



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**2015-2016**

**MASTER FAGE**  
**Biologie et Ecologie pour la Forêt,**  
**l'Agronomie et l'Environnement**

**Spécialité**  
**Milieux Naturels**

**ÉTUDE BIOCLIMATIQUE D'UN VERGER-MARAÎCHER : QUELLES  
INFLUENCES DU CONTEXTE PAYSAGER ET DE LA GESTION DU  
SOL SUR LE MICROCLIMAT POUR LA FERTILITÉ DU SOL ?**

**Mélissa WACHS**

**Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 06/09/2016**

**Tuteur : Pierre SCHEERCOSSE, Chargé d'études R&D agroforesterie**

**Co-encadrants : Vincent BUSTILLO et Juliette GRIMALDI, CESBIO, Université de  
Toulouse, CNES/CNRS/IRD/UPS, Toulouse, France**

**Enseignant référent : Alice MICHELOT-ANTALIK, maître de conférences**

**Structure d'accueil : Association Arbre & Paysage 32 - 93,  
route de Pessan - 32000 AUCH**

## Remerciements

Je tiens à remercier Pierre Scheercousse pour sa confiance pour la réalisation de ce stage. Merci pour l'autonomie accordée. J'ai pu lors de ce stage faire de nombreuses rencontres enrichissantes et découvrir de nouveaux horizons. Merci également à l'équipe d'Arbre & Paysage 32 pour son accueil à Auch, ainsi qu'à Christine pour m'avoir hébergée sur ses terres.

Merci également à Vincent Bustillo et Juliette Grimaldi pour leur aide sur la partie scientifique et technique. Merci à Juliette pour ses retours et ses conseils pour l'analyse des données récoltées.

Un très grand merci à Robert Flamand pour son accueil chaleureux, ainsi qu'à toute l'équipe du jardin d'Aalbeke, pour leur patience et leur disponibilité, ainsi que les moments partagés : Bernard, Michel, Foy, Guilaine, Rolland, Samuel. Merci aussi à Gilbert et Josine Cardon pour le partage de leur jardin, ainsi qu'à Ignace pour la visite.

Merci à Véronique et Pascal, de l'équipe de « La Prairie », pour leur accueil et leur confiance, et pour avoir répondu à mes questions.

Merci à la Fondation de France d'avoir financé ce travail, en espérant que d'autres projets se développent.

# Sommaire

|  |    |
|--|----|
| I. Introduction  | 1  |
| A. Contexte actuel de la filière maraîchère et perspectives d'évolution  | 1  |
| 1. Difficultés de la filière maraîchère actuelle   | 1  |
| 2. Enjeux agricoles et intérêts de l'agroforesterie  | 1  |
| B. Influence des rangées d'arbres et de la gestion du sol sur le microclimat                                   | 2  |
| 1. Microclimat   | 2  |
| 2. Impacts des haies   | 3  |
| a) Sur le rayonnement  | 3  |
| b) Sur l'humidité et les précipitations  | 3  |
| c) Sur le vent   | 3  |
| 3. Impacts de la gestion du sol  | 4  |
| a) Sur ses propriétés physico-chimiques  | 4  |
| b) Effets du paillage sur le sol et les cultures   | 5  |
| C. Organisme d'accueil : Association « Arbre & Paysage 32 »  | 5  |
| 1. Présentation de la structure  | 5  |
| 2. Missions de l'association   | 6  |
| 3. Cadre de cette étude  | 6  |
| D. Objectifs poursuivis  | 7  |
| II. Matériel et méthodes   | 7  |
| A. Description des sites d'étude   | 7  |
| 1. Climat régional et propriétés édaphiques des sites d'étude  | 7  |
| 2. Le « jardin d'Aalbeke »   | 7  |
| 3. « La Prairie », parcelle de référence   | 8  |
| B. Design expérimental   | 9  |
| C. Caractérisation du contexte paysager  | 9  |
| D. Suivis microclimatiques   | 10 |
| 1. Climat de référence à la station météorologique   | 10 |
| 2. Mesures spatialisées  | 10 |
| a) Principe d'échantillonnage  | 10 |
| b) Mesures de température du sol   | 10 |
| c) Mesures du rayonnement global   | 11 |
| d) Mesures d'humidité du sol   | 11 |
| e) Mesures de vitesse et direction du vent   | 11 |
| E. Identification de patterns climatiques  | 11 |
| 1. Classification des journées selon leur valeur d'évapotranspiration  | 11 |
| 2. Analyse des séries temporelles de température par type de journée   | 12 |
| 3. Analyse des autres variables microclimatiques   | 13 |
| F. Confrontation des facteurs paysagers et des variables microclimatiques par Analyse en Composante Principale | 13 |
| III. Résultats   | 13 |
| A. Caractérisation du paysage  | 13 |
| B. Analyse du microclimat  | 13 |
| 1. Analyse des indices journaliers de température  | 13 |
| (1) Moyennes journalières  | 13 |
| (2) Amplitude journalière  | 13 |
| (3) QT10   | 14 |
| (4) QT90   | 15 |
| 2. Analyse de la température du sol par type de gestion du sol   | 15 |
| 3. Patterns de vent, d'humidité de sol et de rayonnement   | 16 |
| C. Contribution des variables paysagères aux variables microclimatiques  | 16 |
| IV. Discussion   | 17 |
| A. Tendances de température du sol   | 17 |
| B. Effets de la gestion du sol sur son microclimat   | 17 |
| C. Effets du contexte paysager sur le microclimat du sol   | 18 |
| D. Influence potentielle de la gestion du sol et du contexte paysager sur la production maraîchère             | 19 |
| V. Conclusion  | 19 |
| VI. Bibliographie  | 22 |
| Annexes  | 1  |

## Table des illustrations

### **Figures**

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : Effet des arbres sur le rayonnement. D'après Guyot et Verbrugghe (1976).  | 3  |
| Figure 2 : Localisation du jardin d'Aalbeke en Europe et des points d'échantillonnage sur sa surface (à gauche) et sur la parcelle de référence (à droite) | 8  |
| Figure 3 : Distinction des journées de mesure sur le critère de leur valeur d'ETP, et caractéristiques des deux groupes identifiés                         | 12 |
| Figure 4 : Température du sol en fonction du type de gestion   | 14 |
| Figure 5 : Représentation des variables utilisées pour l'ACP lors des journées à faible évapotranspiration   | 15 |
| Figure 6 : Représentation des variables utilisées pour l'ACP lors des journées à forte évapotranspiration  | 15 |

### **Tables**

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1 : Variables paysagères et outils utilisés pour la description du contexte paysager        | 9  |
| Tableau 2 : Variables échantillonnées et modalités d'acquisition                                    | 10 |
| Tableau 3 : Composition des groupes de points déterminés par classification ascendante hiérarchique | 13 |

# I. INTRODUCTION

## A. Contexte actuel de la filière maraîchère et perspectives d'évolution

### 1. Difficultés de la filière maraîchère actuelle

Les produits du maraîchage et de l'horticulture représentent près de 30% de la production végétale européenne. La France est, derrière l'Italie et l'Espagne, le 3e pays en terme de surface cultivée en maraîchage et de production de fruits et légumes. Moins de 2% de la surface agricole utile française sont cependant utilisés pour l'arboriculture fruitière et l'horticulture (légumes et plantes ornementales). 174000 ha produisent ainsi 3 millions de tonnes de fruits, 254000 ha donnent 6 millions de tonnes de légumes, et 125000 ha apportent 5,4 millions de tonnes de pomme de terre (Source : Eurostat 2006). Une cinquantaine d'espèces, annuelles ou pérennes, est cultivée, en systèmes de production très variés et de manière plus ou moins extensive.

Depuis les années 2000, la filière maraîchère a été fragilisée économiquement par la diminution régulière de ses surfaces et de sa production, tandis que ses rendements restent globalement stables. De plus, les prix de première mise au marché sont aléatoires et le solde des échanges de fruits et légumes de plus en plus déficitaire.

Par ailleurs, la qualité nutritionnelle des fruits et légumes actuels a été divisée par un facteur allant de 2 à 100 selon les espèces, par rapport aux produits d'il y a 50 ans. La sélection, les systèmes de production et les conditions de croissance sont à l'origine de cette évolution. Les légumes produits en agriculture biologique contiennent notamment des quantités d'anti-oxydants 30% supérieures par rapport à des légumes cultivés en agriculture conventionnelle. La gestion de la fertilité des sols conditionne la qualité de la production et son rendement. Elle est un enjeu majeur pour obtenir une qualité de produits satisfaisante. Pour retrouver une meilleure qualité nutritionnelle, il est recommandé d'encourager la croissance racinaire, la production d'éléments phytochimiques par les cultures, de diminuer l'irrigation et la fertilisation (Halweil, 2007).

Le changement climatique est un autre facteur impactant la production. Un réchauffement significatif au cours du XXe siècle est en effet observé au niveau global, mais particulièrement dans l'hémisphère nord et sur le continent européen, notamment en France. Les risques de vagues de chaleur, la fréquence d'épisodes de fortes précipitations et la progression de la sécheresse depuis les années 1970 ont été augmentés (GIEC 2007). Ceci induit des perturbations du développement des plantes ainsi que des risques sanitaires accrus.

Dans ce contexte, la reconception des systèmes de production pourrait constituer une piste pour assurer l'avenir économique de la filière ainsi que l'avenir écologique des surfaces agricoles, et répondre aux enjeux de qualité et de quantité de la production. L'évolution vers des agro-écosystèmes est en effet un moyen d'améliorer la gestion du sol à long terme (Hill et MacRae, 1995).

### 2. Enjeux agricoles et intérêts de l'agroforesterie

L'agroforesterie se présente alors comme une voie à explorer. Elle désigne « l'ensemble des systèmes et des techniques d'utilisation des terres où des plantes ligneuses vivaces sont délibérément associées aux cultures ou à la production animale sous forme d'un arrangement spatial ou d'une séquence temporelle prenant place sur une même unité de gestion de la terre. Les systèmes agroforestiers sont caractérisés par des interactions écologiques et économiques entre leurs diverses composantes. » (Lundgren et Raintree (1982), définition officiellement adoptée par le World Agroforestry Center). Ils offrent une perspective nouvelle de développement, s'appuyant sur les trois piliers du développement durable. En effet, sur le plan économique, les arbres ont un effet potentiellement positif sur la

fertilité du sol, à l'instar de l'écosystème forestier, et assureraient une stabilité financière en diversifiant les rendements. Les systèmes agroforestiers permettraient ainsi d'optimiser les surfaces exploitées et les intrants utilisés.

Outre les avantages économiques, les systèmes agroforestiers sont aussi potentiellement avantageux vis à vis de la biodiversité floristique et faunistique puisqu'ils génèrent des paysages complexes et variés. La présence d'arbres et la densification de la végétation diminuent l'érosion éolienne et hydrique, améliorent la fertilité des sols, leur régime hydrique ainsi que leur capacité à épurer l'eau, atténuent la pollution atmosphérique, sonore et olfactive, améliorent la séquestration et le stockage de carbone. La déforestation est limitée et les cultures sont protégées grâce à la stimulation de la microfaune et de la microflore du sol, et à la fixation du sol (De Baets et Lebel, 2007).

Le développement de vergers-maraîchers conduits en agroforesterie pourrait ainsi répondre aux enjeux environnementaux, sociaux et économiques des filières de production de légumes et de fruits. En France, plus de 3000 hectares de nouvelles parcelles agroforestières sont plantés chaque année. À l'échelle de l'Europe, le potentiel de développement de l'agroforesterie est de 90 millions d'hectares de terres agricoles (Dupraz, 2005) et de 50 millions de pâturages (Aertsens et al., 2012).

Encore peu étudiés, les systèmes agroforestiers souffrent d'un manque de références pour leur développement. Différentes initiatives ont vu le jour ces dernières années afin d'évaluer leur niveau de performance, parmi lesquelles on compte notamment des actions menées par le Groupe de Recherche en Agriculture biologique concernant la filière maraîchage. Il vise à améliorer les pratiques et techniques en agriculture biologique, afin de répondre aux enjeux actuels. Il pilote notamment la ferme de la Durette, située dans le sud-est de la France, dont l'objectif est d'expérimenter à l'échelle d'une ferme et en conditions économiques réelles l'association de productions de légumes, d'arbres fruitiers et d'élevage en optimisant la biodiversité cultivée et fonctionnelle. Différents projets de développement de microfermes maraîchères intégrant l'agroforesterie ont également vu le jour, comme la micro-ferme de la Bourdaisière en Indre-et-Loire.

L'enjeu principal réside dans la compréhension des interactions exercées entre les arbres et les cultures. En effet, la croissance d'une plante dépend de sa capacité à capter les ressources en eau, en nutriments et en énergie de son environnement, en compétition avec ses voisins (Monteith et al., 1991). Les interactions entre arbres et cultures se font essentiellement via deux composantes : le microclimat et le sol (Reifsnnyder et Darnhofer, 1989). Le développement de systèmes agroforestiers nécessite donc la connaissance de l'impact des arbres sur le microclimat, afin d'optimiser la conception paysagère de ces systèmes et d'anticiper les répercussions sur la production de légumes et de fruits.

## *B. Influence des rangées d'arbres et de la gestion du sol sur le microclimat*

### *1. Microclimat*

Le microclimat désigne « l'ensemble des conditions climatiques d'un espace homogène très restreint et isolé de son environnement général » (Larousse). Il est défini à l'échelle du mètre et de l'heure et ses facteurs résultent à chaque instant de l'équilibre entre les différentes formes d'échanges d'énergie ayant lieu à la surface du sol ou du couvert végétal (Guyot et Darnhofer, 1987).

Certains paramètres microclimatiques comme le rayonnement, la température et l'humidité du sol sont particulièrement déterminants pour la croissance et le développement des plantes. La température du sol, et plus particulièrement la température de la zone racinaire, peut influencer la survie des plantes et a un effet marqué sur la productivité de nombreuses espèces (Díaz-Pérez et al., 2009 ; Gonzalez-Fuentes et al., 2016). Elle a un effet plus significatif sur la croissance des plantes que la température de l'air (Xu et Huang, 2000).

En effet, les réactions physiologiques des racines sont généralement diminuées par des températures faibles dans la zone racinaire, même lorsque les parties aériennes sont à une température appropriée (Yan et al., 2012).

## 2. Impacts des haies

### a) Sur le rayonnement

L'impact des haies sur le rayonnement dépend des conditions météorologiques. Par temps clair, la haie diminue le rayonnement solaire net reçu par les cultures en occultant une partie du ciel. Il se produit tout de même un effet de réflexion qui compense en partie ce phénomène. L'impact évolue selon la distance à l'arbre et plusieurs effets se combinent, dont l'intensité est encore mal documentée. Deux grands types d'effets sont observés. Le rayonnement solaire net est intercepté dans la zone d'ombrage, mais ceci est compensé par une réflexion accrue. Leur température de surface étant supérieure à la température radiative de l'atmosphère, les haies augmentent également le flux de rayonnement infrarouge thermique qui atteint le sol (figure 1). Le rayonnement infrarouge est donc augmenté au voisinage des haies, par les haies et par le sol, et diminue avec l'éloignement (Guyot et al., 1987).

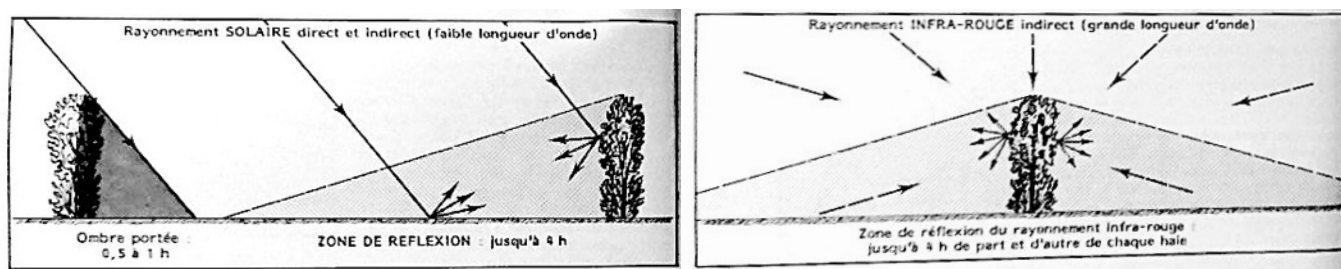


Figure 1 : Effet des arbres sur le rayonnement. D'après Guyot et Verbrugghe (1976).

### b) Sur l'humidité et les précipitations

L'humidité du sol dépend de deux facteurs : les précipitations et l'évapotranspiration réelle. Ces deux facteurs sont modifiés par la présence de haies (Guyot et al., 1987).

En limitant le refroidissement du sol à leur proximité, les haies peuvent réduire le dépôt de rosée. Cependant le ralentissement du vent dans la zone protégée par la haie induit un taux d'humidité de l'air supérieur, donc une température plus faible et un accroissement du dépôt de rosée (Van Eimern et al. 1964 ; Guyot 1963).

