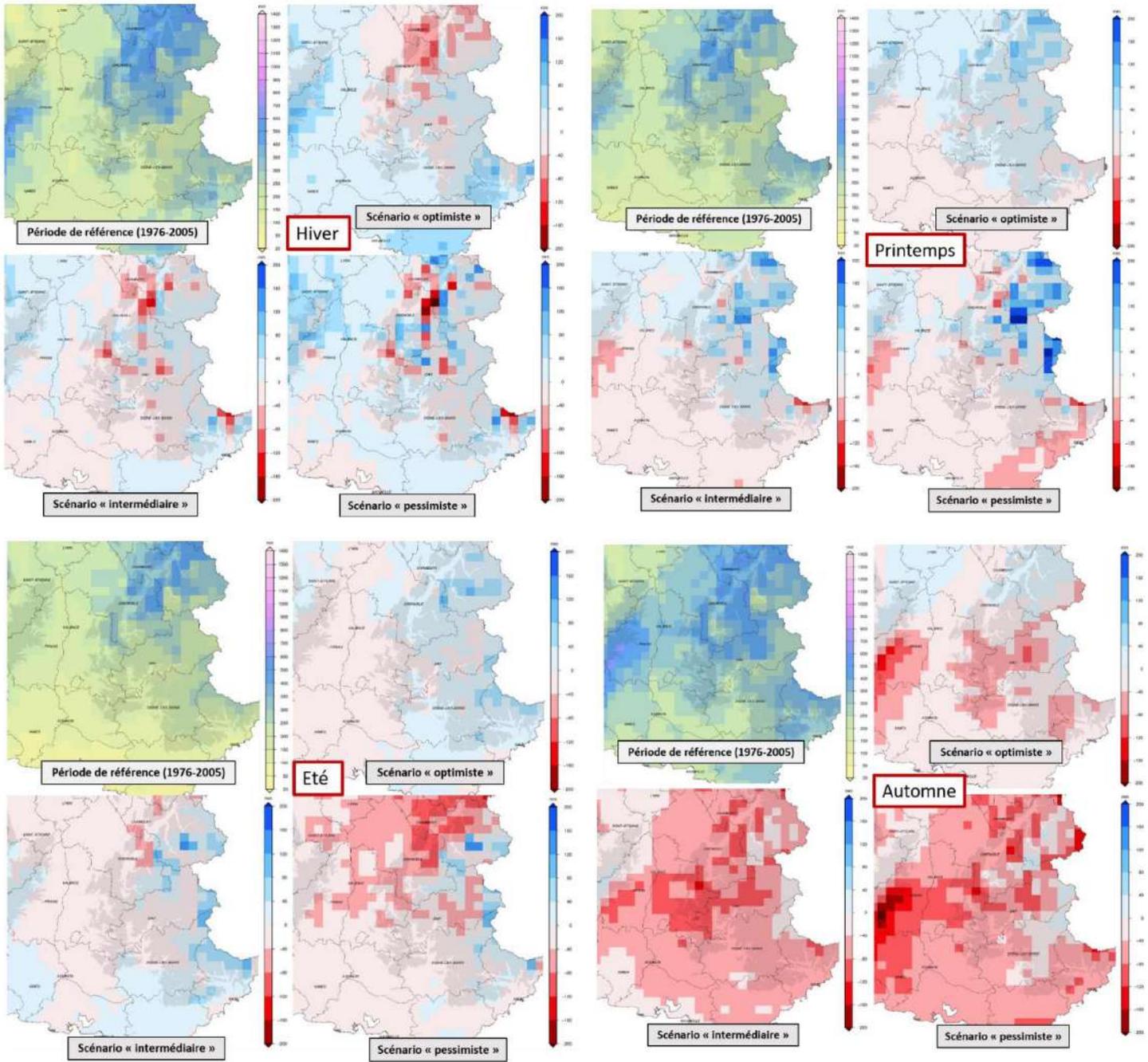


Évolution du cumul des précipitations moyennes (mm) pour un futur moyen (2050-2070) dans le sud est de la France

Futur lointain : de 2070 à 2100

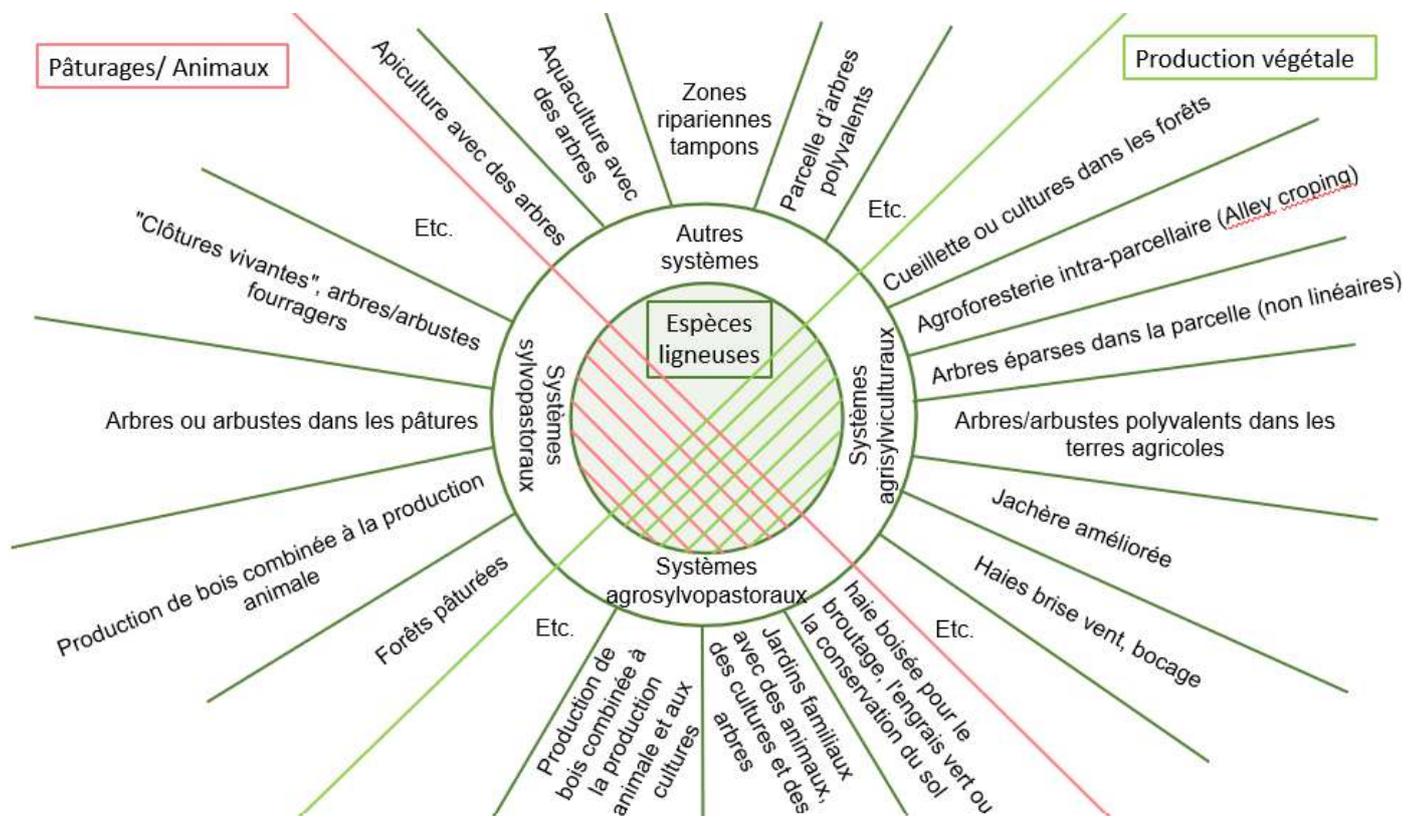


Évolution de la température moyenne quotidienne (°C) pour un futur lointain (2070-2100) dans le sud est de la France

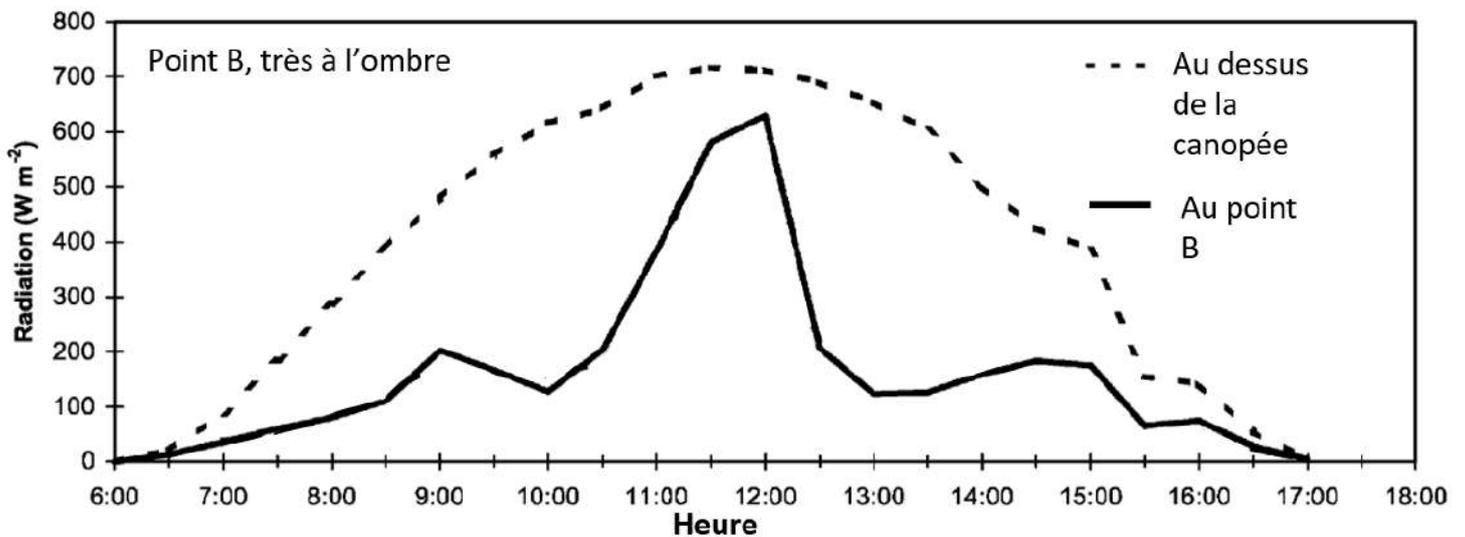
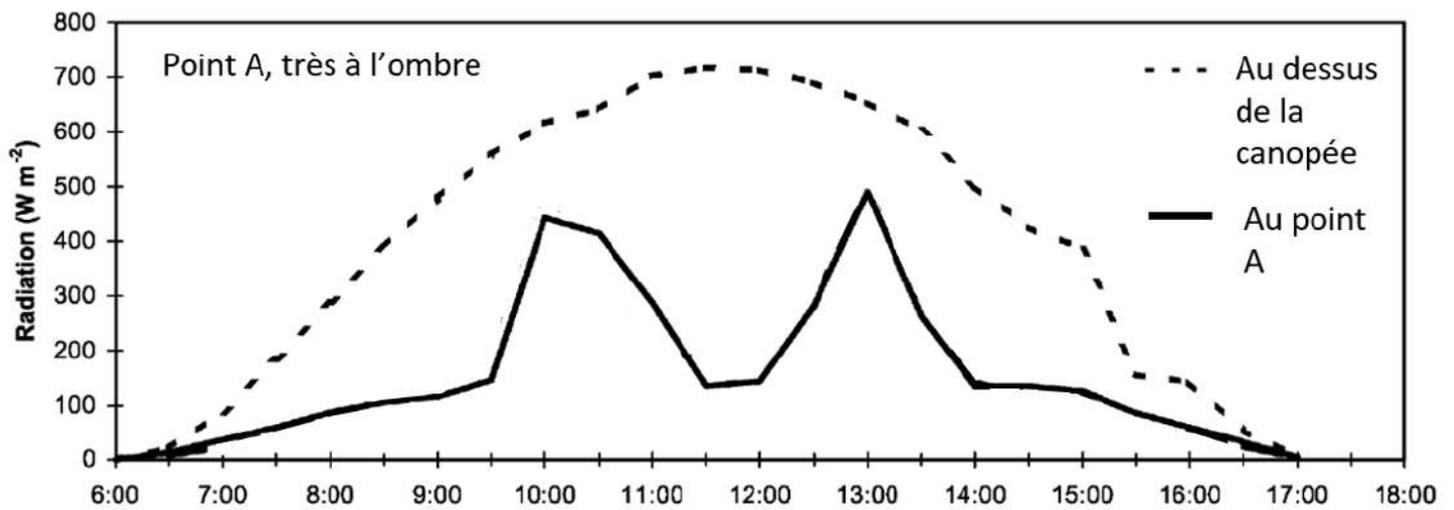
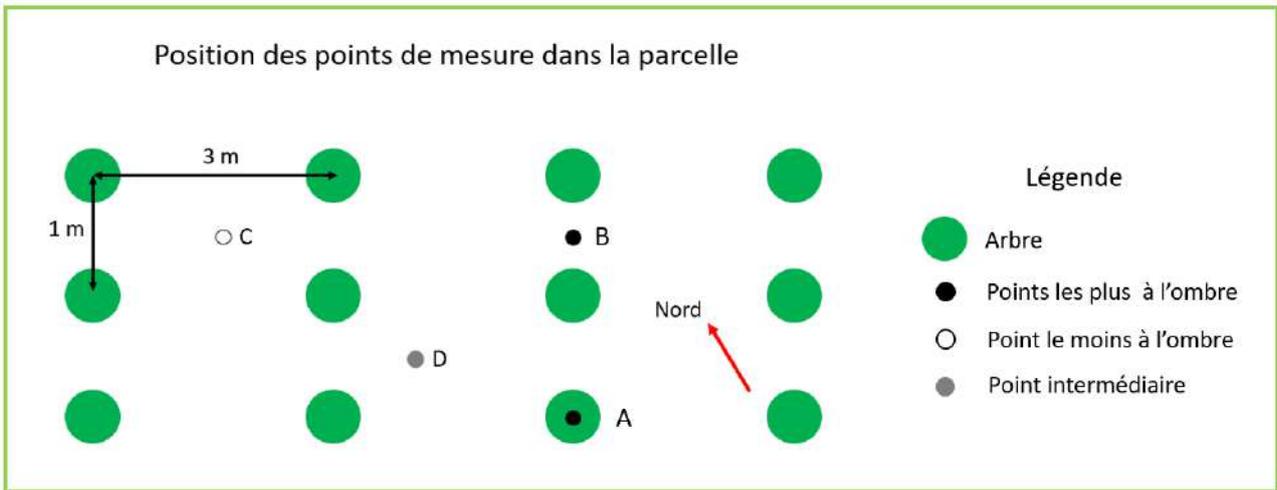