La canopée au-dessus du sol retient 1 à 2 mm d'eau lorsque les précipitations sont supérieures à 5 mm, et la quasi totalité dans le cas de précipitations faibles (inférieures à 5 mm). L'évaporation de cette eau de pluie permet de diminuer la quantité d'eau perdue par transpiration des végétaux. Elle a en effet lieu plus rapidement que la transpiration car la résistance de diffusion des stomates n'est pas impliquée (Rutter, 1975). À l'extrémité extérieure de la canopée des arbres, les précipitations s'écoulent sous forme de grosses gouttes ruisselant le long des feuilles et des branches. Elles peuvent ainsi être 10 à 20% supérieures aux précipitations en milieu ouvert (Linskens, 1951). La taille des arbres conditionne donc la localisation de la surface d'égouttement de la pluie depuis la canopée.

### c) Sur le vent

Les brise-vent les plus efficaces sont les haies semi-perméables, hautes et homogènes, qui ont une portée de 15 à 20 fois leur hauteur. Elles modifient la vitesse du vent



au voisinage du sol et affectent ainsi les échanges radiatifs. Elles influent donc sur l'ensemble des facteurs du microclimat.

L'effet du vent sur les températures varie selon la distance à l'arbre. La loi de proportionnalité qui le régit dépend elle-même de la hauteur de la haie. À une distance de 0 à 3 fois la hauteur de l'arbre, la circulation du vent est interrompue et l'amplitude journalière des températures est donc plus réduite : les températures nocturnes sont supérieures, mais les températures diurnes inférieures, par rapport à une situation sans haie. À 7 fois la hauteur de l'arbre, il se produit un phénomène de rabattement turbulent du vent derrière la haie. Cette zone, très brassée, subit de rapides refroidissements de température par rapport à la situation sans haie. Une étude de Corlett (1987), réalisée en Inde, a ainsi montré que le feuillage du millet cultivé en allées présentait une température de 1°C supérieure, dû au vent moins important, à celle mesurée dans les cultures de millet seul.

En ralentissant la vitesse du vent, les arbres maintiennent également les masses d'air superficielles plus proches de la saturation que dans d'autres milieux (Quénol et al., 2006). Les brise-vent permettent ainsi de réduire l'évapotranspiration, même au centre des parcelles (Neumann et Pietrowicz, 1989).

Les arbres constituent des obstacles au vent et modifient ainsi son champ, affectant la chute de la pluie. Le régime de précipitations est donc modifié à l'interface entre arbres et cultures. Le côté sous le vent d'une parcelle arborée reçoit ainsi légèrement moins de précipitations que le côté au vent non perturbé. La surface souffrant de la réduction des précipitations est dépendante de la vitesse et de la direction du vent, mais sa largeur n'excède pas la hauteur des arbres. Ces diminutions de précipitations peuvent atteindre 50% à une distance inférieure à la moitié de la hauteur des arbres. Le ralentissement du vent dans la zone protégée y augmente cependant le volume des précipitations reçues. Les écarts sont d'autant plus élevés que la vitesse du vent est forte. À l'échelle parcellaire, les brise-vent ne modifient pas la quantité globale des précipitations reçues au sol, mais leur répartition horizontale (Darnhofer et al., 1989).

### *3. Impacts de la gestion du sol*

#### *a) Sur ses propriétés physico-chimiques*

La gestion du sol est « l'ensemble des mesures prises annuellement et à long terme pour améliorer et maintenir la productivité du sol » (Ministère de l'agriculture du Nouveau Brunswick). Les modalités de gestion du sol influent sur sa qualité physico-chimique, notamment sur la stabilité des agrégats, le contenu en matière organique, la rétention de l'eau et la conductivité hydraulique à champ saturé. Ces paramètres influencent le rendement des cultures (Crittenden et al., 2015). Le microrelief du sol est surtout influencé par le labour et les précipitations, et peut avoir des effets considérables sur le rythme et la quantité d'érosion hydrique et éolienne (Zobeck et Onstad, 1987). La gestion du sol influe également sur les populations de lombrics, qui stimulent la productivité des cultures (Johnston et al., 2015).

La gestion du sol est donc également un paramètre primordial à prendre en compte dans l'évolution des systèmes de culture vers des modèles répondant aux trois enjeux du développement durable.

Le paillis est une couche d'un matériau, naturel ou artificiel, séparant la surface du sol de l'atmosphère, le paillage étant l'application artificielle de paillis dans le but d'obtenir des changements bénéfiques de l'environnement du sol (Acharya et al., 2005). Cette technique de couverture du sol semble apparaître comme une voie intéressante dans l'amélioration de ses propriétés, à la fois en terme de biodiversité, d'environnement, et de rendement. Teasdale et Abdul-Baki (1997), aux États-Unis, et Samaila et al. (2011), au Nigeria, ont ainsi montré un

effet favorable du paillage naturel en terme de croissance, de développement et de récolte chez la tomate.

### *b) Effets du paillage sur le sol et les cultures*

La présence d'un paillis naturel permet de préserver la qualité de la ressource en eau du sol. Elle diminue l'érosion hydrique et les pertes de phosphate (Bakr et al., 2015).

Les paillis naturels issus de plantes sont les plus intéressants pour le sol car leur décomposition lui apporte de la matière organique, améliorant ainsi sa capacité de rétention en eau et en nutriments. Il est cependant nécessaire de réapprovisionner ces paillis de temps en temps (Pramanik et al., 2015).

Les paillis naturels augmentent également l'activité biologique du sol (Kumar et al., 2014). Les racines apportent des substrats à la biomasse microbienne (Yao et al., 2011) dont l'activité est favorisée par la combinaison d'une température et d'une humidité du sol optimales, comme l'ont montré Kaschuk et al. (2010) dans les écosystèmes brésiliens. L'augmentation du contenu en carbone organique du sol, qui est une des ressources nécessaires aux bactéries, participe sans doute à cette augmentation de l'activité microbienne, en agriculture non-irriguée (Shashidhar et al., 2009).

Le nombre et la biomasse des adventices sont diminués par le paillage, et leur suppression est plus efficace si le paillis utilisé se décompose lentement (Kang et al., 1990). Cependant ceci pourrait être dû à la croissance supérieure des cultures qui occulteraient alors plus la lumière (Kumar et al., 2014). En évitant les éclaboussures de boue sur les feuilles des cultures, le paillage permet de diminuer le risque de pourrissement (Kumar et al., 2014).

Cependant, à la différence des climats tropicaux, on constate en climat tempéré des effets négatifs du paillage sur la croissance des cultures. Ceux-ci surviennent notamment au printemps, lorsque le rayonnement solaire est faible. En effet, le sol paillé demeure humide et froid plus longtemps que le sol nu, retardant ainsi la croissance et le développement des plantes et diminuant alors la durée de la période de croissance (Horton et al., 1996). Le type de paillis utilisé influe également sur la récolte des légumes (Sinkevičienė et al., 2009).

Il est donc important d'investiguer les effets du paillage envisagé afin de pouvoir adapter l'adapter au climat local et aux cultures implantées.

Le microclimat étant un enjeu pour les cultures, notamment maraîchères, à la fois en termes de dynamiques et de valeurs extrêmes, l'agroforesterie et le paillage semblent être des possibles stratégies agro-écologiques pour évoluer vers des systèmes de production plus durables. Dans un contexte de changement climatique, la mise en place de systèmes induisant des microclimats propices aux cultures semble indispensable. L'agroforesterie permettrait-elle de mieux faire face aux aléas climatiques par rapport à de la monoculture ? Le paillage permettrait-il d'influencer le microclimat en faveur des cultures, en milieu tempéré ?

## *C. Organisme d'accueil : Association « Arbre & Paysage 32 »*

### *1. Présentation de la structure*

« Arbre & Paysage 32 » (AP32) est une association indépendante à but non lucratif, de loi 1901, créée en 1990 par des agriculteurs autour de l'arbre champêtre. Association pionnière dans le domaine de la replantation de haies champêtres, elle s'est ensuite développée dans d'autres départements. Cofondatrice de deux structures nationales, l'Association Française de l'Arbre et de la Haie Champêtres (AFAHC) et l'Association Française d'AgroForesterie (AFAF) et d'une structure régionale, l'AFAHC Midi-Pyrénées, elle

visé à promouvoir l'arbre et le paysage dans le Gers (32). Elle compte 850 membres et 9 salariés permanents, généralistes de l'aménagement et du paysage et spécialistes de l'arbre. L'association est agréée pour la protection de la nature et de l'environnement et pour l'éducation populaire.

## *2. Missions de l'association*

L'association oeuvre dans 5 grands domaines : la sensibilisation, le conseil, l'aide à la plantation, l'assistance technique et la recherche et le développement.

La sensibilisation des publics et la diffusion des connaissances et des savoir-faire auprès des acteurs de la société a lieu via l'organisation et la participation à des animations publiques, des interventions pour l'éducation à l'environnement, la formation lors de journées techniques et la publication d'ouvrages. L'assistance et le conseil techniques aident à l'élaboration et l'analyse de projets et à leur accompagnement dans les démarches territoriales, à l'entretien et la gestion, à la valorisation et la diversification des produits issus de l'arbre. Des diagnostics initiaux, des plans de gestion et des projets d'aménagement ainsi que des études paysagères sont réalisés. L'aide à la plantation consiste à assister un propriétaire dans son projet de plantation en le conseillant sur le choix des végétaux et sur la plantation, en lui fournissant les plants, en le formant à la taille des arbres et au montage des dossiers d'aides financières.

L'association a une mission d'intérêt général et un rôle de consultation sur les politiques pour l'eau, la réglementation sur le climat, la Politique Agricole Commune (PAC) et la Trame Verte et Bleue (TVB). Elle participe également à des programmes conventionnés avec le Conseil Régional Midi-Pyrénées, le Conseil Général du Gers et la Fédération des Chasseurs du Gers, et à des programmes cofinancés par l'Union Européenne (Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural, Fonds Européen de Développement Régional et Liaisons Entre Actions de Développement de l'Economie Rurale). Le programme CORIBIOR vise ainsi à renforcer et reconstituer les continuités écologiques favorables à l'accueil et aux déplacements de la faune et la flore sauvages. AP32 participe également à des Comptes d'Affectation Spéciale « Développement Agricole et Rural » comme « Vitiforest », pour la mise en place et l'évaluation de sites pilotes en agroforesterie viticole, ou « parcours avicoles » visant à évaluer les services rendus par la présence d'un parcours et à en améliorer l'efficacité sur la production notamment.

Dans le cadre de sa mission de recherche et développement, AP32 cherche à mettre en place des partenariats entre laboratoires universitaires, services techniques et acteurs de terrain, dans le but d'obtenir des résultats permettant d'orienter les actions des politiques publiques, de les transférer aux professionnels usagers et gestionnaires de l'arbre, de participer à la définition d'un cadre réglementaire et professionnel et d'échanger et collaborer au sein d'un réseau d'acteurs et lors de groupes de travail.

## *3. Cadre de cette étude*

En 2014, Charlotte PASQUIER, alors stagiaire à l'association, a réalisé une analyse systémique du jardin-forêt des Fraternités Ouvrières de Mouscron, cultivé en permaculture. L'objectif était de décrire ces agrosystèmes présentés comme des modèles d'agriculture durables et répondant potentiellement aux enjeux du XXIème siècle. Dans cette optique de développement et de promotion de systèmes durables, l'association AP32 a répondu à un appel à projet lancé par la Fondation de France intitulé : « Agroforesterie en zone tempérée ». L'objectif de l'étude menée dans ce cadre est de caractériser le microclimat d'un verger-maraîcher afin d'apporter des éléments de réflexion et de décision pour l'orientation de maraîchers vers des systèmes agroforestiers. L'encadrement scientifique a été assuré par

Vincent BUSTILLO et Juliette GRIMALDI, respectivement enseignant-chercheur et doctorante au Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO) à Auch (32).

#### *D. Objectifs poursuivis*

Cette étude a donc cherché à évaluer les effets intra-annuels de la gestion du sol et du contexte paysager sur le microclimat d'un verger-maraîcher. Les impacts indirects potentiels sur la production maraîchère ont également été investigués. Les questions suivantes ont été posées : le contexte paysager et la gestion du sol peuvent-ils influencer indirectement la production maraîchère ? Le contexte paysager et la gestion du sol génèrent-ils un microclimat spécifique ? Existe-t-il des liens entre les paramètres microclimatiques (vent, rayonnement, humidité du sol) et la température du sol ? Le contexte paysager et la gestion du sol ont-ils des impacts sur la température du sol et ces impacts diffèrent-ils selon les caractéristiques microclimatiques des journées ?

## **II. MATÉRIEL ET MÉTHODES**

#### *A. Description des sites d'étude*

Deux sites d'étude ont été sélectionnés : le jardin-verger de R. Flamant à Aalbeke, densément planté d'arbres, et le jardin de la Prairie à Mouscron, servant de référence car plantés d'arbres à basse densité.

##### *1. Climat régional et propriétés édaphiques des sites d'étude*

Dans la région d'étude, le sol est limoneux (Portail de l'environnement de Wallonie) et le climat est tempéré océanique. Les extrêmes climatiques sont donc atténués par l'influence de l'océan Atlantique et ce climat est en général caractérisé par des hivers doux et pluvieux et des étés frais et humides.

##### *2. Le « jardin d'Aalbeke »*

Le site d'étude est situé à Aalbeke, dans la province du Hainaut, en Belgique wallonne (50.776056, 3.241149) (figure 2).

Le jardin, appartenant à M. Flamand, est cultivé par 7 personnes qui s'en partagent la production et viennent y travailler ensemble 2 jours par semaine. L'objectif n'est pas de maximiser les rendements mais de consommer sa propre production comprenant un large éventail de variétés, tout en travaillant au jardin de manière raisonnable, ainsi que de créer des liens sociaux et de partager ses connaissances et ses expériences en jardinage.

Le jardin mesure environ 4000m<sup>2</sup>, dont 1470m<sup>2</sup> environ sont cultivés, le reste étant constitué de bandes enherbées plantées d'arbres majoritairement fruitiers (pommiers, poiriers, cerisiers, ...). À l'ouest se trouve un bois d'arbres hauts de 10 à 15m environ, au nord et à l'est une prairie, au sud une route étroite puis des habitations.

Entre 1920 et 1987, le site était travaillé par le grand-père de M. Flamand. Le tiers le plus au nord accueillait des poules, tandis que les deux-tiers restants étaient divisés en 2 parties où étaient cultivés alternativement blé et pommes de terre, en rotation bisannuelle. Les placettes actuellement situées sur la zone où étaient élevées les poules ont d'abord été les plus fertiles, avant que cela ne s'équilibre (R. Flamand, cp).

En 1987, le jardin alors enfriché a été nettoyé et sa transformation imaginée par M. Cardon, concepteur du Jardin des Fraternités Ouvrières de Mouscron. La plupart des arbres y ont alors été plantés, hormis les saules taillés en têtard, sans doute centenaires, qui y sont

toujours présents. Deux rangs de pommiers y ont été remplacés 15 ans plus tard car ils ne donnaient aucun fruit, sans doute parce qu'ils étaient déjà trop formés lors de leur transplantation (R. Flamand, cp).

Aujourd'hui, le jardin est encadré par des haies, et les autres arbres ont été plantés en rangées selon l'axe est-ouest environ. Tous les arbres sont des basses tiges, entretenus suivant la taille Lorette, qui est une taille d'été consistant à supprimer les bourgeons apicaux et les bourgeons intermédiaires verticaux. Cependant, certains arbres n'ont pas été taillés par manque de temps et dépassent aisément les 4m de hauteur. Leurs racines sont plus nombreuses entre 180 et 300cm de l'arbre, c'est-à-dire sous les placettes cultivées, situées à environ 1,20m des haies (Pasquier, 2014).

Les arbres divisent le jardin en 17 placettes. Au sein de chacune d'entre elles, les légumes sont cultivés en rangs selon l'axe nord-sud. Les espèces de légumes sont alternées d'un rang à l'autre afin de limiter la propagation de maladies éventuelles. Les placettes sont motocultées à 15cm de profondeur environ, et régulièrement amendées avec du fumier de cheval ramené presque chaque semaine d'une ferme voisine, et stocké jusqu'à son utilisation. Hormis les légumes dans la serre, les cultures et semis ne sont jamais arrosés, le climat océanique ne laissant jamais la terre sèche pendant de longues périodes.



Figure 2 : Localisation du jardin d'Aalbeke en Europe et des points d'échantillonnage sur sa surface (à gauche) et sur la parcelle de référence (à droite)

### 3. « La Prairie », parcelle de référence

« La Prairie » est une Association Sans But Lucratif (ASBL) située à Mouscron, à 5km à vol d'oiseau du jardin d'Aalbeke (50.732507, 3.213657) (figure 2). Cette ferme d'animation pédagogique a investi le site de la ferme de la Vellerie en 1989.

La zone cultivée en potager a été entièrement labourée en 1989, date de l'arrivée de l'association sur le site. C'était alors un champ d'un seul tenant. Les arbres ont été plantés il y a une vingtaine d'années, âgés alors de 5 ans. Ils ont cependant été plantés trop profond et grossissent trop car ils sont enracinés trop profondément (P. Denauw, jardinier, cp). Le jardin n'est jamais arrosé. Les légumes sont cultivés sur de petites placettes encadrées par des bandes enherbées.