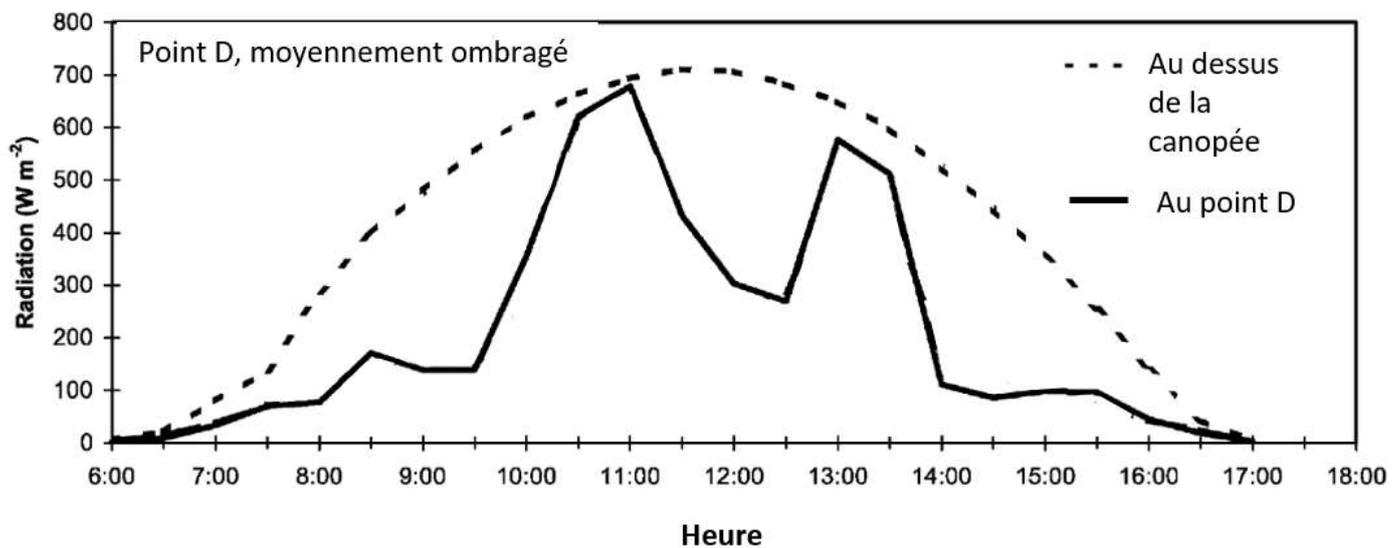
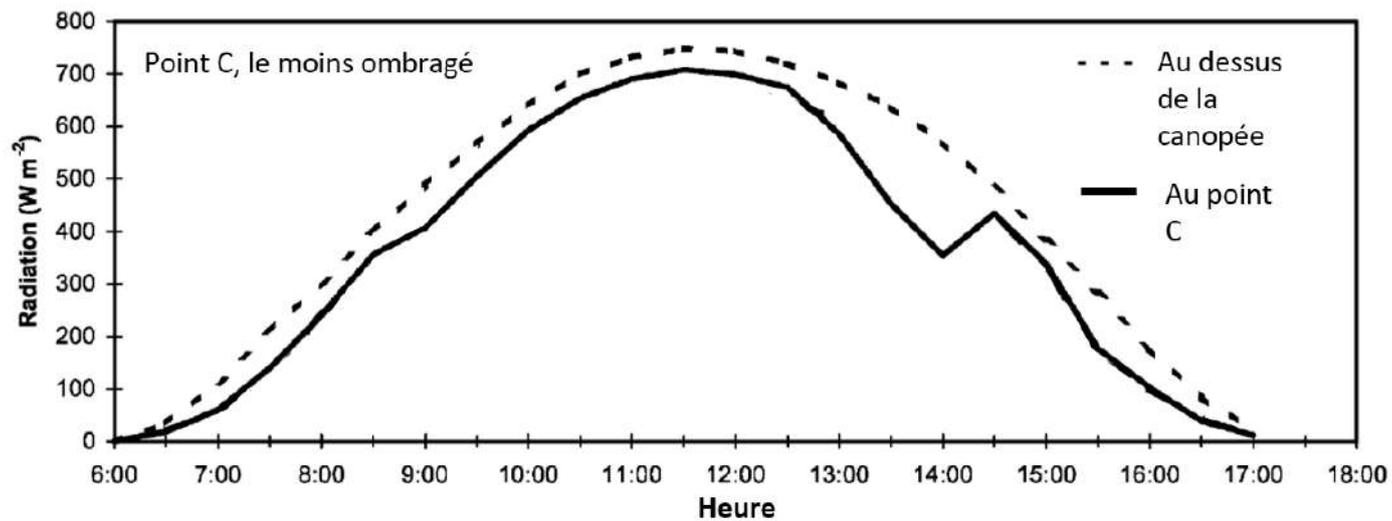
Évolution du cumul des précipitations moyennes (mm) pour un futur lointain (2070-2100) dans le sud est de la France

Annexe B : Classification possible des systèmes agroforestiers adaptée de Nair 1985 et MOSQUERA-LOSADA et al., 2009

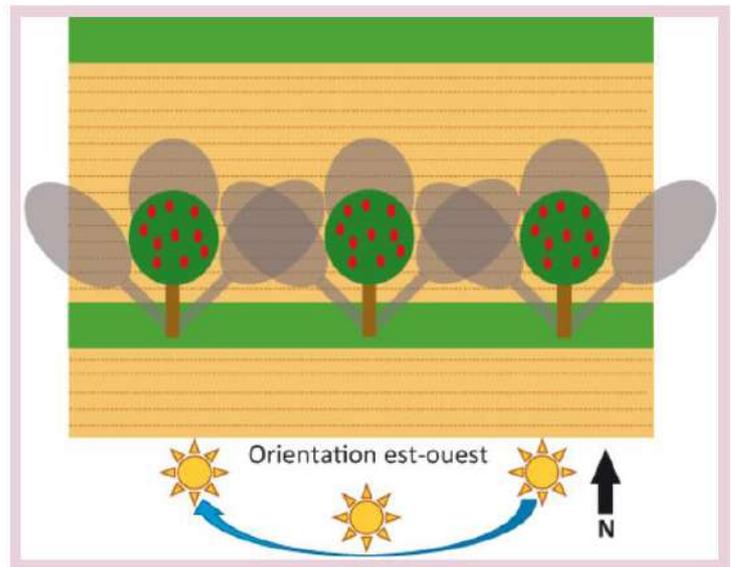
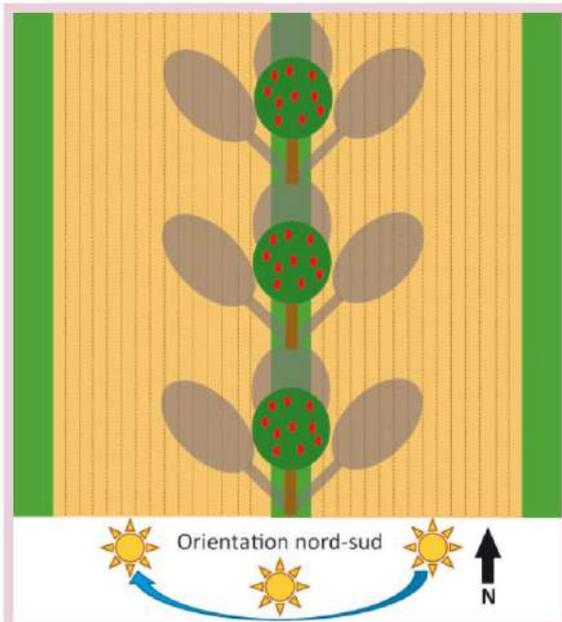


Annexe C : Radiations au cours de la journée dans une parcelle en fonction de la position par rapport aux arbres (adapté de ZHAO *et al.*, 2003)

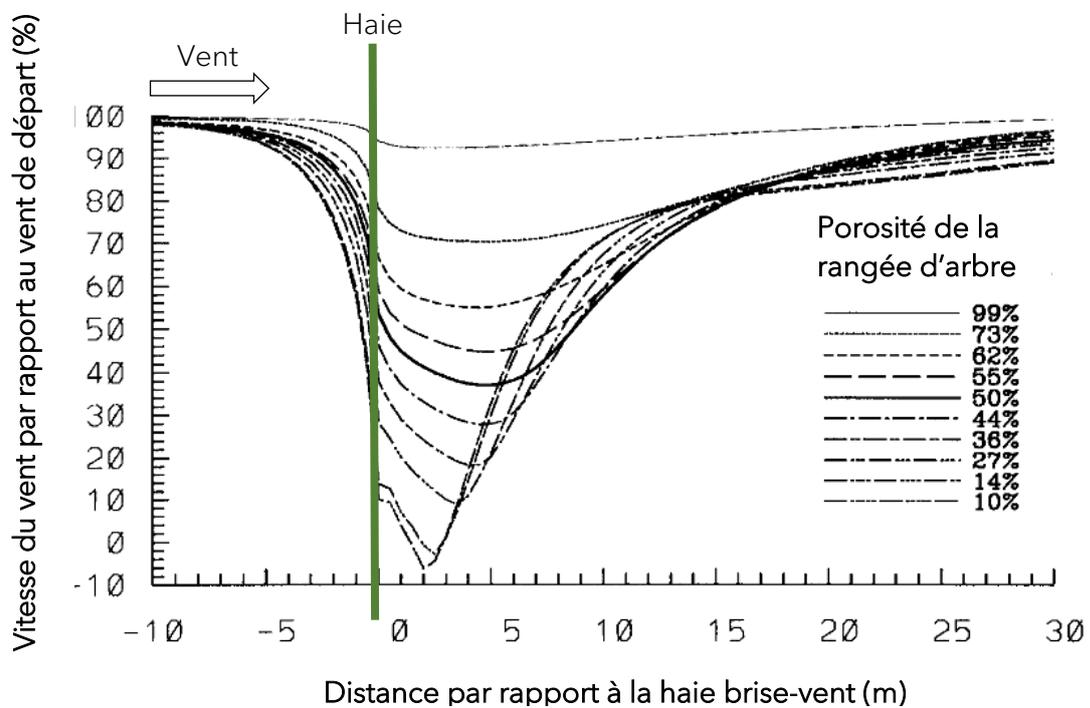




Annexe D : Ombre sur les cultures en fonction de l'orientation des rangées d'arbres en AF intraparcellaire (AGRIDEA, 2020)



Annexe E : Réduction de la vitesse du vent par une rangée d'arbres (adapté de WANG, TAKLE, 1997)



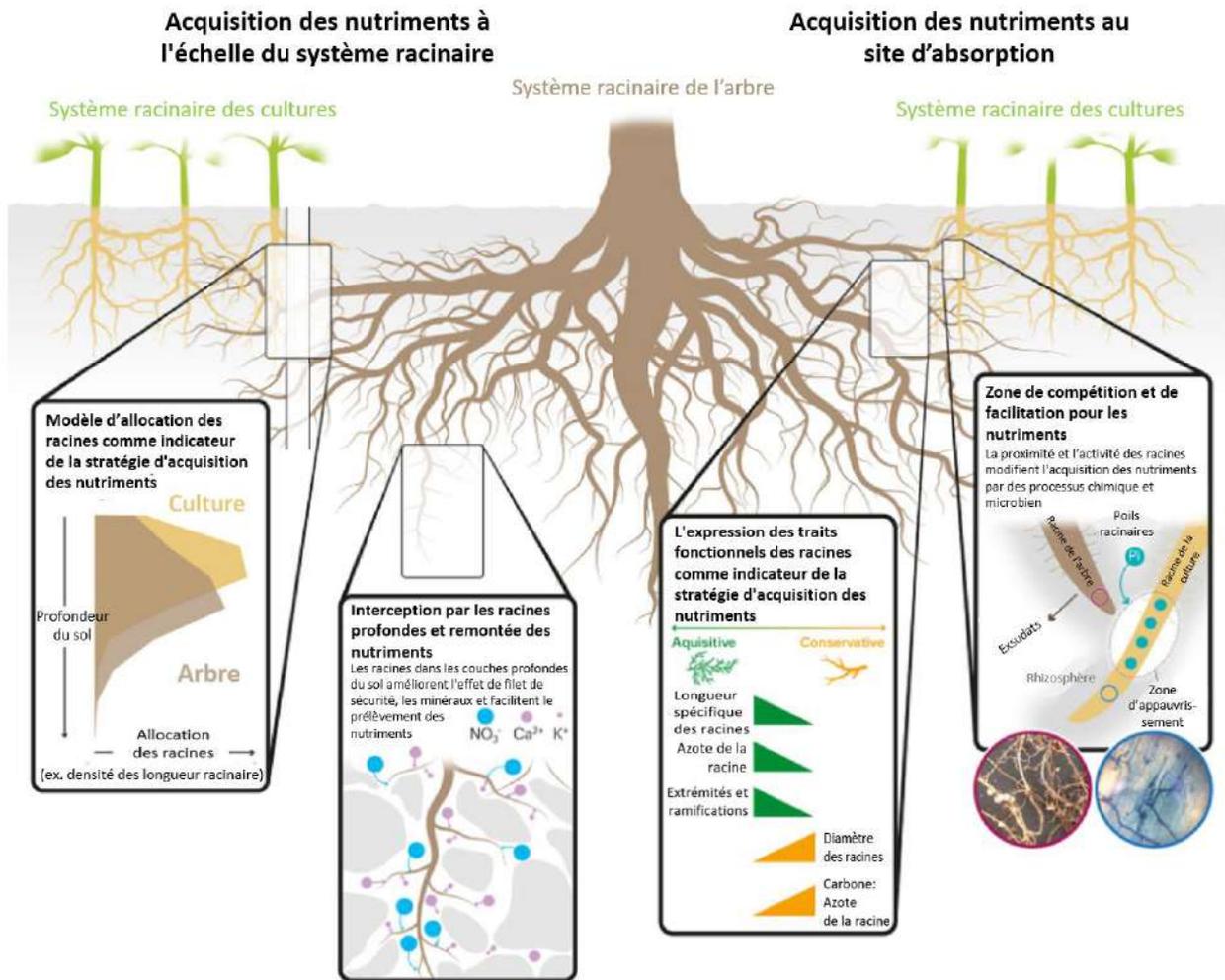
Annexe F : Facilitations fréquentes en AF tempérée (adapté de DUPRAZ, LIAGRE 2011)

Type de facilitation :

- 1 : Directe par augmentation de la ressource
- 2 : Indirect par plasticité architecturale
- 3 : Indirecte par plasticité physiologique
- 4 : Autres

| Ressource | Mécanisme | Type de facilitation | | | |
|-------------------------|--|----------------------|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Eau | Cycles de croissance décalés, permet d'utiliser la ressource en eau sur des périodes plus grandes. | x | | | |
| | Approfondissement des systèmes racinaires sous l'effet de la compétition | | x | | |
| | Amélioration de l'infiltration par couverture du sol. | x | | | |
| | Amélioration de la capacité de rétention en eau du sol grâce à la matière organique apportée par une espèce. | x | | | |
| | Amélioration de l'efficacité de transpiration par effet brise-vent. | | | x | |
| | Réduction de l'évapotranspiration par humidification de l'air par les arbres | x | | | |
| | Réduction du drainage par une utilisation plus complète dans le temps et l'espace de l'eau du sol. | x | | | |
| | Captage de précipitations occultées par les arbres (condensation du brouillard). | x | | | |
| | Blocage des vents desséchant par les arbres. | x | | | |
| Lumière | Cycles de croissance décalés, permettant de valoriser la lumière sur des périodes plus longues. | x | | | |
| | Réduction des stress thermiques à l'ombre. | | | x | |
| | Protection des cultures sciaphiles (qui aiment l'ombre). | | | x | |
| Azote | Piégeage du rayonnement augmenté grâce aux réflexions multiples entre arbres et cultures. | x | | | |
| | Transfert d'azote d'une espèce fixatrice à une espèce non fixatrice. | x | | | |
| | Stimulation de la fixation d'une espèce fixatrice par compétition d'une espèce non fixatrice. | | | x | |
| Eléments (P, K, Ca, Mg) | Récupération en profondeur d'azote lixivié par enracinement profond de l'espèce associée. | | x | | |
| | Mobilisation par les racines profondes des arbres des minéraux dans les zones d'altération de la roche-mère. | | | x | |
| Carbone | Réduction des attaques parasitaires dans les peuplements mixtes (qui équivaut à un gain de carbone pour la plante) | x | | | |
| Multiple | Affaiblissement des adventices par l'ombre des arbres en périodes sans culture. | x | | | |
| Information | Présence permanente permettant de gérer les cultures, d'observer les arbres et d'intervenir en cas de problème | | | | x |

Annexe G : Acquisition de nutriments dans les systèmes agroforestiers
(adapté de ISAAC, BORDEN, 2019)



Les indicateurs (distribution des racines et traits fonctionnels des racines fines) et les processus (capture des nutriments dans les profondeurs du sol et processus chimiques et microbiens dans la rhizosphère) sont représentés.