Le site a été choisi pour représenter un cas à faible densité d'arbres. Ce site bénéficie de sa proximité avec le jardin d'Aalbeke, de pratiques culturales similaires, d'un historique et d'une configuration spatiale qui semblaient comparables.

### *B. Design expérimental*

L'approche adoptée consiste dans un premier temps à décrire finement le contexte paysager de chacun des sites sélectionnés. Ensuite, le microclimat qui s'y exprime en termes de tendance générale et de variabilité intra-site est caractérisé. Dans un troisième temps, les deux types d'informations sont croisées afin d'évaluer la contribution des facteurs paysagers aux tendances microclimatiques observées.

Contexte paysager et variabilité micro-climatiques ont été suivis à l'échelle métrique. Les suivis micro-climatiques ont été effectués au cours du printemps et début d'été 2016 et sont analysés à l'échelle journalière.

### *C. Caractérisation du contexte paysager*

Chaque arbre a été géolocalisé avec une précision de 10 cm à l'aide d'un DGPS de type GNSS, et catégorisé de manière empirique en 3 classes morphologiques (trognons, taillis, fûts), et en 5 sous-classes de hauteurs (1m, 2m, 3m, 4m ou 5m).

Six variables paysagères (tableau 1) ont été calculées à l'aide du logiciel QGIS, afin de décrire le contexte paysager de chaque point d'échantillonnage et celui de la parcelle plus largement. La densité d'arbres a été pondérée par leur hauteur estimée (1, 2, 3, 4 ou 5 m).

**Tableau 1 : Variables paysagères utilisées pour la description du contexte paysager et outil utilisé**

| Variable paysagère  | Outil QGIS  | Paramètres  |
|---|---|---|
| <b>Modalités de gestion du sol</b>                                    |   |   |
| <b>Surface des placettes</b>  | Ajouter des colonnes de géométrie   |   |
| <b>Distance à l'arbre le plus proche (m)</b>                          | Proximité (distance raster)   | Unités de distance : géographique                             |
| <b>Orientation de l'arbre le plus proche par rapport au point (°)</b> | - Création de lignes entre chaque point d'échantillonnage et l'arbre le plus proche :<br>Extension MMQGIS (2016.5.15)<br>Create Hub Distance<br>- Calcul de l'orientation :<br>$(\text{atan}((x_{at}(-1)-x_{at}(0))/(y_{at}(-1)-y_{at}(0)))) * 180/3.14159 + (180 * (((y_{at}(-1)-y_{at}(0)) < 0) + (((x_{at}(-1)-x_{at}(0)) < 0 \text{ AND } (y_{at}(-1) - y_{at}(0)) > 0) * 2)))$<br>sur la couche contenant les lignes | Output shape type : Line to hub<br>Measurement units : Meters |
| <b>Densité d'arbres dans un rayon de 2,5m</b>                         | Carte de chaleur  | Rayon : 2,5m<br>Utiliser le poids depuis : hauteur des arbres |
| <b>Densité d'arbres dans un rayon de 10m</b>                          | Carte de chaleur  | Rayon : 10m<br>Utiliser le poids depuis : hauteur des arbres  |



## D. Suivis microclimatiques

### 1. Climat de référence à la station météorologique

La station météorologique (WMR300, Oregon Scientific®) placée sur le jardin d'Aalbeke a constitué la mesure de référence des paramètres microclimatiques. Les facteurs paysagers pouvant influencer le microclimat ont été pris en compte : relief, occupation du sol, disposition des arbres.

### 2. Mesures spatialisées

#### a) Principe d'échantillonnage

**Tableau 2 : Variables échantillonnées et modalités d'acquisition**

| Variable                            | Appareil (précision)  | Densité de points  | Durée totale (D) et fréquence (t)              |
|-------------------------------------|---|--|--|
| <b>Vitesse et direction du vent</b> | Anémomètre (vitesse : d=3%, seuil de détection = 0,8 m/s)   | 2 appareils synchrones à déplacer sur les points d'échantillonnage | D = 1 journée<br>t=10s                         |
| <b>Température du sol</b>           | Thermopuce de type TG, iButton® (d=0,5°C)   | 30 points à Aalbeke<br>6 points sur la parcelle de référence       | D = 3 mois<br>Acquisition continue<br>t=30 min |
| <b>Humidité du sol</b>              | Sonde TDR, à 11cm de profondeur. (d: 0-40%= 1%, 40-70%=2%)  | 7 répétitions par point<br>3 répétitions par point                 | Ponctuelle                                     |
| <b>Rayonnement global</b>           | Solarimètre (d=0,5W.m <sup>-2</sup> )   | 2 appareils synchrones à déplacer sur les points d'échantillonnage | D = 10 h de 8h à 18h<br>t=1 min                |
| <b>Référence météorologique</b>     | Station météorologique : température de l'air (d=0,5°C), humidité de l'air (d=3% à 25°C), vitesse (d=0,9m/s sous 18m/s, ± 5% au delà) et direction (d=3°) du vent, pluviométrie (d=4%), pression atmosphérique (d=1hPa) | 1 station à Aalbeke  | D = 3 mois<br>Acquisition continue<br>t=1 min  |

30 points d'échantillonnage au total ont ainsi été disposés dans 7 placettes du jardin d'Aalbeke. Les points ont été répartis en transects selon des gradients N-S perpendiculaires aux rangées d'arbres (E-O), et toujours au sein de lignes de cultures similaires afin de limiter un biais potentiel lié à la végétation. Une placette encadrée d'arbres a été échantillonnée en 9 points afin d'investiguer également les gradients E-O éventuels. 3 points ont été placés sur une placette paillée afin de tester les effets du paillage sur le microclimat. 4 points ont été placés aux 4 orientations d'un arbre isolé. Le tableau 2 liste l'ensemble des suivis microclimatiques effectués sur la période du 8 avril au 7 juillet 2016.

#### b) Mesures de température du sol

La température du sol a été mesurée en continu sur la période d'échantillonnage. Les enregistreurs ont été placés à 5cm de profondeur dans le sol, pour les protéger des UVs tout en mesurant de manière fine les fluctuations journalières de température du sol.

### *c) Mesures du rayonnement global*

Deux solarimètres (SAM30, Kimo® Instruments) positionnés à hauteur des cultures, lentille horizontale pointant vers le ciel (0°), ont permis de mesurer le rayonnement global incident ( $R_g$ ) pendant 10h à chaque point d'échantillonnage.  $R_g$  est l'énergie transmise à la surface terrestre par le soleil sous forme d'un rayonnement de courtes longueurs d'ondes (400-1100nm). Il est composé des rayonnements solaires direct, diffus et réfléchi. Le ratio entre la moyenne journalière du rayonnement incident, mesuré à chaque point d'échantillonnage, et la moyenne journalière de référence (station météo de Lille), est calculé.

### *d) Mesures d'humidité du sol*

À chaque point d'échantillonnage (sauf points 27, 28 et 30 pour des raisons de faisabilité), l'humidité du sol en surface (11 cm) a été mesurée grâce à une sonde TDR (Time Domain Reflectometry) (IMKO TRIME®-PIKO), à 3 dates espacées chacune de 2 semaines environ (fin avril, mi-mai, fin mai).

### *e) Mesures de vitesse et direction du vent*

La vitesse et l'orientation du vent ont été mesurées en continu et à un pas de temps d'une minute sur toute la période d'échantillonnage grâce à la station météorologique implantée sur le site (WMR300, Oregon Scientific). La vitesse du vent a été également mesurée à chaque point d'échantillonnage (sauf points 27, 28 et 30 pour des raisons de faisabilité), à un pas de temps de 10s et pendant 24h, grâce à 2 anémomètres enregistreurs (Windvisu) et ce au cours du premier mois d'acquisition des données (du 8 avril au 5 mai). Les vitesses ainsi obtenues ont ensuite été moyennées à un pas de temps de 10 minutes afin d'éliminer le bruit associé à la turbulence haute fréquence.

La série temporelle de vitesse de vent a été déduite en chaque point d'échantillonnage en extrapolant la mesure prise à la station de référence. L'extrapolation s'est faite sur la base d'un modèle calibré à partir de la vitesse moyenne journalière mesurée au point sur une journée. Deux modèles ont été envisagés :

- un modèle linéaire de type  $V_{\text{point}_i} = A_i \times V_{\text{station}} + B_i$ , ( $A_i, B_i$  constantes),
- ou un modèle intégrant la direction du vent ( $V_{\text{point}_i} = A_i \times V_{\text{station}}^{B_i} [1 + \cos(2 \times \pi / 360 \times d + \phi_i)] + D_i$ ) ( $V_{\text{point}_i}$  la vitesse au point  $i$ ,  $A_i, B_i, \phi_i$  et  $D_i$  des constantes, et  $d$  la direction du vent mesurée à la station).

Ces 2 équations permettent d'expliquer entre 20 et 85% ( $R^2$ ) de la variabilité locale de la vitesse du vent (moyenne : 0,59, écart-type : 0,23). Le modèle linéaire, plus robuste, est privilégié lorsque les coefficients de corrélation  $R$  sont très proches entre les 2 modèles.

## *E. Identification de patterns climatiques*

### *1. Classification des journées selon leur valeur d'évapotranspiration*

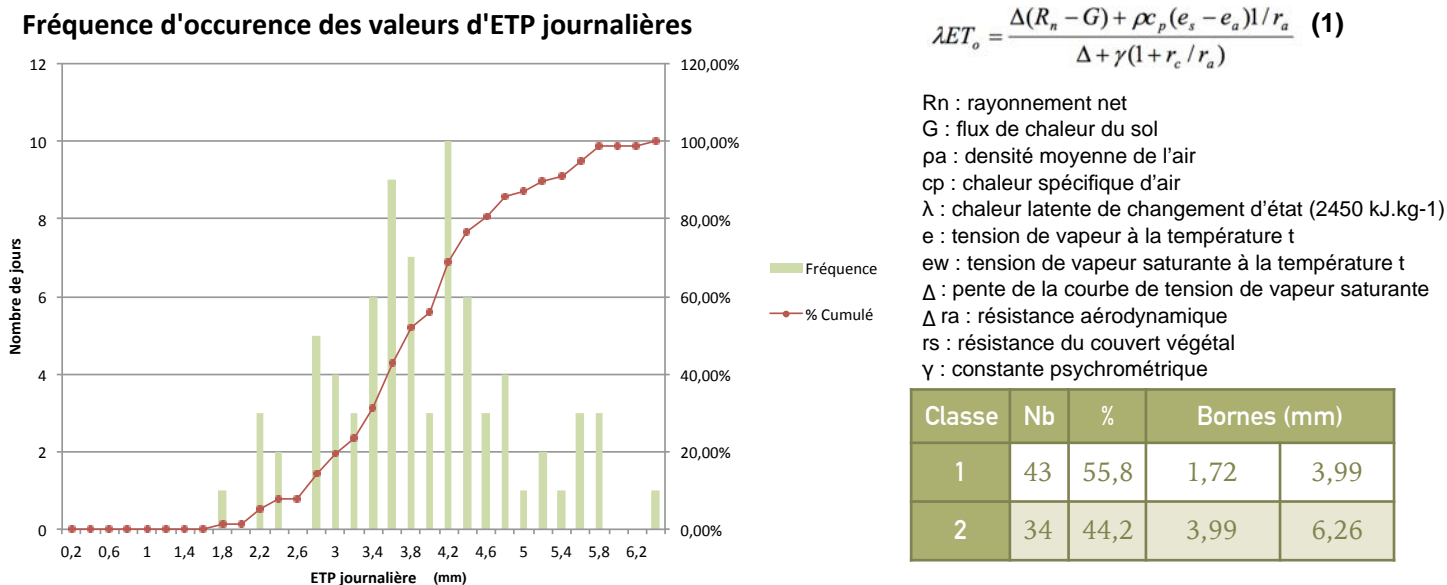
Le régime évapotranspiratoire d'une culture varie en fonction des conditions météorologiques. L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau maximale susceptible d'être évaporée par un couvert végétal en phase active de croissance et parfaitement alimenté en eau (Guyot et al., 1987). C'est l'un des facteurs principaux dont dépend l'activité photosynthétique. L'évapotranspiration dépend de l'énergie rayonnante reçue, la vitesse du vent, la température, l'humidité de l'air. La valeur instantanée de l'ETP représente la quantité d'eau demandée aux végétaux par les facteurs climatiques. La valeur d'ETP résume donc les différentes variables climatiques. En effet, une demande évapotranspiratoire élevée est caractéristique d'un temps chaud et sec ou venté. Dans ces



conditions, deux cas de figure se présentent : si l'eau dans le sol est disponible pour la plante, celle-ci dissipe l'énergie emmagasinée essentiellement sous forme de chaleur latente, i-e par transpiration ; si la réserve hydrique du sol n'est pas suffisante pour satisfaire la demande évapotranspiratoire, les stomates se ferment et l'énergie de la plante est dissipée uniquement par chaleur sensible, sa température augmentant alors fortement. Au contraire, une demande évapotranspiratoire faible est caractéristique de conditions fraîches, humides et peu ventées (Allen et al., 1998).

L'ETP a été calculée à l'aide de l'équation de Penman-Monteith (1965) (1), grâce aux données météorologiques de la station placée sur le jardin d'Aalbeke et de celle de Lille-Lesquin. Étant donné la saison de mesures, et le climat de la zone d'étude, il a été considéré que la végétation était parfaitement alimentée en eau.

Les journées de mesure ont été classées en 2 types selon la variable ETP : les journées chaudes et sèches, à valeur d'ETP élevée, et les journées froides et humides, à valeur d'ETP faible (figure 3).



**Figure 3 : Distinction des journées de mesure sur le critère de leur valeur d'ETP, et caractéristiques des 2 groupes identifiés**

## 2. Analyse des séries temporelles de température par type de journée

Les séries temporelles de température du sol ont été caractérisées à l'aide de 4 variables : la moyenne journalière, l'amplitude journalière, et le premier décile journalier (QT10) et le neuvième décile journalier (QT90), qui représentent respectivement les valeurs minimales et maximales journalières tout en évitant les extrêmes potentiellement aberrants. Pour chacun des 2 types de journée et pour chacun des 4 indices, les points d'échantillonnage ont été regroupés par classification ascendante hiérarchique. 43 journées ont donc été considérées pour les journées à faible ETP, 34 pour les journées à forte ETP (figure 3). Les regroupements ont été arrêtés à un nombre de groupes présentant des différences significatives entre eux.

La validité statistique de chacun des regroupements obtenus a été testée à l'aide d'un test de comparaison de moyenne réalisé respectivement sur la moyenne des moyennes, amplitudes, QT10 ou QT90 journaliers (ANOVA ou Kruskal-Wallis lorsque les données nécessitaient l'utilisation d'un test non paramétrique). Un test de comparaison de moyennes multiples (test de Tukey) a été utilisé afin de tester les regroupements par paires (logiciel R, R Development Core Team (2016), version 3.1.1). Alpha, le risque de rejeter à tort l'hypothèse nulle, est choisi à 5%.

### 3. Analyse des autres variables microclimatiques

Les données de rayonnement global, l'humidité du sol et la vitesse du vent ont également été classées par classification ascendante hiérarchique afin d'observer un effet potentiel de la gestion du sol ou du contexte paysager.

#### *F. Confrontation des facteurs paysagers et des variables microclimatiques par Analyse en Composante Principale*

Afin de déterminer la contribution aux paramètres microclimatiques des variables paysagères retenues, une Analyse en Composante Principale (ACP) a été menée et la corrélation des variables testée (logiciel R, R Development Core Team (2016), version 3.1.1.

## III. RÉSULTATS

### *A. Caractérisation du paysage*

La figure A (en annexe) présente la distance à l'arbre le plus proche sur la surface du jardin. L'ensemble des cultures du jardin est proche des arbres, à moins de 5m environ. La densité d'arbres pour les 2 sites d'étude est présentée en figure B en annexe, pour des rayons de 2,5m et de 10m. La densité d'arbres est bien supérieure à Aalbeke par rapport à la parcelle de référence. Les valeurs de densité, de distance et d'orientation à l'arbre le plus proche sont présentées pour chaque point d'échantillonnage dans le tableau A en annexe.

### *B. Analyse du microclimat*

#### *1. Analyse des indices journaliers de température*

Seuls les résultats significatifs et intéressants sont présentés. Les cartes et boxplots respectifs sont affichés en figures C à F en annexe. La composition des groupes est détaillée dans le tableau 3. La répartition des points d'échantillonnage en différents groupes varie pour chaque variable considérée.

##### *(1) Moyennes journalières*

Les moyennes journalières des 3 groupes sont significativement différentes les unes des autres quelque soit le type de journée. Pour les journées à faible ETP, le groupe 2 possède une moyenne journalière de plus de 1°C supérieure à celle du groupe 1. Lors des journées à ETP élevée, la moyenne journalière du groupe 3 est de 2°C supérieure à celle du groupe 1.

##### *(2) Amplitude journalière*

Les amplitudes journalières des 3 groupes identifiés sont significativement différentes les unes des autres quelque soit le type de journée. Lors des journées à faible ETP, l'amplitude journalière du groupe 3 est plus de 2 fois supérieure à celle du groupe 1. Pour les journées à ETP élevée, le groupe 3 présente une amplitude journalière de 3,6°C supérieure à celle du groupe 1.

**Tableau 3 : Composition des groupes de points déterminés par classification ascendante hiérarchique pour les journées à faible ETP (1), et à forte ETP (2). Les variables marquées (\*) présentent 3 groupes significativement différents entre eux (alpha = 5%). Pour chaque groupe sont affichés : médiane [min ; max].**

| Composition des groupes     |   |   |  |  |
|-----------------------------|---|---|--|--|
| <b>Humidité (%) *</b>       | <u>Groupe 4 :</u><br>22, 23, 24, 25, T1, T2, T3, T4, T5, T6<br><b>22,9 [11,6 ; 37,1]</b>              | <u>Groupe 2 :</u><br>6, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 27<br><b>33,3 [26,2 ; 43,7]</b>            | <u>Groupe 1 :</u><br>1, 2, 3, 4, 5<br><b>41,2 [33,0 ; 46,1]</b>  | <u>Groupe 3 :</u><br>10, 11, 12<br><b>49,5 [39,3 ; 54,8]</b> |
| <b>Moyenne (°C) (1) *</b>   | <u>Groupe 1 :</u><br>1, 2, 3, 4, 7, 9, 13, 27, 28, 30<br><b>14,2 [6,7 ; 19,6]</b>                     | <u>Groupe 3 :</u><br>6, 8, 11, 12, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 26, 29<br><b>15,2 [6,8 ; 21,2]</b>                       | <u>Groupe 2 :</u><br>5, 14, 15, 16, 17, 22, 25, T1, T2, T3, T4, T5, T6<br><b>15,7 [7,3 ; 21,6]</b>           |  |
| <b>Moyenne (°C) (2) *</b>   | <u>Groupe 1 :</u><br>1, 2, 3, 4, 13<br><b>16,1 [8,6 ; 21,0]</b>                                       | <u>Groupe 2 :</u><br>5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 28, 29, 30<br><b>17,1 [8,8 ; 22,9]</b>          | <u>Groupe 3 :</u><br>14, 15, 16, 17, 22, 23, 24, 25, T1, T2, T3, T4, T5, T6<br><b>18,0 [10,1 ; 23,3]</b>     |  |
| <b>Amplitude (°C) (1) *</b> | <u>Groupe 1 :</u><br>1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 27, 28, 30<br><b>3,0 [0,5 ; 11,5]</b>            | <u>Groupe 2 :</u><br>5, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 29<br><b>5,5 [0,5 ; 32,5]</b>                               | <u>Groupe 3 :</u><br>14, 15, 22, 23, 25, 26, T1, T2, T3, T4, T5, T6<br><b>7,5 [0,5 ; 16,5]</b>               |  |
| <b>Amplitude (°C) (2) *</b> | <u>Groupe 1 :</u><br>1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 27, 28, 29, 30<br><b>4,5 [0,5 ; 15,0]</b>        | <u>Groupe 2 :</u><br>5, 13, 16, 17, 18, 19, 20, 21<br><b>6,5 [2,0 ; 19,0]</b>                                       | <u>Groupe 3 :</u><br>14, 15, 22, 23, 24, 25, 26, T1, T2, T3, T4, T5, T6<br><b>9,0 [1,5 ; 14,0]</b>           |  |
| <b>QT10 (°C)(1)</b>         | <u>Groupe 1 :</u><br>1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 12, 19, 20, 21, 27, 28, 29, 30<br><b>13,5 [5,0 ; 17,2]</b> | <u>Groupe 3 :</u><br>14, 15, 16, 18, 22, 23, 24, 26, T1, T2, T3, T4, T5, T6<br><b>13,4 [3,5 ; 17,5]</b>             | <u>Groupe 2 :</u><br>5, 6, 8, 17, 25<br><b>14,5 [5,0 ; 19,0]</b>   |  |
| <b>QT10 (°C)(2)</b>         | <u>Groupe 1 :</u><br>1, 2, 3, 4, 9, 13<br><b>14,5 [4,5 ; 19,0]</b>                                    | <u>Groupe 3 :</u><br>14, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, T1, T2, T3, T4, T5, T6<br><b>15,0 [4,0 ; 20,0]</b> | <u>Groupe 2 :</u><br>5, 6, 7, 8, 11, 12, 17, 21, 27, 28, 29, 30<br><b>15,5 [6,0 ; 20,0]</b>                  |  |
| <b>QT90 (°C)(1) *</b>       | <u>Groupe 1 :</u><br>1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 12, 13, 27, 28, 30<br><b>15,5 [8,0 ; 25,6]</b>             | <u>Groupe 2 :</u><br>5, 6, 8, 18, 19, 20, 21, 29<br><b>17,4 [10,0 ; 27,8]</b>                                       | <u>Groupe 3 :</u><br>14, 15, 16, 17, 22, 23, 24, 25, 26, T1, T2, T3, T4, T5, T6<br><b>19,0 [10,3 ; 28,8]</b> |  |
| <b>QT90 (°C) (2) *</b>      | <u>Groupe 1 :</u><br>1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 12, 13, 27, 28, 30<br><b>18,0 [11,0 ; 24,6]</b>            | <u>Groupe 2 :</u><br>5, 6, 8, 18, 19, 20, 21, 29<br><b>20,5 [14,0 ; 28,0]</b>                                       | <u>Groupe 3 :</u><br>14, 15, 16, 17, 22, 23, 24, 25, 26, T1, T2, T3, T4, T5, T6<br><b>22,0 [15,5 ; 28,5]</b> |  |

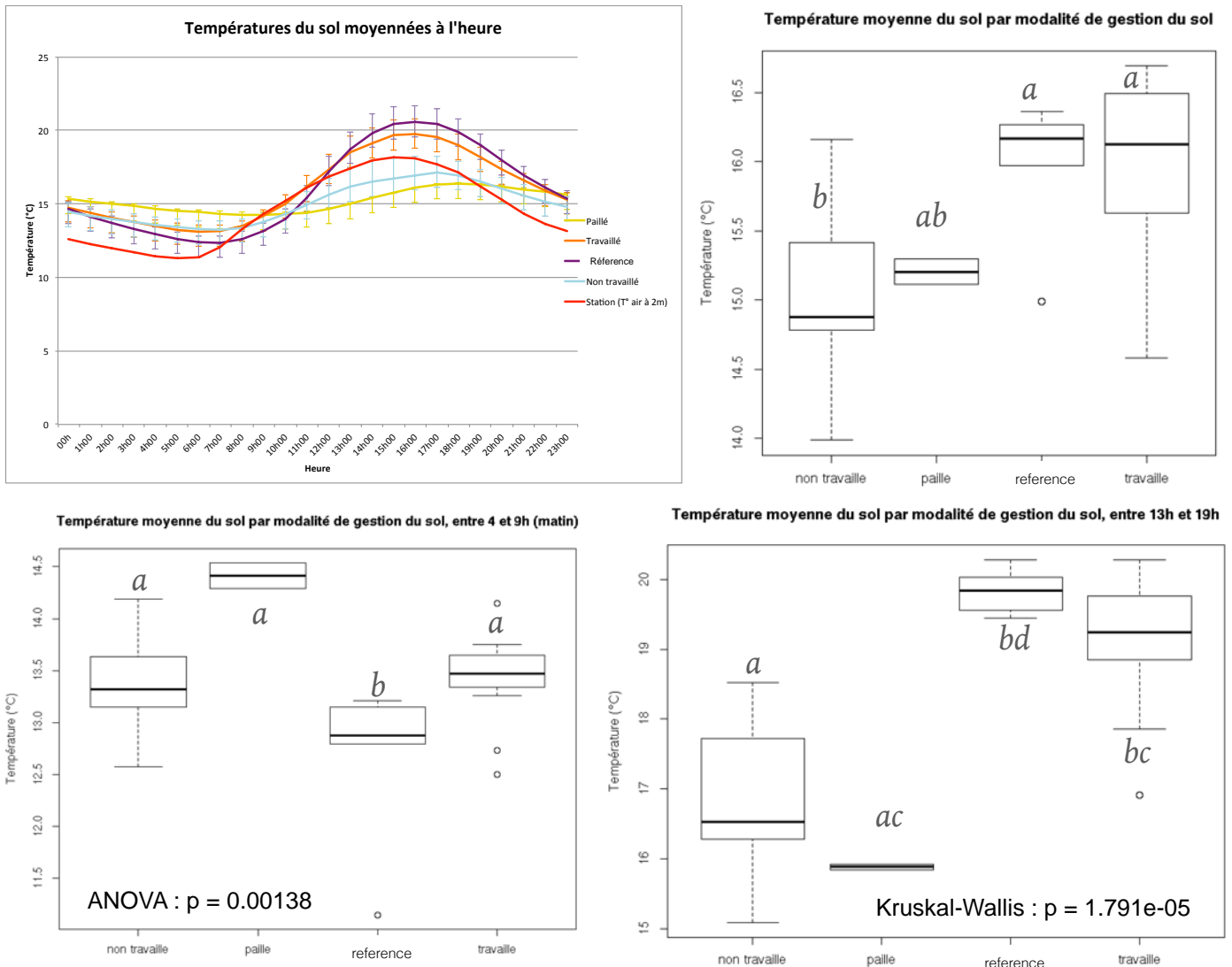
### (3) QT10

Les 3 groupes identifiés ne présentent pas de différence significative de valeurs de QT10, quelque soit le type de journée.

#### (4) QT90

Les moyennes de QT90 des 3 groupes identifiés sont significativement différentes les unes des autres quelque soit le type de journée. Pour les journées à ETP faible, le groupe 1 possède une valeur moyenne de QT90 de 3°C inférieure à celle du groupe 3. Pour les journées à ETP élevée, le groupe 1 présente une valeur moyenne de QT90 de 4°C inférieure à celle du groupe 3. La répartition des points entre les groupes est la même quelque soit le type de journée.

#### 2. Analyse de la température du sol par type de gestion du sol



**Figure 4 : Température du sol en fonction du type de gestion**

L'évolution de la température du sol au cours de la journée varie en fonction de la gestion du sol (figure 4). La placette paillée présente une variation journalière moyenne de la température du sol moins forte que les autres. Les variations sont maximales pour le sol travaillé et intermédiaires pour le sol non travaillé et non paillé.

La moyenne journalière de température du sol est significativement inférieure pour les sols travaillés, à Aalbeke et sur le site de référence, par rapport au sol non travaillé. Le sol paillé ne présente aucune différence significative de température journalière du sol avec aucune des autres modalités (figure 4). Au petit matin, les températures moyennes du sol du

jardin d'Aalbeke sont cependant plus élevées que celles de la placette de référence. L'après-midi, le sol non travaillé présente une température significativement inférieure à celles des sols de référence et travaillé.

### 3. Patterns de vent, d'humidité de sol et de rayonnement

Les groupes identifiés ne présentent pas de différences significatives quelque soit le type de journée, ni de vitesse du vent, ni de rayonnement incident. Les moyennes des valeurs d'humidité sur la période de mesure des 4 groupes identifiés par classification ascendante hiérarchique sont significativement différentes les unes des autres (figure G en annexe). Le groupe 3 comporte uniquement les points situés dans la placette paillée.

#### C. Contribution des variables paysagères aux variables microclimatiques

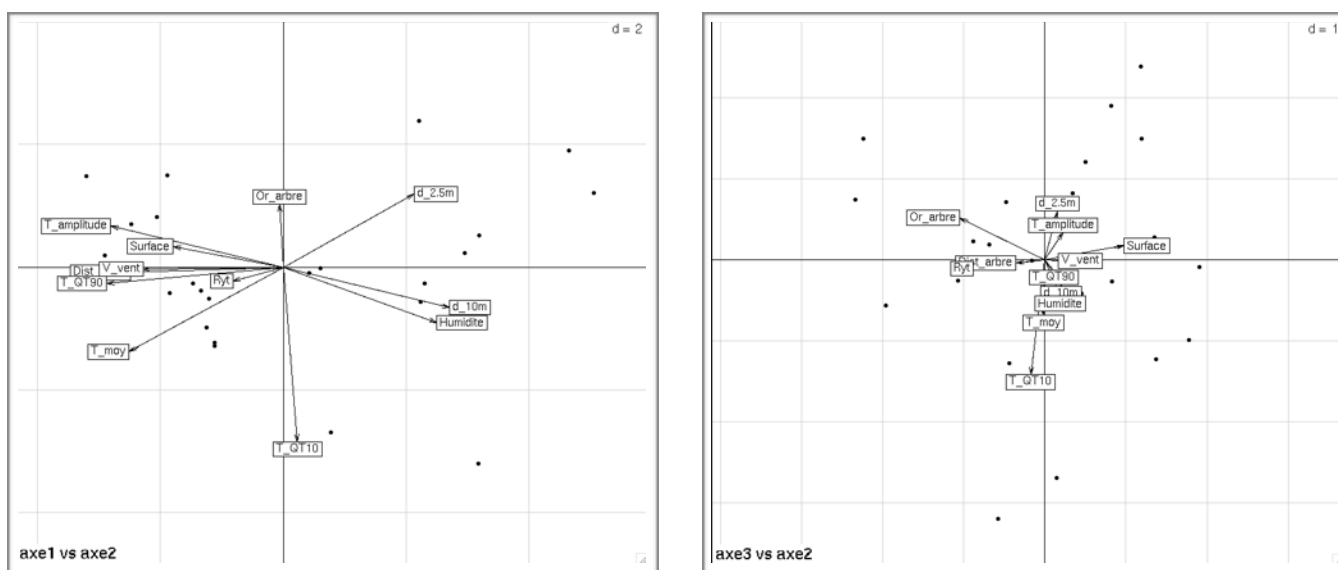


Figure 5 : Représentation des variables utilisées pour l'ACP lors des journées à faible évapotranspiration

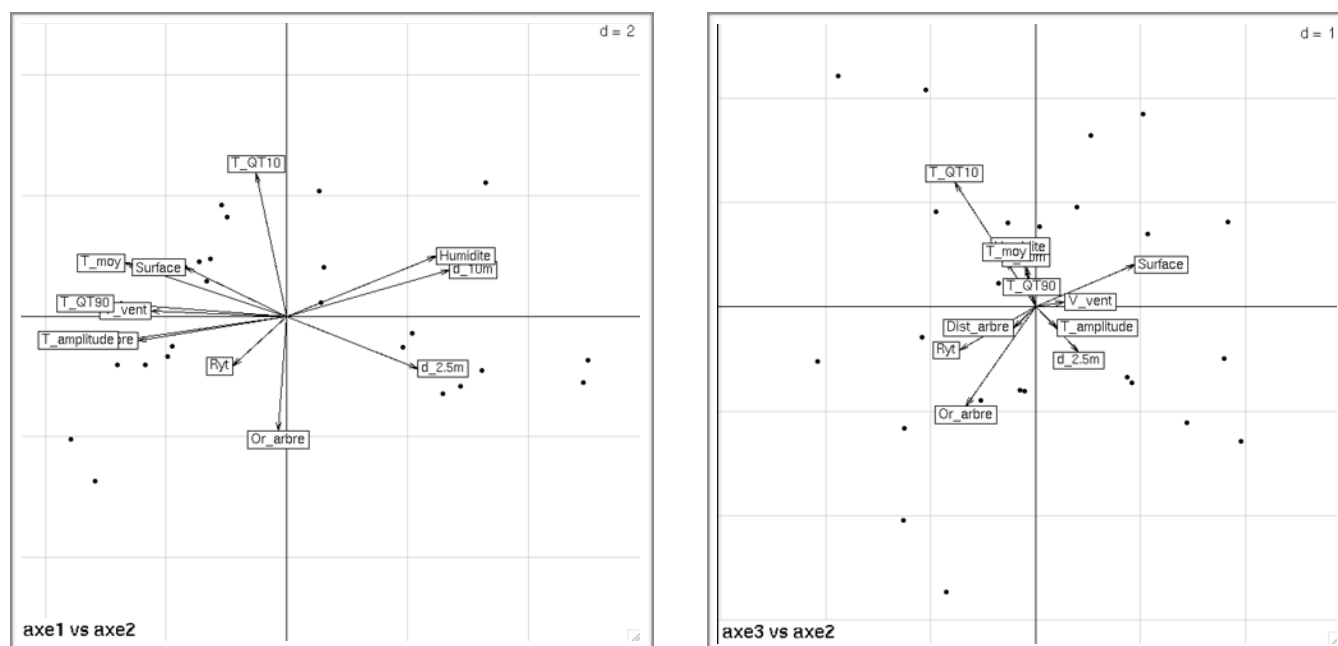


Figure 6 : Représentation des variables utilisées pour l'ACP lors des journées à forte évapotranspiration

Les figures 5 et 6 présentent les résultats de l'ACP. Les valeurs négatives de l'axe 1 sont associées à des valeurs élevées de distance aux arbres, de surface de placette, de

vitesse du vent, de QT90, de température moyenne, et d'amplitude journalière de température. L'axe 1 correspond donc à des gammes de température du sol et de vitesse de vent faibles et à des distances aux arbres faibles, ainsi qu'à une densité d'arbres élevée.