Annexe H : Tableau des rendements de certaines PPAM en agroforesterie par rapport à ceux de monocultures (adapté de RAO *et al.*, 2004)

| Location | Espèce des arbres et espacement | PPAM | Rendement de la culture en AF en % par rapport à une monoculture | | Commentaires |
|------------------|--|-----------------------------|--|-------|------------------------------|
| | | | biomasse | huile | |
| Pantnagar, India | <i>Populus deltoides</i> 5 × 4 m | <i>Cymbopogon flexuosus</i> | 82 | 82 | Résultats moyennés sur 5 ans |
| | | <i>C. martinii</i> | 96 | 86 | |
| | <i>Eucalyptus</i> hybrid 2.5 × 2.5 m | <i>C. flexuosus</i> | 96 | 90 | |
| | | <i>C. martinii</i> | 100 | 86 | |
| Pantnagar, India | <i>Populus deltoides</i> 5 × 4 m | <i>Mentha arvensis</i> | 90 | 90 | Résultats moyennés sur 3 ans |
| | | <i>M. piperita</i> | 85 | 88 | |
| | | <i>M. citrata</i> | 90 | 90 | |
| | | <i>M. spicata</i> | 87 | 87 | |
| | | <i>C. flexuosus</i> | 99 | 97 | |
| | | <i>C. martinii</i> | 99 | 98 | |
| | | <i>C. winterianus</i> | 98 | 99 | |
| Hyderabad, India | <i>Eucalyptus citriodora</i> 3 × 2 m | <i>C. flexuosus</i> | 87 | 87 | Résultats moyennés sur 2 ans |
| | | <i>C. martinii</i> | 87 | 87 | |
| | | <i>C. winterianus</i> | 112 | 91 | |
| | | <i>Pelargonium sp.</i> | 91 | 90 | |
| Nepal | <i>Dalbergia sissoo</i> 10 × 2 to 8 m | <i>C. winterianus</i> | – | 100 | Résultats moyennés sur 2 ans |

Annexe J : Principaux composés phytochimiques présents dans *Melissa officinalis* L.
(adapté de SHAKERI *et al.*, 2016)

| No. | Classification | Composant chimique | Partie de la plante |
|-----|---------------------------|---|---------------------|
| 1 | Oxygenated monoterpene | Geranial | Parties aériennes |
| 2 | Oxygenated monoterpene | Neral | Parties aériennes |
| 3 | Oxygenated monoterpene | Citronellal | Parties aériennes |
| 4 | Oxygenated monoterpene | Geraniol | Parties aériennes |
| 5 | Oxygenated monoterpene | Decadienal | Feuilles |
| 6 | Oxygenated monoterpene | Carvacrol | Feuilles |
| 7 | Oxygenated monoterpene | Methyl citronellate | Feuilles |
| 8 | Sesquiterpene hydrocarbon | β -Cubebene | Parties aériennes |
| 9 | Sesquiterpene hydrocarbon | β -Caryophyllene | Parties aériennes |
| 10 | Triterpene | Ursolic acid | Parties aériennes |
| 11 | Triterpene | Oleanolic acid | Parties aériennes |
| 12 | Triterpene | 3 β ,16 β ,23-Trihydroxy-13,28-epoxyurs-11-ene-3-O- β -D-glucopyranoside | Tiges et feuilles |
| 13 | Triterpene | 3,23-Disulfate ester of 3 β ,19 α ,23-trihydroxyurs-12-en-28-oic acid | Tiges et Feuilles |
| 14 | Triterpene | 3,23-Disulfate ester of 2 α ,3 β ,19 α ,23-tetrahydroxyurs-12-en-28-oic acid | Tiges et feuille |
| 15 | Triterpene | 3,23-Disulfate ester of 2 α ,3 β ,19 α ,23-tetrahydroxyurs-12-en-28-oic acid 28-O- β -D-glucopyranoside | Tiges et feuille |
| 16 | Triterpene | 3,23-Disulfate ester of 3 β ,23,29-trihydroxyolean-12-en-28-oic acid | Tiges et feuille |
| 17 | Triterpene | 3,23-Disulfate ester of 2 α ,3 β ,23,29-tetrahydroxyolean-12-en-28-oic acid | Tiges et feuille |
| 18 | Triterpene | 3,23-Disulfate ester of 2 α ,3 β -23,29- tetrahydroxyolean-12-ene-28-oic acid, 28-O- β -D-glucopyranoside | Feuilles |
| 19 | Triterpene | 23-Monosulfate ester of 2 α ,23-dihydroxyurs-12-ene-28-oic acid, 3-O- β -D-glucopyranoside | Feuilles |
| 20 | Phenolic acid | Rosmarinic acid | Sommités |
| 21 | Phenolic acid | 3-(3,4-dihydroxyphenyl)-Lactic acid | Parties aériennes |
| 22 | Phenolic acid | Caffeic acid | Parties aériennes |
| 23 | Phenolic acid | Lithospermic acid A | Parties aériennes |
| 24 | Phenolic acid | Salvianolic acid F | Parties aériennes |
| 25 | Phenolic acid | Salvianolic acid A | Parties aériennes |
| 26 | Phenolic acid | Salvianolic acid C | Parties aériennes |
| 27 | Phenolic acid | Salvianolic acid B | Parties aériennes |
| 28 | Phenolic acid | Sagerinic acid | Parties aériennes |
| 29 | Phenolic acid | Yunnaneic acid F | Parties aériennes |
| 30 | Phenolic acid | Chlorogenic acid | Feuilles |
| 31 | Phenolic acid | Gallic acid | Feuilles |
| 32 | Phenolic acid | m-Coumaric acid | Feuilles |
| 33 | Phenolic acid | Melitric acid A | Parties aériennes |
| 34 | Phenolic acid | Melitric acid B | Parties aériennes |
| 35 | Phenolic acid | Ellagic acid | Parties aériennes |
| 36 | Flavone glycoside | Luteolin 3'-O- β -D-glucuronide | Feuilles |
| 37 | Flavone glycoside | Luteolin 7-O-glucoside | Feuilles |
| 38 | Flavone glycoside | Apigenin 7-O-glucoside | Feuilles |
| 39 | Flavonol glycoside | Isoquercitrin | Feuilles |
| 40 | Flavonol | Rhamnocitrin | Feuilles |
| 41 | Flavone glycoside | luteolin 7-O- β -D-glucopyranoside-3'-O- β -D-glucuronopyranoside | Feuilles |
| 42 | Flavone | Apigenin | Feuilles |
| 43 | Flavone glycoside | Luteolin 7-O- β -D-glucuronopyranoside | Feuilles |
| 44 | Flavone | Luteolin | Feuilles |
| 45 | Flavone glycoside | Apigenin 7-O- β -D-glucopyranoside | Feuilles |
| 46 | Flavone glycoside | Luteolin 3'-O- β -D-glucuronopyranoside | Feuilles |
| 47 | Flavanone glycoside | Hesperidin | Feuilles |
| 48 | Flavanone | Hesperetin | Feuilles |
| 49 | Flavanone glycoside | Eriodictyol-7-O-glucoside | Feuilles |
| 50 | Flavanone glycoside | Naringin | Feuilles |
| 51 | Flavanone | Naringenin | Feuilles |
| 52 | Flavanol | Catechin | Parties aériennes |
| 53 | Flavanol | epi-Catechin | Parties aériennes |
| 54 | flavonol glycoside | Rutin | Parties aériennes |