Les valeurs négatives de l'axe 2 sont associées à des valeurs de QT10 élevées. L'axe 2 correspond donc à des valeurs de QT10 faibles.

L'axe 3 représente essentiellement la variable de surface des placettes. Il correspond à des surface élevées.

La température moyenne est corrélée positivement à la distance aux arbres (67%), et négativement à la densité d'arbres (-69% et -61% pour la densité dans un rayon de 2,5m et 10m respectivement). L'amplitude de température journalière est corrélée à la surface de la placette (66%) et à la distance aux arbres (69%). Elle est négativement corrélée à la densité (-53% et -84%, pour un rayon de 2,5m et 10m respectivement). Les valeurs de température maximales journalières sont corrélées positivement à la surface et la distance aux arbres (61% et 73%) et négativement à la densité (-64% et -79% pour la densité dans un rayon de 2,5m et 10m respectivement). Ces valeurs concernent les journées à faible ETP. Les corrélations pour les journées à forte ETP sont similaires. Les valeurs sont présentées dans le tableau B en annexe.

## IV. DISCUSSION

### A. *Tendances de température du sol*

Tous les points de la placette de référence appartiennent au même regroupement quelque soit l'indice de température ou le type de journée considéré. Cette placette présente donc des températures du sol homogènes sur sa surface. Les températures moyennes y sont inférieures de 0,3 à 1,3°C lors des journées à ETP faible, et supérieures de 1,0 à 2,1 °C lors des journées à ETP forte, par rapport au jardin d'Aalbeke. Ceci est confirmé par l'amplitude journalière de température qui est plus grande dans la zone de référence, et ce quelque soit le type de journée. Celle-ci s'explique elle-même par des différences très marquées sur les maxima, qui atteignent 1,3°C à 5,2°C de plus en zone de référence par rapport au jardin d'Aalbeke. Le taux d'humidité du sol y semble également homogène, et faible par rapport aux valeurs observées sur le jardin d'Aalbeke.

Sur le jardin d'Aalbeke, les 4 indices de température du sol sont plus hétérogènes spatialement, entre placettes mais aussi au sein d'une même placette. Les points présentent des différences de températures moyennes journalières plus marquées lors des journées à forte ETP. Ces journées présentent également une amplitude journalière beaucoup plus forte, et des valeurs maximales supérieures à celles des journées à faible ETP. Concernant les maxima de températures, les mêmes patterns spatiaux ressortent quelque soit le type de journée : les groupes sont constitués des mêmes points et conservent la même hiérarchie qu'il fasse plus ou moins chaud.

### B. *Effets de la gestion du sol sur son microclimat*

Nos observations confirment que les paillis modifient l'équilibre d'énergie et d'eau à la surface des sols. Le paillage tamponne les variations journalières de température du sol et le non travail du sol permet de maintenir des températures moyennes de surface plus faibles qu'en sol travaillé, notamment l'après-midi, aux heures les plus chaudes. Le taux d'humidité du sol en surface est bien supérieur en sol paillé par rapport aux autres types de gestion (jusqu'à 2 fois supérieur au sol travaillé). Le maintien de l'humidité des sols est favorable au développement des racines (Kumar et al., 2014). Il induit également une diminution de la température de surface par rapport à un sol nu par ses effets sur les propriétés thermiques du

sol (Pramanik et al., 2015). Nos observations vont dans le même sens que Hillel (1982) et Ji et Unger (2001), montrant que les paillis retardent l'évaporation de l'eau des sols et conservent l'humidité. Acharya et al. (2005), expliquent cela par trois mécanismes : en interceptant le rayonnement incident, en agissant comme barrière physique à l'évaporation et en évitant le contact direct avec l'air turbulent.

Les effets sur la température du sol dépendent de la composition et des propriétés optiques du paillis. Par l'interception des radiations solaires, son fort indice de réflexion, sa faible conductivité à la chaleur (Pramanik et al., 2015) et par la réduction du flux de chaleur du sol vers la surface, le paillis naturel diminue la température du sol et les fluctuations de température diurne des premiers centimètres. Les températures maximales du sol sont diminuées et les températures minimales augmentées (Teasdale et Mohler, 1993, en climat tempéré chaud). Ceci est intéressant pendant les mois d'été. Le paillage naturel permet ainsi de maintenir quasi constante la température du sol et du système racinaire des cultures, comme l'ont observé Ji et Unger (2001) au Texas, en climat semi-aride.

### *C. Effets du contexte paysager sur le microclimat du sol*

La plus faible densité d'arbres sur la placette de référence semble induire des conditions de température et d'humidité du sol plus homogènes en terme spatial. Sur le plan temporel en revanche, le sol de la placette de référence présente des températures plus variables que le jardin d'Aalbeke.

La proximité des arbres et leur forte densité induisent des température du sol plus faibles en termes de moyenne journalière, d'amplitude et de valeurs maximales. En effet, les valeurs les plus faibles sont observées dans la placette la plus densément encadrée d'arbres et surtout en bordure, au plus proche des arbres, et ce quelque soit le type de journée. En revanche, ces variables paysagères ne sont pas corrélées aux valeurs minimales de température du sol. Les arbres semblent maintenir une température moyenne journalière du sol faible en leur voisinage. Ils permettent de maintenir une température du sol fraîche lors des journées où la demande évapotranspiratoire est forte, en période estivale. Ils semblent également tamponner les variations temporelles ainsi que les extrêmes hauts de température du sol par rapport à une situation sans arbre. Ceci est intéressant car les racines sont moins adaptées à des fluctuations de températures extrêmes, qui diminuent la croissance et la productivité des plantes et pourraient donc affecter la récolte et la qualité des fruits (Gonzalez-Fuentes et al., 2016). Les arbres pourraient limiter cet effet.

Les parcelles étant encadrées d'arbres, on constate une amplitude journalière des températures supérieure de 2,6°C au niveau du centre (à 3,2 m de tout arbre) par rapport à la bordure (à 1 m des arbres). Ceci pourrait s'expliquer par l'ombrage apporté par les arbres en bordure lors de journées à fort rayonnement. Des différences entre l'est et l'ouest de cette placette sont observées. L'est pourrait cependant être influencé par le bois situé à l'ouest du jardin. En effet, le rayonnement de l'après-midi pourrait donc ne pas atteindre le sol. Cependant aucune différence significative des valeurs de rayonnement n'a été observée.

L'humidité du sol présente des patterns spatiaux cohérents avec ceux observés sur les températures : hormis en placette paillée, l'humidité du sol est la plus élevée là où les valeurs de températures du sol sont les plus faibles, en termes de moyenne journalières, d'amplitude, comme de maxima, et ce quelque soit le type de journée. Un taux d'humidité du sol élevé pourrait être le facteur explicatif de ces températures plus faibles. À l'inverse, les températures plus faibles sur cette zone, dû au contexte paysager avec une forte densité d'arbres, induisent sans doute une ETP inférieure et donc un taux d'humidité du sol plus élevé. Nous constatons que les patterns froids et humides correspondent aux zones à faible distances des arbres (de l'ordre de 1m), tandis que le sol est plus chaud, notamment en valeurs maximales, et sec lorsque la densité d'arbres dans le voisinage diminue.

La proximité des arbres et leur forte densité semble induire des vitesses de vent plus faibles, bien qu'aucun effet significatif n'ai pu être mis en évidence. Ceci peut être intéressant pour les cultures car des modifications phénotypiques peuvent être induites par le vent, comme la réduction de la surface foliaire, l'accroissement de l'importance relative du système racinaire par rapport au système aérien, la résistance mécanique ou la résistance au dessèchement (Guyot et al., 1987). De plus, les échanges d'un couvert végétal (gaz carbonique, vapeur d'eau, chaleur) avec le milieu extérieur dépendent entre autres de la vitesse du vent. Il est nécessaire que cette dernière ait une valeur minimale de l'ordre de 0,5 m.s<sup>-1</sup> pour que ces échanges soient facilités (Grace, 1977). Des turbulences modérées promeuvent ainsi la consommation de CO<sub>2</sub> par les cultures pendant la photosynthèse (WMO, 2010). En revanche, si la vitesse du vent dépasse 3 m.s<sup>-1</sup>, des dégâts peuvent apparaître sur différents organes (Guyot et al., 1987). Le vent, en défaisant la couche limite des feuilles, favorise leur assèchement et ainsi la transpiration des végétaux. Il est donc favorable d'abaisser la vitesse du vent au voisinage des cultures, tout en maintenant un brassage de l'air suffisant pour assurer les échanges avec l'environnement.

#### *D. Influence potentielle de la gestion du sol et du contexte paysager sur la production maraîchère*

Des températures racinaires trop élevées peuvent impacter négativement les cultures. En effet, le rythme de respiration et de consommation d'oxygène par les racines double à chaque augmentation de 10°C de la température de la zone racinaire, tandis que la solubilité de l'oxygène est inversement liée à la température. Avec l'augmentation de la température de la zone racinaire, la combinaison d'une demande racinaire en oxygène accrue et de la concentration diminuée en oxygène de l'eau du sol peut ainsi résulter en des conditions hypoxiques qui diminuent la croissance racinaire (Marfa et al., 2005). D'après Carlen et al. (2007), les conséquences sur les cultures sont une réduction de leur surface foliaire et une diminution de la photosynthèse, ce qui limite la disponibilité en sucre pour les fruits. Des températures racinaires trop élevées peuvent ainsi avoir un effet catastrophique sur la croissance, la fructification, le prélèvement d'eau et d'éléments minéraux, la respiration racinaire et la compartimentation des assimilats (Cooper, 1973; Dodd et al., 2000). Une température de la zone racinaire comprise entre 20 et 30°C est considérée comme optimale pour la plupart des cultures tempérées, avec des variations selon l'espèce (Díaz-Pérez et al 2005 ; Stoltzfus et al., 1998). Des températures inférieures à 15°C sont considérées comme suboptimales, et des températures supérieures à 30°C, supra-optimales (Cooper, 1973).

Par ailleurs, la plupart des organismes du sol des forêts tempérées comme les collemboles, les isopodes ou les oribates préfèrent des températures basses et une amplitude faible et sont très sensibles aux températures élevées. La pédofaune et les micro-organismes des sols en agroforesterie et/ou en sols paillés sont soumis à des températures de sub-surface en moyenne plus basses, à des maxima plus faibles, à une humidité plus élevée ainsi qu'à moins de fluctuations de ces facteurs microclimatiques, par rapport à des systèmes sur sol nu et/ou sans arbre. La vie du sol qui régule ses propriétés physiques et le cycle des nutriments peut ainsi être maintenue (Martius et al., 2004). Sachant que la température des sols peut aussi impacter la germination des graines, la survie des plantes en hiver et l'occurrence de maladies et d'insectes, il serait important de compléter notre étude en analysant les patterns microclimatiques survenant sur l'ensemble de l'année.

## **V. CONCLUSION**

Les difficultés actuelles connues par la filière maraîchère, ainsi que le changement climatique rendent nécessaire l'évolution des systèmes de production. Le microclimat étant



un facteur essentiel influençant les cultures, la mise en place de systèmes permettant d'optimiser ses paramètres, comme l'agroforesterie et le paillage, semble une possible solution répondant aux enjeux du développement durable.

En effet, les paramètres du contexte paysager comme la distance à l'arbre le plus proche et la densité d'arbres, qu'elle soit considérée à l'échelle de l'arbre ou à l'échelle de l'inter-rang, influencent fortement la température du sol. Ces paramètres diminuent en effet les températures moyennes (jusqu'à 2°C), l'amplitude journalière de température du sol (jusqu'à 4,5°C), et les valeurs maximales (jusqu'à 3°C) mesurées en début d'été, mais sont sans effet sur les températures minimales à cette même période. Cette influence du contexte paysager sur la température du sol est concomitante et pourrait s'expliquer par une humidité du sol plus élevée à proximité des arbres.

La gestion du sol influe sur sa température et son taux d'humidité, le paillage permettant de maintenir un taux d'humidité supérieur et une température à la fois inférieure et moins fluctuante qu'en sol travaillé. Un sol non travaillé présente un microclimat particulièrement stable au cours de la journée.

La température optimale de la zone racinaire varie selon les besoins des cultures maraîchères, et impacte la production. Le contexte paysager et la gestion du sol ont donc des effets sur la température du sol. Cux-ci varient selon les journées mais les mêmes tendances globales sont retrouvées. Températures faibles et taux d'humidité élevés sont liés.

Le contexte paysager et la gestion du sol génèrent donc un microclimat spécifique, qui peut impacter directement la production maraîchère. Optimiser les conditions microclimatiques pour les cultures est donc primordial pour maximiser la production et augmenter sa qualité.

Ceci est particulièrement intéressant dans un contexte de changement climatique. L'effet tampon des arbres et du paillage sur les variations journalières de température ainsi que sur les extrêmes hauts de température du sol rend leur utilisation intéressante dans les années à venir, afin de promouvoir des microclimats favorables aux cultures.

La mesure du rayonnement ne montre pas d'effet du contexte paysager. Cependant, la comparaison a été effectuée sur une seule valeur par journée pour des raisons matérielles, ce qui semble très insuffisant. Les séries de vitesse de vent ont été générées par modélisation, pour des raisons de disponibilité du matériel, et seuls 20% de la variabilité ont pu être expliqués dans certains cas, ce qui est faible. De plus, les mesures sur lesquelles reposent la définition des paramètres des modèles utilisés ont été générées au début de la période de terrain, alors que la végétation n'était que très peu avancée. Il serait donc intéressant d'étudier les effets des variables de vent et de rayonnement sur des séries temporelles complètes, et à différents stades d'avancement de la végétation. Ceci permettrait de comprendre les effets de ces 2 variables sur le microclimat du verger-maraîcher et de les mettre en lien avec les séries temporelles obtenues.

Seuls 3 points en paillage ont pu être mis en place du fait de la gestion du jardin. Ceci semble insuffisant pour réellement conclure sur ses effets, et surtout pour pouvoir les différencier des effets liés au contexte paysager. Il est cependant prévu par les jardiniers d'Aalbeke de développer le paillage sur d'autres placettes. Il aurait également été judicieux d'effectuer des mesures sur une placette paillée de la parcelle de référence. Cela n'a pas été possible mais serait à mettre en place.

La mesure de la température du sol à différentes profondeurs de racines des cultures serait également un paramètre à mesurer étant donné son importance capitale dans la production et la qualité de la récolte, selon les espèces.

Des mesures sur l'année complète manquent au jeu de données pour statuer réellement sur les effets de l'agroforesterie sur les minima de températures. D'autre part, ce travail constitue une première analyse qui nécessite d'être poursuivie sur plusieurs années afin de rendre les résultats plus robustes et plus représentatifs. Par ailleurs il est important de

souligner que l'année 2016 a été marquée par un printemps et un été particulièrement pluvieux et orageux par rapport aux moyennes saisonnières.

L'approche de cette étude est particulière car elle se concentre sur un seul site agroforestier caractérisé de manière fine (variabilité spatiale intraparcellaire, microclimat à l'échelle métrique). Elle constitue une référence qui pourra être valorisée lorsqu'elle sera croisée avec celles acquises sur d'autres sites maraîchers agroforestiers.

## VI. BIBLIOGRAPHIE

- ACHARYA, C. L., HATI, K. M., et BANDYOPADHYAY, K. K., 2005. Mulches. Encyclopedia of Soils in the Environment. p. 521-532.
- AERTSENS, Joris, DE NOCKER, Leo, et GOBIN, Anne, 2013. Valuing the carbon sequestration potential for European agriculture. Land Use Policy, vol. 31, p. 584-594.
- ALLEN, Richard G., PEREIRA, Luis S., RAES, Dirk, et al., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, vol. 300, no 9, p. D05109.
- ANDERSON, Jay E. et MCNAUGHTON, S. J., 1973. Effects of low soil temperature on transpiration, photosynthesis, leaf relative water content, and growth among elevationally diverse plant populations. Ecology, vol. 54, no 6, p. 1220-1233.
- BAKR, Noura, ELBANA, Tamer A., ARCENEUX, Allen E., ZHU, Yuanda, WEINDORF, David C. and SELIM, H. Magdi, 2015. Runoff and water quality from highway hillsides: Influence compost/mulch. Soil and Tillage Research, Vol. 150, p. 158–170.
- CARLEN, Christoph, POTEL, Anne-Marie, et ANCAY, André, 2006. The Influence of Leaf/Fruit Ratio of Strawberry Plants on the Sensory Quality of Their Fruits. In : 2006 Abstracts 27th International Horticultural Congress & Exhibition, p. 206-206.
- CLARKE, S.J., LAMONT, K.J., PAN, H.Y., BARRY, L.A., HALL, A. and ROGIERS, S.Y., 2015. Spring root-zone temperature regulates root growth, nutrient uptake and shoot growth dynamics in grapevines: Root-zone warming, growth and N partitioning. Australian Journal of Grape and Wine Research, Vol. 21, no. 3, p. 479–489.
- COOPER, Allen John, 1973. Root temperature and plant growth: a review.
- CORLETT, J. E., ONG, C. K., et BLACK, C. R., 1989. Microclimatic modification in intercropping and alley-cropping systems. In : International Workshop on the Applications of Meteorology to Agroforestry Systems Planning and Management, Nairobi (Kenya), 9-13 Feb 1987. Icrf.
- CRITTENDEN, S.J., POOT, N., HEINEN, M., VAN BALEN, D.J.M. and PULLEMAN, M.M., 2015. Soil physical quality in contrasting tillage systems in organic and conventional farming. Soil and Tillage Research, Vol. 154, p. 136–144.
- DARNHOFER, T., GATAMA, D., HUXLEY, P., et al., 1989. The rainfall distribution at a tree/crop interface. In : International Workshop on the Applications of Meteorology to Agroforestry Systems Planning and Management, Nairobi (Kenya), 9-13 Feb 1987. Icrf.
- DE BAETS, N. et LEBEL, F., 2007. L'agroforesterie au Québec. Mémoire présenté à la Commission pour l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois (CAAAQ).
- DÍAZ-PÉREZ, Juan C., PHATAK, Sharad C., GIDDINGS, David, BERTRAND, Denne and MILLS, Harry A., 2005. Root zone temperature, plant growth, and fruit yield of tomatillo as affected by plastic film mulch. HortScience, Vol. 40, no. 5, p. 1312–1319.
- DÍAZ-PÉREZ, Juan C., 2009. Root zone temperature, plant growth and yield of broccoli [*Brassica oleracea* (Plenck) var. *italica*] as affected by plastic film mulches. Scientia Horticulturae, Vol. 123, no. 2, p. 156–163.
- DODD, I. C., HE, J., TURNBULL, C. G. N., et al., 2000. The influence of supra-optimal root-zone temperatures on growth and stomatal conductance in *Capsicum annuum* L. Journal of Experimental Botany, vol. 51, no 343, p. 239-248.
- DOMISCH, Timo, FINÉR, Leena, LEHTO, Tarja and SMOLANDER, Aino, 2002. Effect of soil temperature on nutrient allocation and mycorrhizas in Scots pine seedlings. Plant and Soil, Vol. 239, no. 2, p. 173–185.
- DUPRAZ, Christian, BURGESS, P., GAVALAND, A., et al., 2005. Synthesis of the silvoarable agroforestry for Europe project. INRA-UMR System Editions, Montpellier, 2005, vol. 254.

EUROSTAT, Statistiques européennes, [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search\\_database](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database).

GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.

GONZALEZ-FUENTES, Jose A., SHACKEL, Kenneth, HEINRICH LIETH, J., ALBORNOZ, Francisco, BENAVIDES-MENDOZA, Adalberto and EVANS, Richard Y., 2016. Diurnal root zone temperature variations affect strawberry water relations, growth, and fruit quality. *Scientia Horticulturae*, Vol. 203, p. 169–177.

GRACE, J., 1977. *Plant response to wind* Academic Press. New York, New York, USA.

GUYOT, Gerard, 1963. *Les Brise-Vent: Modification des microclimats et amelioration de la production agricole*. Institut national de la recherche agronomique.

GUYOT, G. Darnhofer, et al., 1987. Les effets aérodynamiques et microclimatiques des brise-vent et des aménagements régionaux. *Meteorology and Agroforestry; Proceedings*. In : *International Workshop to the Applications of the Meteorology to Agroforestry Systems Planning and Management*, Nairobi (Kenia). ICRAF, Nairobi (Kenia).

GUYOT, Gérard, 1997. *Climatologie de l'environnement: de la plante aux écosystèmes*. Paris : Masson. Enseignement des sciences de la vie. ISBN 978-2-225-85514-6. OCLC: 247011980

GUYOT, G. et VERBRUGGHE, M., 1976. Etude de la variabilité spatiale du microclimat à l'échelle parcellaire en zone bocagère. *Les bocages: Histoire, Ecologie, Economie*, INRA, CNRS, ENSA and Université de Rennes, INRA Editions, Rennes.

HALWEIL, Brian, 2007. *Still No Free Lunch*. Worldwatch Institute.

HAM, Jay M., KLUITENBERG, G. J., et LAMONT, W. J., 1993. Optical properties of plastic mulches affect the field temperature regime. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 118, no 2, p. 188-193.

HILL, Stuart B. et MACRAE, Rod J., 1996. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of sustainable agriculture*, vol. 7, no 1, p. 81-87.

HILLEL, Daniel, 1982. *Introduction into soil physics*. Academic, San Diego, Calif.

HORTON, R., BRISTOW, Keith L., KLUITENBERG, G. J., et al., 1996. Crop residue effects on surface radiation and energy balance—review. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 54, no 1-2, p. 27-37.

HUSSAIN, Shahid et MAQSOOD, MUHAMMAD AAMER, 2011. Root zone temperature influences nutrient accumulation and use in maize. *Pak. J. Bot*, vol. 43, no 3, p. 1551-1556.

Ji, Shangning et UNGER, Paul W., 2001. Soil water accumulation under different precipitation, potential evaporation, and straw mulch conditions. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 65, no 2, p. 442-448.

JOHNSTON, Alice S.A., SIBLY, Richard M., HODSON, Mark E., ALVAREZ, Tania and THORBEK, Pernille, 2015. Effects of agricultural management practices on earthworm populations and crop yield: validation and application of a mechanistic modelling approach. *Journal of Applied Ecology*, Vol. 52, no. 5, p. 1334–1342.

KANG, B. T., REYNOLDS, L., et ATTA-KRAH, A. N., 1990. Alley farming. *Advances in agronomy*, vol. 43, p. 315-359.

KASCHUK, Glaciela, ALBERTON, Odair, et HUNGRIA, Mariangela, 2010. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 42, no 1, p. 1-13.

KUMAR, R., SOOD, S., SHARMA, S., KASANA, R. C., PATHANIA, V. L., SINGH, B. and SINGH, R. D., 2014. Effect of plant spacing and organic mulch on growth, yield and quality of natural sweetener plant *Stevia* and soil fertility in western Himalayas. *Int J Plant Prod.*, Vol. 8, p. 311–333.

LEE, Seong Hee, SINGH, Adya Prasad, CHUNG, Gap Chae, et al., 2004. Exposure of roots of cucumber (*Cucumis sativus*) to low temperature severely reduces root pressure, hydraulic conductivity and active transport of nutrients. *Physiologia Plantarum*, vol. 120, no 3, p. 413-420.

LINSKENS, H. F., 1951. Niederschlagsmessungen unter verschiedenen Baumkronentypen im belaubten und unbelaubten Zustand.

LUNDGREN B.O. et RAIN TREE J.B., 1982. Sustained agroforestry In Nestel B (eds) *Agricultural research for development: potentials and challenges in Asia*. ISNAR, The Hague, Pays-Bas, p 37-49.

MARFÀ, O., CÁCERES, R. and GURI, S., 2004. Oxyfertigation: a new technique for soilless culture under Mediterranean conditions. In : *International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics 697* [online]. p. 65–72. [Accessed 30 June 2016]. Available from: [http://www.actahort.org/books/697/697\\_6.htm](http://www.actahort.org/books/697/697_6.htm)

MARTIUS, Christopher, HÖFER, Hubert, GARCIA, Marcos VB, RÖMBKE, Jörg, FÖRSTER, Bernhard and HANAGARTH, Werner, 2004. Microclimate in agroforestry systems in central Amazonia: does canopy closure matter to soil organisms? *Agroforestry Systems*, Vol. 60, no. 3, p. 291–304.

MONTEITH, J. L., ONG, C. K., et CORLETT, J. E., 1991. Microclimatic interactions in agroforestry systems. *Forest Ecology and management*, vol. 45, no 1, p. 31-44.

NEUMANN, I. F. et PIETROWICZ, P., 1989. Light and water availability in fields with and without trees. An example from Nyabisindu in Rwanda. In : *International Workshop on the Applications of Meteorology to Agroforestry Systems Planning and Management*, Nairobi (Kenya), 9-13 Feb 1987. ICRAF.

PASQUIER, C., 2014. Agroforesterie et permaculture en climat tempéré. Quels enseignements tirer de l'analyse systémique du jardin- forêt des Fraternités Ouvrières de Mouscron ? Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome.

PENG, Yuan Ying and DANG, Qing-Lai, 2003. Effects of soil temperature on biomass production and allocation in seedlings of four boreal tree species. *Forest Ecology and Management*, Vol. 180, no. 1, p. 1–9.

Portail de l'environnement de Wallonie [en ligne]. Disponible sur : <http://environnement.wallonie.be>

PRAMANIK, P., BANDYOPADHYAY, K. K., BHADURI, Debarati, et al., 2015. Effect of mulch on soil thermal regimes-A review. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, vol. 8, no 3, p. 645.

QUÉNOL, Hervé et BELTRANDO, Gérard, 2006. Impact des haies brise-vent sur le gel printanier en arboriculture.

R Development Core Team (2016). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

REIFSNYDER, William E., DARNHOFER, Till, 1987. INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH IN AGROFORESTRY, WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME and DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT (eds.), 1989, *Meteorology and agroforestry: proceedings of an International Workshop on the Application of Meteorology to Agroforestry Systems Planning and Management*, Nairobi, 9-13 February 1987. Nairobi, Kenya : ICRAF. ISBN 978-92-9059-059-0.

RUTTER, A. J., 1975. The hydrological cycle in vegetation. *Vegetation and the Atmosphere*, vol. 1, p. 111-154.

SAKAMOTO, Masaru and SUZUKI, Takahiro, 2015. Effect of Root-Zone Temperature on Growth and Quality of Hydroponically Grown Red Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Red Wave). *American Journal of Plant Sciences*, Vol. 06, no. 14, p. 2350–2360.

- SAMAILA, A. A., AMANS, E. B., BABAJI, B. A., et al., 2011. Yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) as influenced by mulching, nitrogen and irrigation interval. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, vol. 1, no 3, p. 90-95.
- SHASHIDHAR, K. R., BHASKAR, R. N., PRIYADHARSHINI, P., et al., 2008. Effect of different organic mulches on pH, organic carbon content and microbial status of soil and its influence on leaf yield of M5 mulberry (*Morus indica* L.) under rainfed condition. *Current Biotica*, vol. 2, no 4, p. 405-413.
- SINKEVIČIENĖ, A., JODAUGIENĖ, D., PUPALIENĖ, R., et al., 2009. The influence of organic mulches on soil properties and crop yield. *Agron. Res.*, vol. 7, no 1, p. 485-491.
- STOLTZFUS, Rhonda M. Bode, TABER, Henry G. and AIELLO, Anthony S., 1998. Effect of increasing root-zone temperature on growth and nutrient uptake by "gold star" muskmelon plants 1. *Journal of Plant Nutrition*, Vol. 21, no. 2, p. 321–328. DOI 10.1080/01904169809365406.
- TEASDALE, J. R. et ABDUL-BAKI, A. A., 1997. Growth analysis of tomatoes in black polyethylene and hairy vetch production systems. *HortScience*, vol. 32, no 4, p. 659-663.
- TEASDALE, J. R. et MOHLER, C. L., 1993. Light transmittance, soil temperature, and soil moisture under residue of hairy vetch and rye. *Agronomy Journal*, vol. 85, no 3, p. 673-680.
- VAN EIMERN, Josef, 1964. Windbreaks and shelterbelts. Secretariat of the World Meteorological Organization.
- WMO, 2010: Guide to Agricultural Meteorological Practice. WMO-No. 134. World Meteorological Organization. ISBN 978-92-63-10134-1.
- XU, Qingzhang et HUANG, Bingru, 2000. Effects of differential air and soil temperature on carbohydrate metabolism in creeping bentgrass. *Crop Science*, vol. 40, no 5, p. 1368-1374.
- YAN, Qiuyan, DUAN, Zengqiang, MAO, Jingdong, LI, Xun and DONG, Fei, 2012. Effects of root-zone temperature and N, P, and K supplies on nutrient uptake of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings in hydroponics. *Soil Science and Plant Nutrition*, Vol. 58, no. 6, p. 707–717.
- YAO, Huaiying, BOWMAN, Daniel, et SHI, Wei, 2011. Seasonal variations of soil microbial biomass and activity in warm-and cool-season turfgrass systems. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 43, no 7, p. 1536-1543.
- ZHANG, Y. P., QIAO, Y. X., ZHANG, Y. L., et al., 2008. Effects of root temperature on leaf gas exchange and xylem sap abscisic acid concentrations in six Cucurbitaceae species. *Photosynthetica*, vol. 46, no 3, p. 356-362.
- ZOBECK, TEDM and ONSTAD, CA, 1987. RAINFALL EFFECTS ON RANDOM ROUGHNESS. *Soil & Tillage Research*. Vol. 9, p. 1–20.

## ANNEXES

### Figures

Figure A : Distance à l'arbre le plus proche sur le jardin d'Aalbeke

Figure B : Densité d'arbres calculée sur un rayon d'influence de l'arbre de 10m et 2,5m, sur le jardin d'Aalbeke (à gauche), et sur la parcelle de référence (à droite)

Figure C : Groupes de points d'échantillonnage pour les journées de type 1 sur le jardin d'Aalbeke

Figure D : Groupes de points d'échantillonnage pour les journées de type 2 sur le jardin d'Aalbeke

Figure E : Regroupements de points d'échantillonnage pour la parcelle de référence

Figure F : Boxplots pour les indices de température journalière du sol des journées à faible ETP (à gauche) et à forte ETP (à droite)

Figure G : Humidité du sol des 4 groupes identifiés

### Tables

Tableau A : Caractéristiques des variables paysagères mesurées pour chacun des points d'échantillonnage (Gestion du sol : 0 : non travaillé, 1 : paillé, 2 : travaillé)

Tableau B : Coefficients de corrélation et p-values pour les différentes variables considérées lors des journées de type 1 (en haut) et de type 2 (en bas)

Distance à l'arbre le plus proche (en m) sur le jardin d'Aalbeke (Belgique)

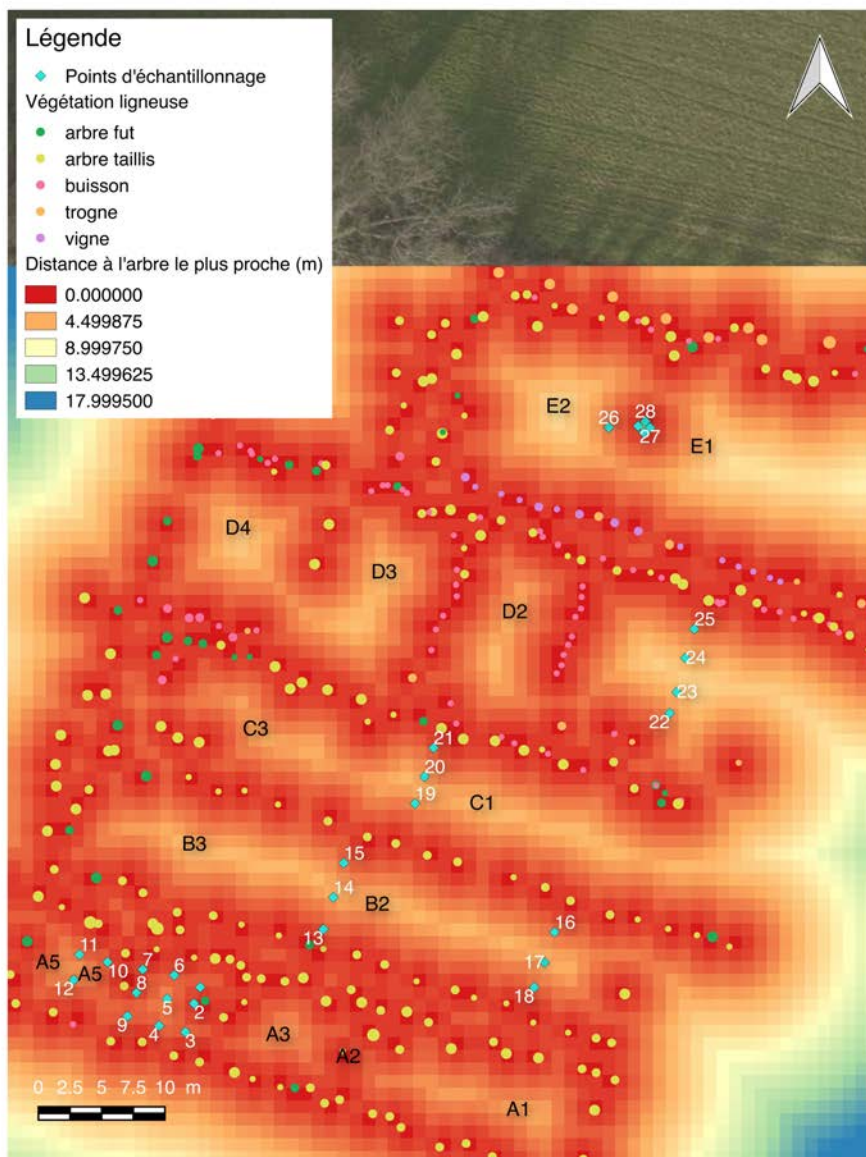
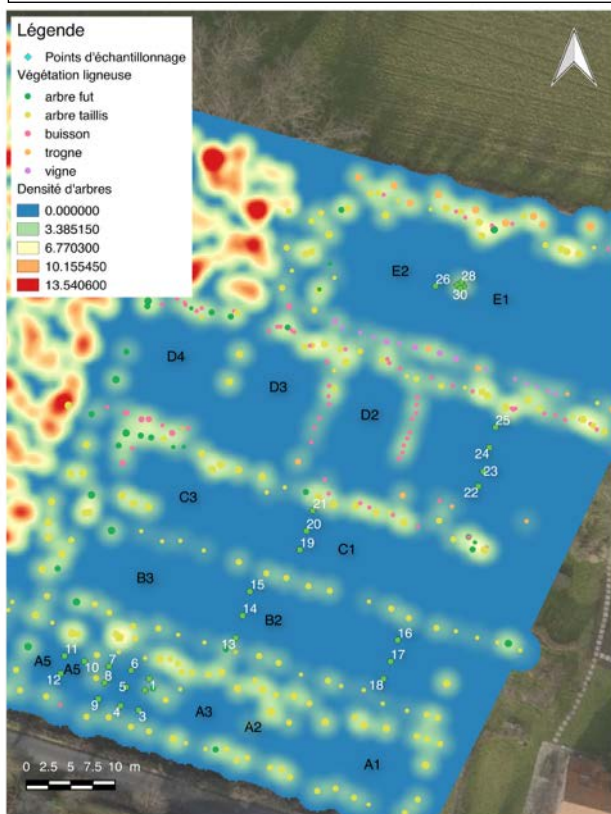