Annexe K : Principaux composés phytochimiques présents dans l'HE de *Aloysia citrodora*
Palau (adapté de ARGYROPOULOU *et al.*, 2007)

| Composants | Composition (%) | |
|---|-------------------|-------------------|
| | En mai | En septembre |
| α -Pinene ^d | 0.4 ± 0 | 1.0 ± 0.1 |
| Sabinene ^d | 0.7 ± 0 | 1.8 ± 0 |
| 6-Methyl-5-hepten-2-one ^d | 0.4 ± 0.1 | 0.5 ± 0 |
| Myrcene ^d | 0.6 ± 0 | 0.7 ± 0 |
| Limonene^d | 5.8 ± 0.1 | 17.7 ± 0.5 |
| (Z)- β -Ocimene ^d | 1.3 ± 0.1 | 1.9 ± 0.1 |
| γ -Terpinene | — | 0.1 ± 0 |
| <i>cis</i> -Sabinene hydrate ^d | 0.2 ± 0 | 0.4 ± 0 |
| Linalool ^d | 0.3 ± 0 | 0.4 ± 0 |
| <i>trans</i> -Sabinene hydrate ^d | 0.3 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 |
| <i>trans</i> -Chrysanthemal ^d | 0.3 ± 0.1 | 0.5 ± 0 |
| <i>cis</i> -Chrysanthenol | 0.5 ± 0 | 0.6 ± 0 |
| Terpinen-4-ol ^d | — | 0.2 ± 0 |
| <i>trans</i> -Chrysanthenol | 0.6 ± 0 | 1.0 ± 0 |
| α -Terpineol ^d | 0.9 ± 0 | 1.8 ± 0 |
| Nerol ^d | 0.9 ± 0.1 | 0.8 ± 0.3 |
| Neral^d | 24.5 ± 5.5 | 21.8 ± 0.6 |
| Geraniol ^d | 6.0 ± 5.5 | 0.8 ± 0.1 |
| Geranial^d | 38.7 ± 0.4 | 26.8 ± 0.1 |
| δ -Elemene ^d | 0.3 ± 0 | 0.2 ± 0 |
| α -Cubebene | tr ^c | — |
| α -Copaene | 0.1 ± 0 | tr ^c |
| Geranyl acetate ^d | 1.1 ± 0 | 0.8 ± 0 |
| β -Cubebene | 0.1 ± 0 | 0.2 ± 0 |
| <i>cis</i> - α -Bergamotene | 0.1 ± 0 | — |
| α -Cedrene | 0.2 ± 0 | 0.3 ± 0 |
| β -Caryophyllene ^d | 1.8 ± 0 | 1.6 ± 0 |
| β -Copaene | 0.1 ± 0 | tr ^c |
| β -Gurjunene | tr ^c | — |
| α -Caryophyllene | — | 0.1 ± 0 |
| Aromadendrene ^d | 0.1 ± 0 | — |
| «Allo» -aromadendrene | 0.2 ± 0 | 0.1 ± 0 |
| β -Acoradiene | 0.2 ± 0 | — |
| Geranyl propanoate ^d | 0.2 ± 0 | 0.1 ± 0 |
| Germacrene D ^d + | — | — |
| α -Curcumene ^d | 3.1 ± 0 | 2.5 ± 0 |
| α -Zingiberene | 0.6 ± 0 | 0.3 ± 0 |
| Bicyclogermacrene ^d | 2.4 ± 0 | 1.2 ± 0 |
| δ -Cadinene | 0.3 ± 0 | 0.2 ± 0 |
| <i>trans</i> -Cadina-1(2)-4-diene | 0.1 ± 0 | tr ^c |
| α -Cadinene ^d | 0.1 ± 0.1 | 0.2 ± 0.1 |
| (<i>E</i>)-Nerolidol ^d | 0.9 ± 0.2 | 0.9 ± 0.1 |
| Germacrene-D-4-ol ^d | 1.0 ± 0.1 | 2.0 ± 0.2 |
| Spathulenol ^d | 0.9 ± 0 | 3.1 ± 1.2 |
| Caryophyllene oxide ^d | 0.8 ± 0.1 | 0.9 ± 1.2 |
| <i>epi</i> - α -Cadinol ^d | 0.7 ± 0 | 0.8 ± 0.1 |
| α -Cadinol | — | 0.5 ± 0 |
| Total | 97.8 | 95.1 |

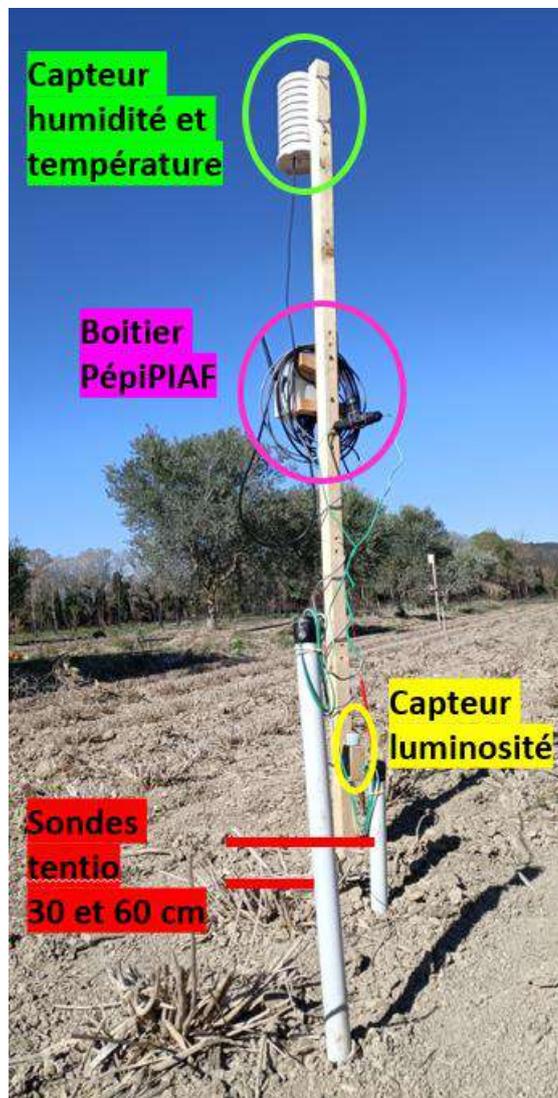
° Trace : ≤0.06%

Annexe L : Dates des différentes mesures sur la verveine et la mélisse

| Date | Culture | Hauteur | Largeur | Stade phénologique | Récolte |
|------------|----------|---------|---------|--------------------|---------|
| 05/04/2022 | Mélisse | x | x | x | |
| 11/04/2022 | Mélisse | x | x | x | |
| 25/04/2022 | Mélisse | x | x | x | |
| 25/04/2022 | Verveine | x | x | x | |
| 12/05/2022 | Mélisse | x | x | x | |
| 12/05/2022 | Verveine | x | x | x | |
| 20/05/2022 | Verveine | x | x | x | |
| 24/05/2022 | Mélisse | x | x | x | |
| 07/06/2022 | Mélisse | x | x | x | x |
| 07/06/2022 | Verveine | x | x | x | |
| 14/06/2022 | Verveine | x | x | x | |
| 23/06/2022 | Verveine | x | x | x | x |

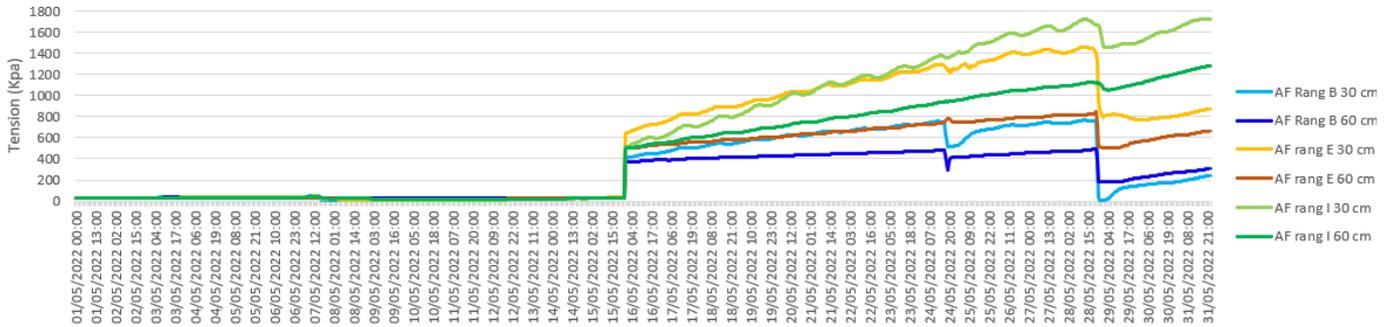
Annexe M : Photographies des installations des boitiers e-pepiPIAF 1.1 dans la parcelle de verveine

Le cache protégeant le capteur d'humidité (photo de gauche) et de température a ensuite été remplacé par un abri en bois (photos de droite) laissant passer l'air pour éviter un effet de serre.

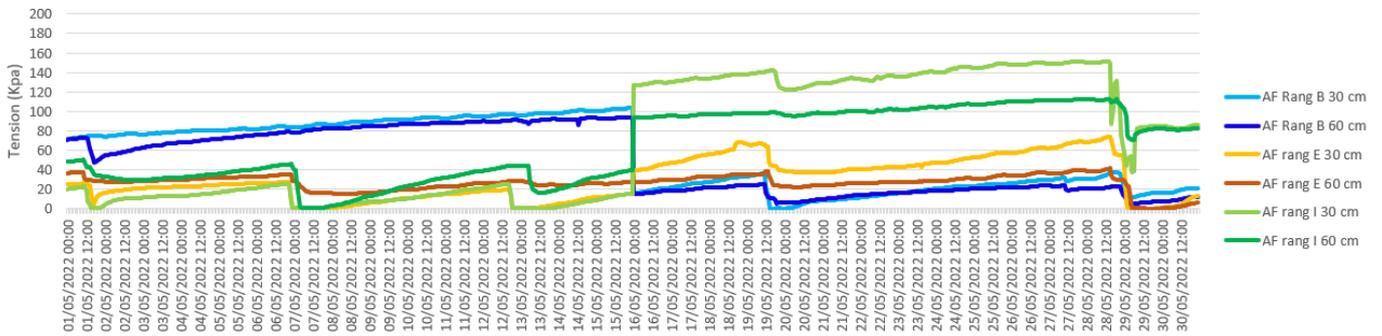


Annexe N : Tension (Kpa) dans le sol à 30 et 60 cm de profondeur dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière au cours des mois de mai, juin et aout 2022

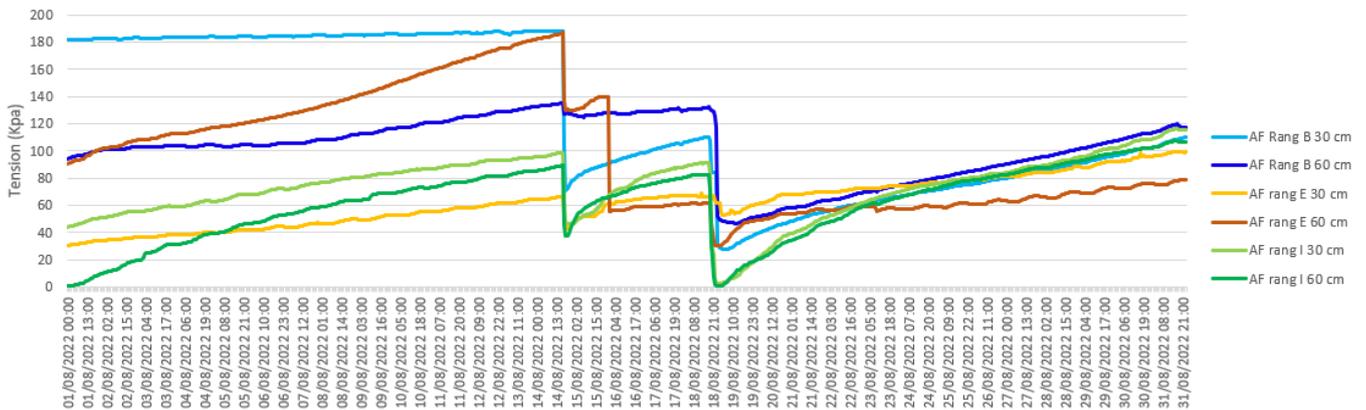
Tension (Kpa) dans le sol à 30 et 60 cm de profondeur dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière au mois de mai



Tension (Kpa) dans le sol à 30 et 60 cm de profondeur dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière au mois de juin



Tension (Kpa) dans le sol à 30 et 60 cm de profondeur dans les différentes modalités de la parcelle agroforestière au mois d'aout



Annexe O : Composition (%) phytochimique mesurée de l'HE de *Melissa officinalis* L. en fonction des rangs

| Composants | A-B | C-D | E-F | G-H | I-J | p-value | Test |
|-------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------|---|
| Sabinène | 0,019 ± 0,020 a | 0,034 ± 0,016 a | 0 ± 0 b | 0 ± 0 b | 0 ± 0 b | 0,00016*** | Test de Kruskal-Wallis + Test post hoc de Dunn |
| b-pinène | 0,609 ± 0,074 | 0,583 ± 0,074 | 0,489 ± 0,021 | 0,532 ± 0,087 | 0,534 ± 0,044 | 0,255 | ANOVA |
| Methyl heptenone | 0,282 ± 0,047 | 0,253 ± 0,013 | 0,269 ± 0,052 | 0,299 ± 0,041 | 0,345 ± 0,075 | 0,275 | ANOVA |
| Cis-ocimène | 0,082 ± 0,005 | 0,080 ± 0,010 | 0,88 ± 0,009 | 0,093 ± 0,011 | 0,084 ± 0,010 | 0,515 | ANOVA |
| Trans-ocimène | 0,615 ± 0,048 | 0,625 ± 0,099 | 0,694 ± 0,065 | 0,756 ± 0,073 | 0,710 ± 0,071 | 0,999 | ANOVA |
| Linalol | 0,586 ± 0,060 | 0,595 ± 0,113 | 0,539 ± 0,152 | 0,653 ± 0,221 | 0,560 ± 0,133 | 0,894 | ANOVA |
| Citronellal | 7,153 ± 0,982 | 6,236 ± 0,478 | 6,051 ± 0,864 | 6,649 ± 0,227 | 6,150 ± 0,778 | 0,371 | ANOVA |
| Citronellol | 0,210 ± 0,033 | 0,170 ± 0,034 | 0,152 ± 0,023 | 0,175 ± 0,026 | 0,146 ± 0,018 | 0,109 | ANOVA |
| Neral | 14,413 ± 3,553 | 13,607 ± 1,557 | 14,720 ± 1,291 | 15,073 ± 0,459 | 15,866 ± 3,082 | 0,809 | ANOVA |
| Geraniol | 0,174 ± 0,041 | 0,146 ± 0,047 | 0,135 ± 0,006 | 0,157 ± 0,005 | 0,152 ± 0,016 | 0,604 | ANOVA |
| Geranial | 19,305 ± 5,200 | 18,443 ± 2,194 | 19,760 ± 1,641 | 20,184 ± 0,871 | 21,051 ± 4,116 | 0,89 | ANOVA |
| Eugenol | 0,874 ± 0,156 | 0,953 ± 0,106 | 0,913 ± 0,103 | 0,876 ± 0,038 | 0,875 ± 0,183 | 0,921 | ANOVA |
| b-caryophyllene | 13,143 ± 1,734 | 17,645 ± 0,454 | 17,061 ± 1,383 | 16,635 ± 0,634 | 15,466 ± 2,472 | 0,498 | ANOVA |
| d-germacrène | 8,100 ± 1,132 | 9,859 ± 1,542 | 9,380 ± 1,082 | 9,037 ± 0,501 | 8,830 ± 2,927 | 0,486 | ANOVA |
| Caryophyllene oxyde | 5,299 ± 0,941 | 5,074 ± 0,161 | 5,208 ± 0,571 | 4,826 ± 0,692 | 4,868 ± 1,315 | 0,891 | ANOVA |
| Somme (neral+ geranial) | 33,719 ± 8,752 | 32,050 ± 3,750 | 34,480 ± 1,060 | 35,257 ± 0,859 | 36,917 ± 7,198 | 0,858 | ANOVA |