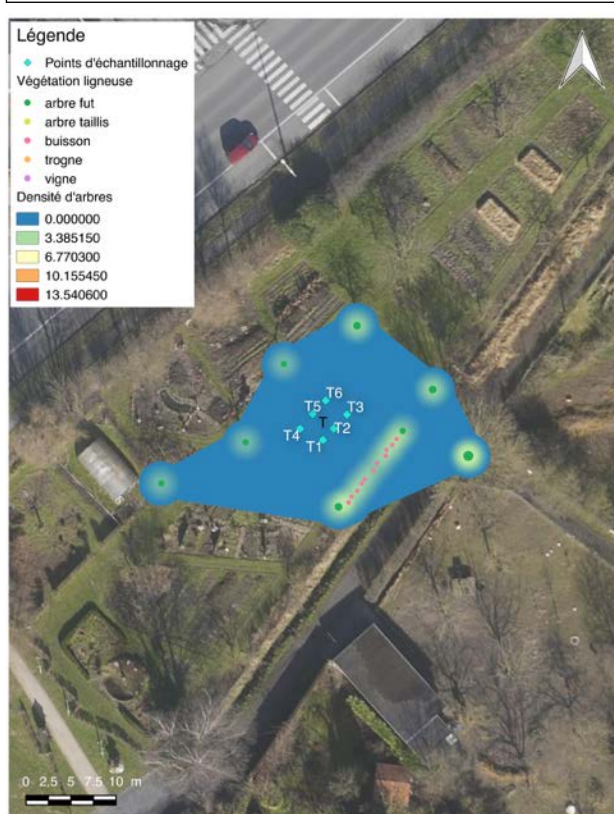
Figure A : Distance à l'arbre le plus proche sur le jardin d'Aalbeke



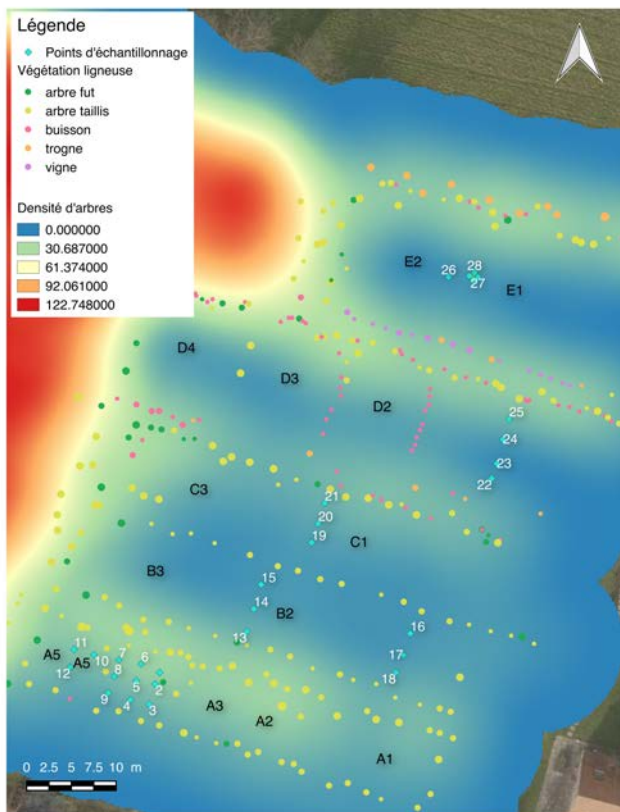
Densité d'arbres (nombre d'arbres) calculée sur un rayon de 2,5m, sur le jardin d'Aalbeke (Belgique)



Densité d'arbres (nombre d'arbres) calculée sur un rayon de 2,5m, sur la parcelle de référence à « La Prairie », Mouscron (Belgique)



Densité d'arbres (nombre d'arbres) calculée sur un rayon de 10m, sur le jardin d'Aalbeke (Belgique)



Densité d'arbres (nombre d'arbres) calculée sur un rayon de 10m, sur la parcelle de référence à « La Prairie », Mouscron (Belgique)

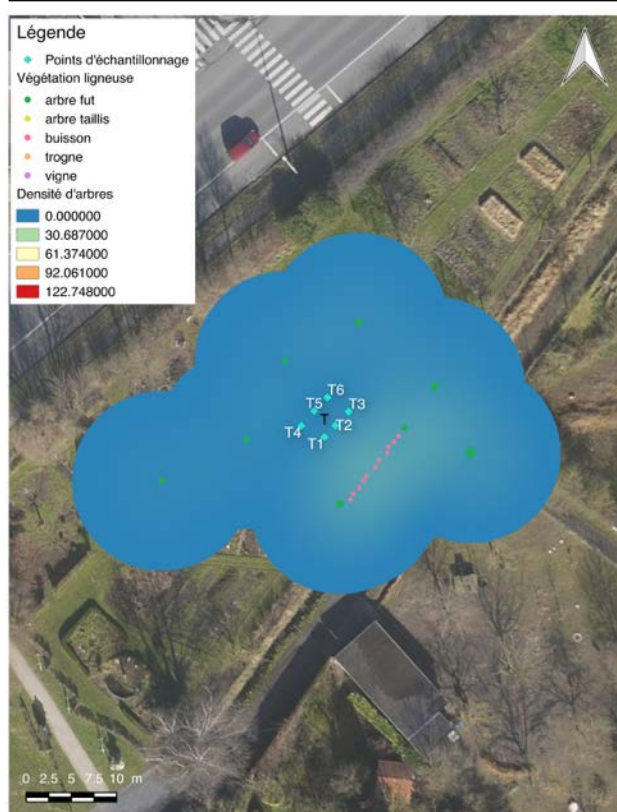
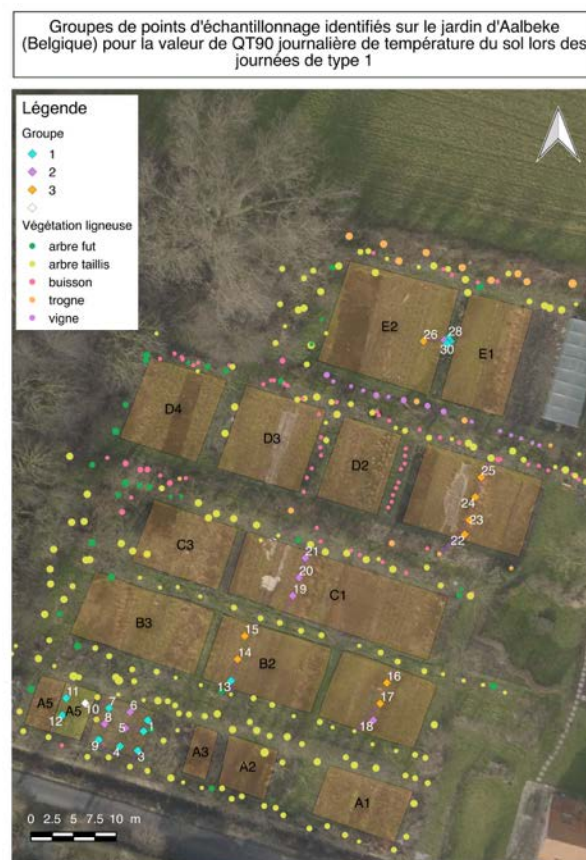
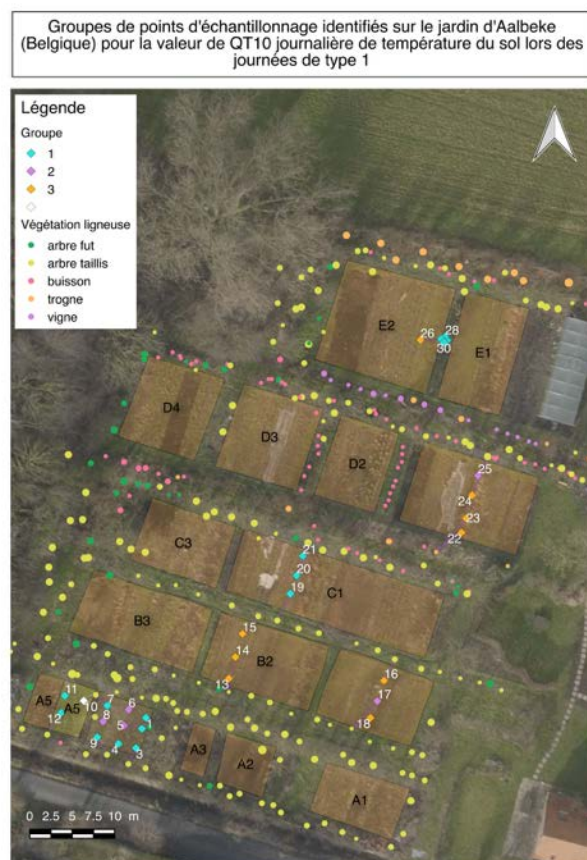
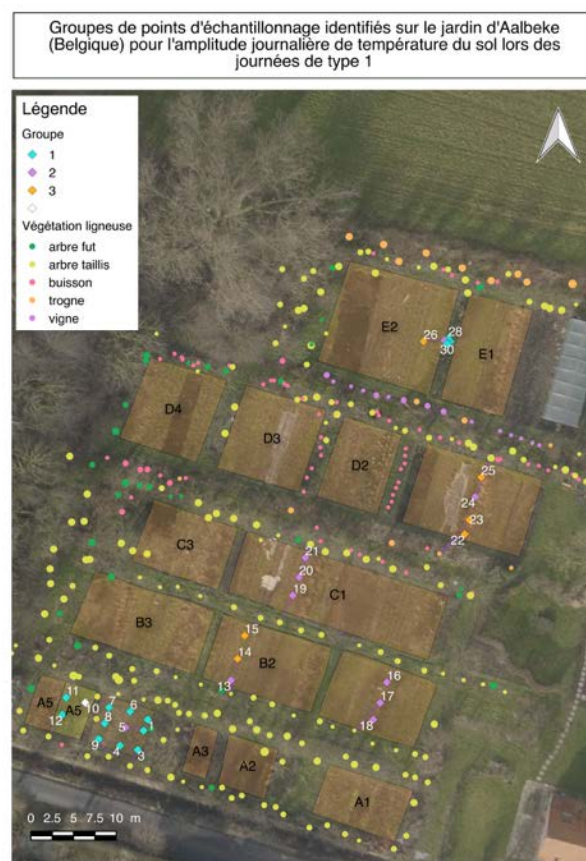
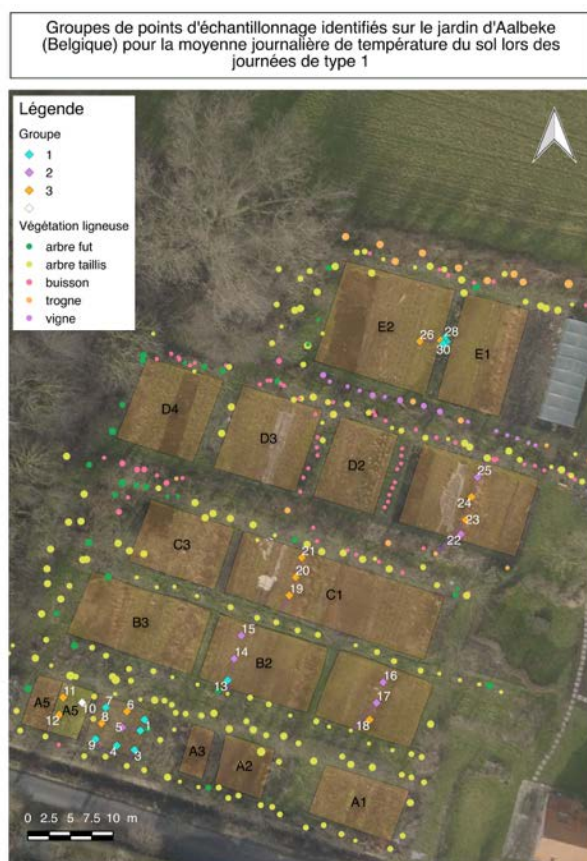


Figure B : Densité d'arbres calculée sur un rayon d'influence de l'arbre de 10m et 2,5m, sur le jardin d'Aalbeke (à gauche), et sur la parcelle de référence (à droite)

**Tableau A : Caractéristiques des variables paysagères mesurées pour chacun des points d'échantillonnage (Gestion du sol : 0 : non travaillé, 1 : paillé, 2 : travaillé)**

| Point | Placette | Surface (m²) | Gestion du sol | Distance à l'arbre le plus proche (m) | Orientation à l'arbre le plus proche (°) | Densité d'arbres dans un rayon de 2,5m | Densité d'arbres dans un rayon de 10m |
|-------|----------|--------------|----------------|---------------------------------------|--|--|---------------------------------------|
| 1     | A4       | 38.958857    | 0              | 1.00000                               | 149                                      | 1.15621                                | 26.48654                              |
| 2     | A4       | 38.958857    | 0              | 1.00000                               | 81                                       | 1.47749                                | 24.04494                              |
| 3     | A4       | 38.958857    | 0              | 2.23607                               | 216                                      | 0.13988                                | 17.54919                              |
| 4     | A4       | 38.958857    | 0              | 1.41421                               | 238                                      | 0.32798                                | 15.96798                              |
| 5     | A4       | 38.958857    | 0              | 3.16228                               | 91                                       | 0                                      | 22.38439                              |
| 6     | A4       | 38.958857    | 0              | 2.23607                               | 60                                       | 0.03121                                | 26.69115                              |
| 7     | A4       | 38.958857    | 0              | 1.41421                               | 300                                      | 0.50495                                | 24.90783                              |
| 8     | A4       | 38.958857    | 0              | 1.41421                               | 289                                      | 1.03395                                | 19.87951                              |
| 9     | A4       | 38.958857    | 0              | 2.23607                               | 137                                      | 0.00437                                | 14.18681                              |
| 10    | A5       | 23.117365    | 1              | 2.23607                               | 72                                       | 0.71061                                | 23.04668                              |
| 11    | A5       | 23.117365    | 1              | 2.82843                               | 27                                       | 0                                      | 22.47341                              |
| 12    | A5       | 23.117365    | 1              | 3.00000                               | 224                                      | 0                                      | 18.04725                              |
| 13    | B2       | 108.397115   | 2              | 1.41421                               | 179                                      | 0.71368                                | 15.90340                              |
| 14    | B2       | 108.397115   | 2              | 4.47214                               | 196                                      | 0                                      | 9.49957                               |
| 15    | B2       | 108.397115   | 2              | 2.82843                               | 54                                       | 0                                      | 6.90203                               |
| 16    | B1       | 98.369854    | 2              | 2.23607                               | 38                                       | 0                                      | 6.77714                               |
| 17    | B1       | 98.369854    | 2              | 4.12311                               | 235                                      | 0                                      | 8.32306                               |
| 18    | B1       | 98.369854    | 2              | 2.00000                               | 249                                      | 0                                      | 11.06856                              |
| 19    | C1       | 190.535676   | 2              | 3.60555                               | 216                                      | 0                                      | 9.67096                               |
| 20    | C1       | 190.535676   | 2              | 4.24264                               | 28                                       | 0                                      | 12.54894                              |
| 21    | C1       | 190.535676   | 2              | 2.23607                               | 31                                       | 0.98040                                | 15.83340                              |
| 22    | D1       | 137.600942   | 2              | 3.60555                               | 243                                      | 0                                      | 6.82723                               |
| 23    | D1       | 137.600942   | 2              | 5.00000                               | 234                                      | 0                                      | 4.06456                               |
| 24    | D1       | 137.600942   | 2              | 4.47214                               | 31                                       | 0                                      | 8.62065                               |
| 25    | D1       | 137.600942   | 2              | 2.23607                               | 38                                       | 0                                      | 17.66227                              |
| 26    | E2       | 168.917770   | 2              | 3.00000                               | 88                                       | 0                                      | 5.57596                               |
| 27    |          |              | 0              | 0.00000                               | 188                                      | 2.90165                                | 7.32926                               |
| 28    |          |              | 0              | 0.00000                               | 189                                      | 2.95062                                | 8.08675                               |
| 29    |          |              | 0              | 0.00000                               | 91                                       | 2.80493                                | 7.49411                               |
| 30    |          |              | 0              | 0.00000                               | 23                                       | 2.75719                                | 6.90591                               |
| T1    | T        | 76.635064    | 2              | 6476                                  | 120                                      | 0                                      | 3.52554                               |
| T2    | T        | 76.635064    | 2              | 6343                                  | 116                                      | 0                                      | 3.54045                               |
| T3    | T        | 76.635064    | 2              | 6144                                  | 119                                      | 0                                      | 3.39588                               |
| T4    | T        | 76.635064    | 2              | 6181                                  | 298                                      | 0                                      | 1.13162                               |
| T5    | T        | 76.635064    | 2              | 6629                                  | 317                                      | 0                                      | 1.05465                               |
| T6    | T        | 76.635064    | 2              | 6488                                  | 261                                      | 0                                      | 1.25045                               |