Annexe P : Composition (%) phytochimique mesurée de l'extrait de *Aloysia citrodora*
Palau en fonction des rangs

| Composants | A-B | C-D | E-F | G-H | I-J | p-value | Test |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|--|
| α -Thujene | 0,010 \pm 0,00 | 0,007 \pm 0,006 | 0,003 \pm 0,006 | 0,003 \pm 0,006 | 0,003 \pm 0,006 | 0,406 | Test de Kruskal-Wallis |
| α -Pinene | 0,027 \pm 0,006 | 0,050 \pm 0,053 | 0,027 \pm 0,012 | 0,027 \pm 0,021 | 0,023 \pm 0,015 | 0,9717 | Test de Kruskal-Wallis |
| Sabinène | 0,08 \pm 0,023 | 0,07 \pm 0,04 | 0,06 \pm 0,015 | 0,06 \pm 0,046 | 0,07 \pm 0,045 | 0,984 | ANOVA |
| β -pinène | 0,00 \pm 0,006 | 0,01 \pm 0,006 | 0,00 \pm 0,006 | 0,00 \pm 0,006 | 0,00 \pm 0,006 | 0,9041 | Test de Kruskal-Wallis |
| 1-Octen-3-ol | 0,01 \pm 0 | 0,01 \pm 0,006 | 0,01 \pm 0 | 0,01 \pm 0 | 0,01 \pm 0 | 0,406 | Test de Kruskal-Wallis |
| 6-methyl-Hept-5-en-2-one | 0,06 \pm 0,01 | 0,04 \pm 0 | 0,04 \pm 0,006 | 0,05 \pm 0,015 | 0,06 \pm 0,01 | 0,0812 | ANOVA |
| Myrcene | 0,03 \pm 0,005 | 0,02 \pm 0,01 | 0,02 \pm 0,006 | 0,02 \pm 0,006 | 0,02 \pm 0,006 | 0,3541 | Test de Kruskal-Wallis |
| D-Limonene | 0,72 \pm 0,165 | 0,55 \pm 0,301 | 0,56 \pm 0,147 | 0,52 \pm 0,246 | 0,69 \pm 0,356 | 0,823 | ANOVA |
| Eucalyptol | 0,52 \pm 0,104 | 0,37 \pm 0,19 | 0,36 \pm 0,09 | 0,31 \pm 0,095 | 0,48 \pm 0,25 | 0,486 | ANOVA |
| (Z)- β -Ocimene | 0,00 \pm 0 | 0,00 \pm 0 | 0,00 \pm 0,006 | 0,00 \pm 0,006 | 0,00 \pm 0,006 | 0,6747 | Test de Kruskal-Wallis |
| (E)- β -Ocimene | 0,04 \pm 0 | 0,03 \pm 0,017 | 0,04 \pm 0,017 | 0,04 \pm 0,023 | 0,05 \pm 0,042 | 0,9443 | Test de Kruskal-Wallis |
| cis-Sabinène hydrate | 0,15 \pm 0,011 a | 0,11 \pm 0,021 b | 0,10 \pm 0,020 b | 0,09 \pm 0,01 b | 0,13 \pm 0,023 ab | 0,00645** | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Linalol | 0,20 \pm 0,032 | 0,14 \pm 0,029 | 0,16 \pm 0,023 | 0,015 \pm 0,017 | 0,016 \pm 0,025 | 0,177 | ANOVA |
| Lavandulol | 0,00 \pm 0 | NA | NA |
| Citronellal | 0,02 \pm 0 | 0,01 \pm 0,005 | 0,02 \pm 0,01 | 0,02 \pm 0,01 | 0,03 \pm 0,017 | 0,4699 | Test de Kruskal-Wallis |
| Isogeraniol + rose furane oxyde | 0,05 \pm 0,006 | 0,04 \pm 0,01 | 0,04 \pm 0,006 | 0,05 \pm 0,025 | 0,05 \pm 0,01 | 0,2761 | Test de Kruskal-Wallis |
| Isogeraniol | 0,11 \pm 0,015 | 0,08 \pm 0,006 | 0,08 \pm 0,006 | 0,07 \pm 0,006 | 0,09 \pm 0,036 | 0,1391 | Test de Kruskal-Wallis |
| α -Terpineol | 0,040 \pm 0,035 a | 0,28 \pm 0,035 b | 0,28 \pm 0,021 b | 0,25 \pm 0,02 b | 0,33 \pm 0,045 ab | 0,00142** | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Nerol | 0,24 \pm 0,04 a | 0,18 \pm 0,031 ab | 0,14 \pm 0,058 b | 0,16 \pm 0,015 ab | 0,20 \pm 0,021 ab | 0,0439* | ANOVA + test post hoc de Tukey |
| Citronellol | 6,75 \pm 1,43 | 4,99 \pm 0,99 | 4,92 \pm 0,24 | 4,48 \pm 0,18 | 5,27 \pm 1,50 | 0,156 | ANOVA |
| Neral | 6,75 \pm 1,43 | 4,99 \pm 0,99 | 4,92 \pm 0,24 | 4,48 \pm 0,18 | 5,27 \pm 1,50 | 0,156 | ANOVA |
| Geraniol | 0,07 \pm 0,026 | 0,06 \pm 0,021 | 0,06 \pm 0,01 | 0,06 \pm 0,006 | 0,07 \pm 0,031 | 0,981 | ANOVA |
| Geraniol | 11,14 \pm 2,34 | 8,45 \pm 2,04 | 8,28 \pm 0,494 | 7,67 \pm 0,79 | 8,55 \pm 2,479 | 0,243 | ANOVA |
| Geranyl acetate | 0,61 \pm 0,13 | 0,43 \pm 0,038 | 0,46 \pm 0,05 | 0,44 \pm 0,043 | 0,53 \pm 0,094 | 0,1408 | Test de Kruskal-Wallis |
| β -Bourbonene | 0,13 \pm 0,025 | 0,08 \pm 0,015 | 0,08 \pm 0,01 | 0,07 \pm 0,01 | 0,10 \pm 0,02 | 0,06095 | Test de Kruskal-Wallis |
| α -Funebrene | 0,02 \pm 0,01 | 0,01 \pm 0,006 | 0,01 \pm 0,006 | 0,01 \pm 0,006 | 0,01 \pm 0,006 | 0,7765 | Test de Kruskal-Wallis |
| α -Cedrene | 0,08 \pm 0,095 | 0,02 \pm 0 | 0,02 \pm 0,006 | 0,06 \pm 0,078 | 0,04 \pm 0,021 | 0,3069 | Test de Kruskal-Wallis |
| (E)-Caryophyllene | 1,01 \pm 0,293 | 0,75 \pm 0,04 | 0,85 \pm 0,153 | 0,76 \pm 0,255 | 0,48 \pm 0,465 | 0,296 | ANOVA |
| α -Humulene | 0,13 \pm 0,025 | 0,10 \pm 0,01 | 0,08 \pm 0,006 | 0,09 \pm 0,006 | 0,10 \pm 0,025 | 0,101 | Test de Kruskal-Wallis |
| 9-epi-(E)-Caryophyllene | 0,00 \pm 0 | NA | NA |
| γ -Muurolene | 0,03 \pm 0,01 | 0,02 \pm 0,006 | 0,02 \pm 0,006 | 0,02 \pm 0 | 0,02 \pm 0,006 | 0,157 | Test de Kruskal-Wallis |
| α -Zingiberene | 0,00 \pm 0 | NA | NA |
| Bicyclgermacrene | 0,30 \pm 0,072 | 0,19 \pm 0,03 | 0,20 \pm 0,015 | 0,17 \pm 0,015 | 0,23 \pm 0,05 | 0,09215 | Test de Kruskal-Wallis |
| β -Curcumene | 0,22 \pm 0,066 | 0,13 \pm 0,038 | 0,14 \pm 0,03 | 0,15 \pm 0,06 | 0,14 \pm 0,038 | 0,215 | ANOVA |
| γ -Cadinene | 0,04 \pm 0 | 0,03 \pm 0,012 | 0,02 \pm 0,006 | 0,02 \pm 0,006 | 0,03 \pm 0,012 | 0,1976 | Test de Kruskal-Wallis |
| Cubelol | 0,10 \pm 0,012 | 0,07 \pm 0,02 | 0,06 \pm 0,012 | 0,08 \pm 0,012 | 0,08 \pm 0,02 | 0,221 | ANOVA |
| (E)-Nerolidol | 0,30 \pm 0,06 a | 0,22 \pm 0,01 ab | 0,20 \pm 0,006 bc | 0,18 \pm 0,006 c | 0,22 \pm 0,025 ab | 0,01716* | Test de Kruskal-Wallis + test post hoc de Dunn |
| Caryophyllene oxide | 1,81 \pm 0,336 | 1,33 \pm 0,08 | 1,32 \pm 0,144 | 1,32 \pm 0,043 | 1,45 \pm 0,259 | 0,1395 | Test de Kruskal-Wallis |

Annexe Q : Photographies de l'ombrage dans la parcelle agroforestière au mois d'avril à différentes heures de la journée