**Figure C : Groupes de points d'échantillonnage pour les journées de type 1 sur le jardin d'Aalbeke**



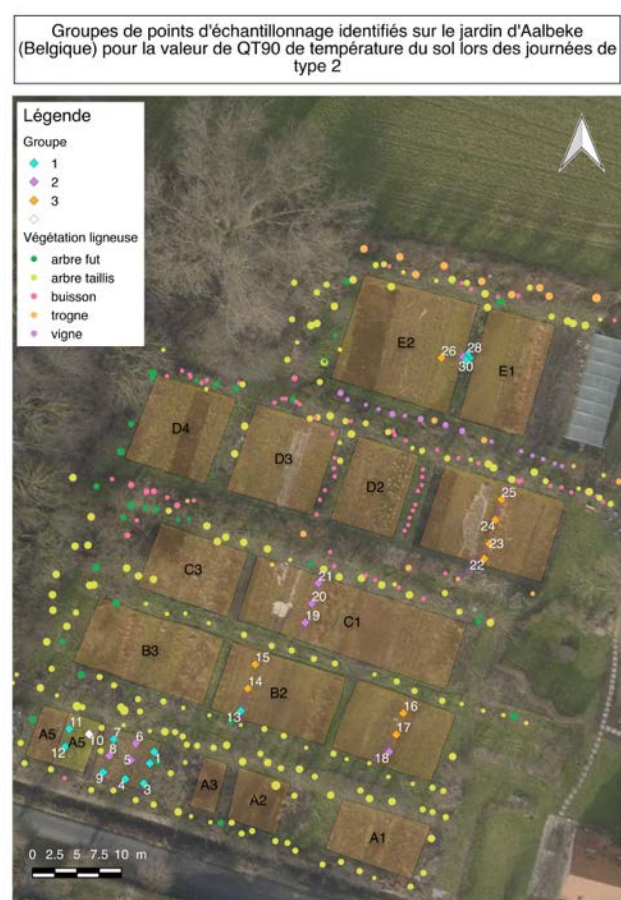
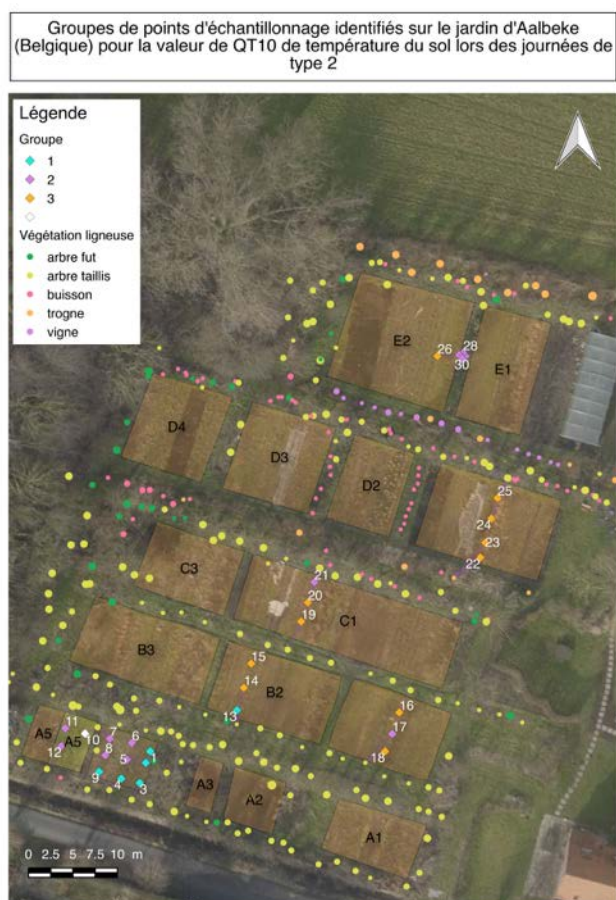
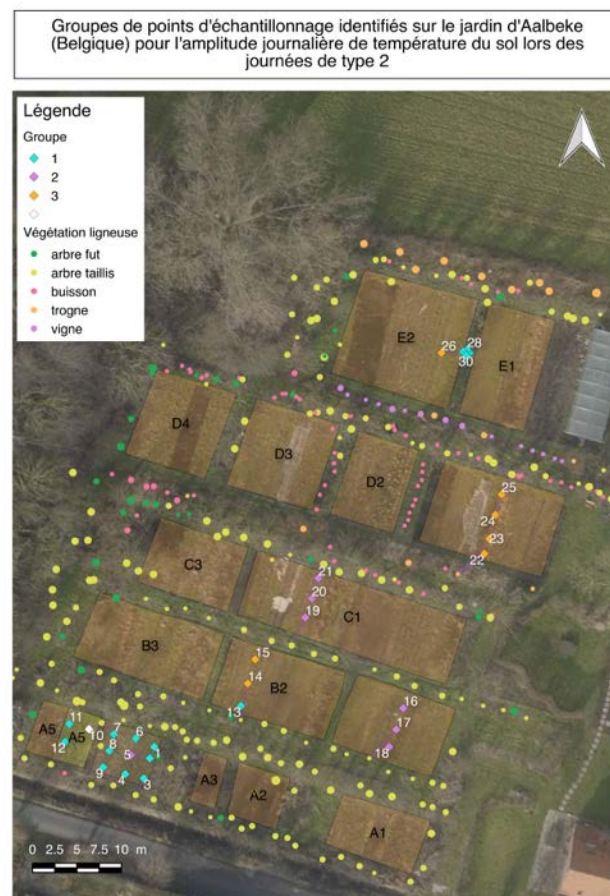
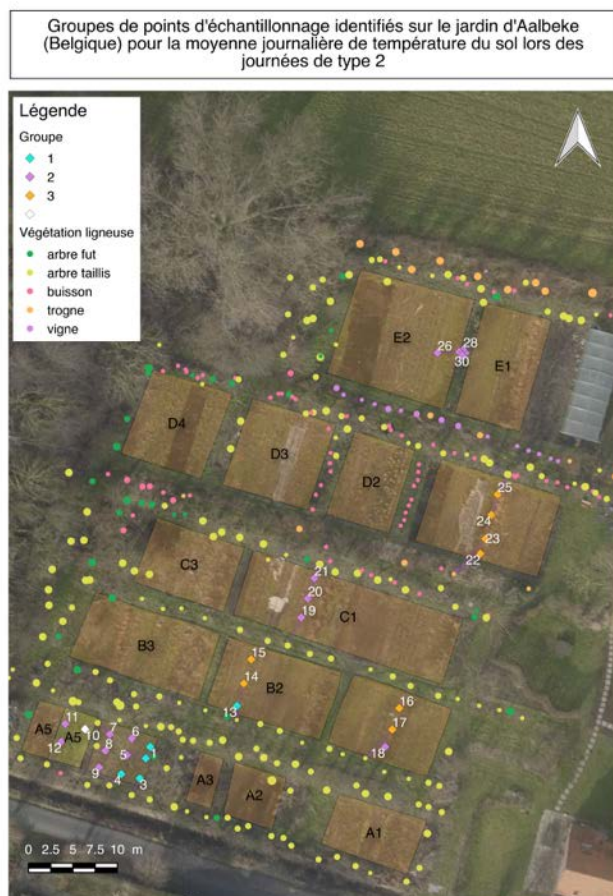


Figure D : Groupes de points d'échantillonnage pour les journées de type 2 sur le jardin d'Aalbeke

Groupes de points d'échantillonnage identifiés sur la parcelle de référence à "La Prairie", Mouscron (Belgique), pour la moyenne journalière de température du sol lors des journées de type 1.



Groupes de points d'échantillonnage identifiés sur la parcelle de référence à "La Prairie", Mouscron (Belgique), pour les valeurs d'amplitude, de QT10 et QT90 des journées de type 1 et 2, et pour la moyenne journalière de température du sol lors des journées de type 2.



**Figure E : Regroupements de points d'échantillonnage pour la parcelle de référence**

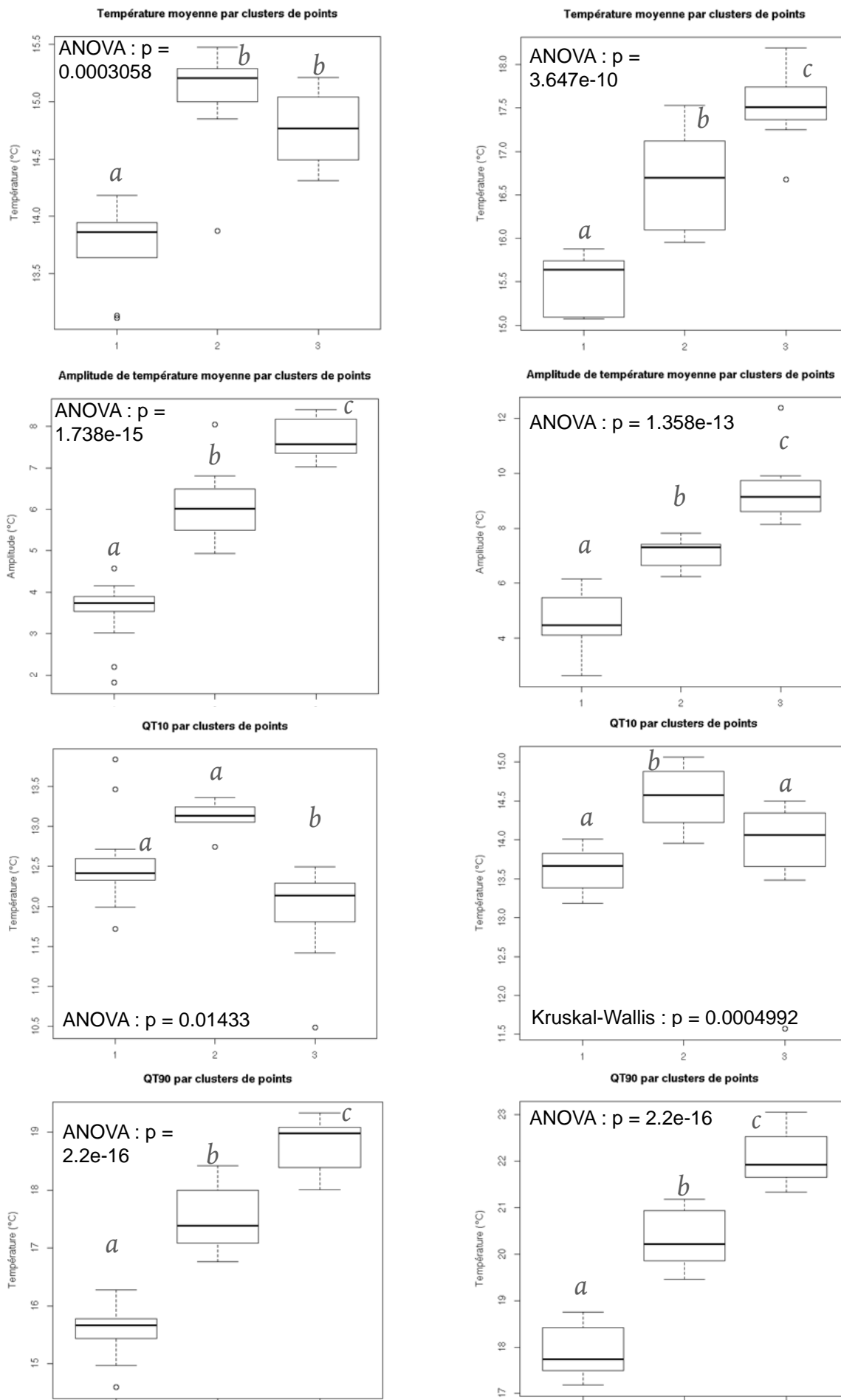
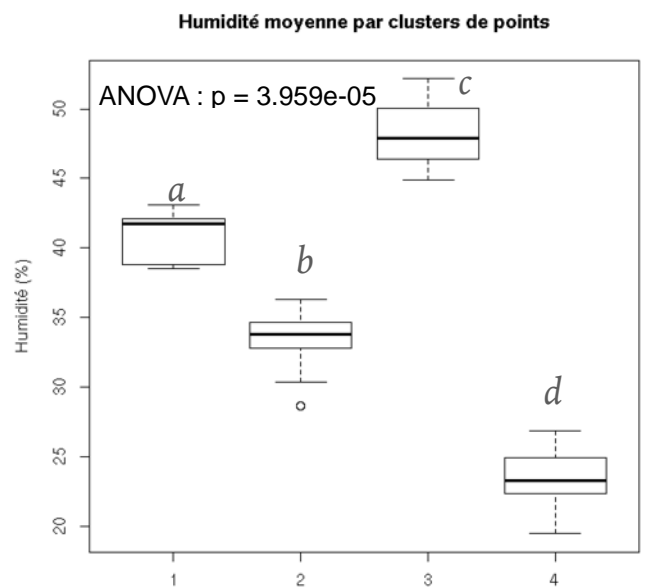
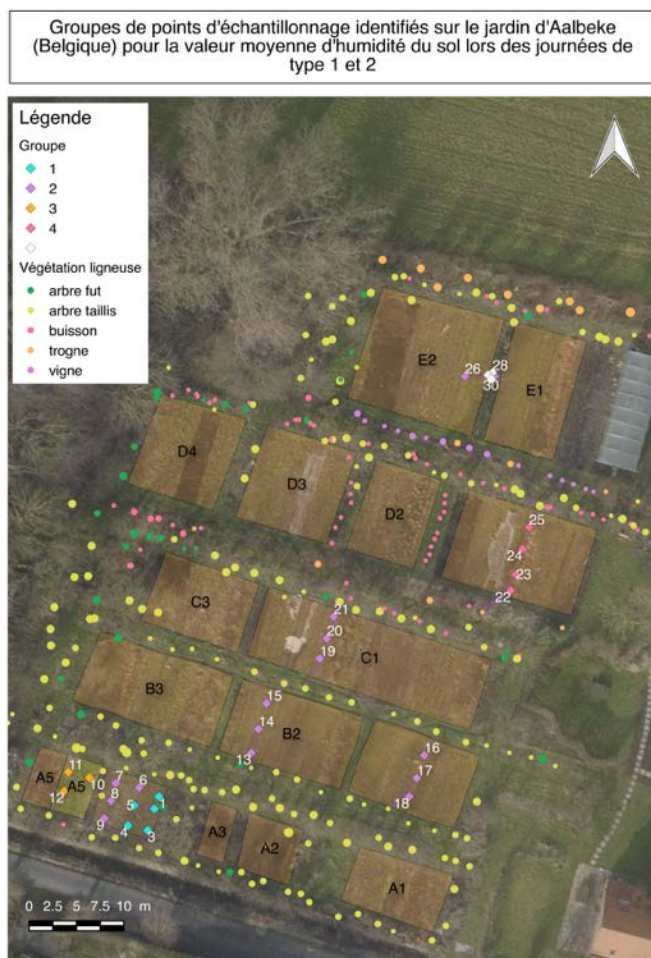


Figure F : Boxplots (médiane, QT25, QT75, min et max) pour les indices de température journalière du sol des journées à faible ETP (à gauche) et à forte ETP (à droite)





Groupes de points d'échantillonnage identifiés sur la parcelle de référence à "La Prairie", Mouscron (Belgique), pour la valeur moyenne d'humidité du sol lors des journées de type 1 et 2



Figure G : Humidité du sol des 4 groupes identifiés

Tableau B : Coefficients de corrélation et p-values pour les différentes variables considérées lors des

| \$coef.estimates | Surface | Dist_arbre | Or_arbre | d_2.5m | d_10m | V_vent | Ryt   | Humidite | T_moy | T_amplitude | T_QT10 | T_QT90 |
|------------------|---------|------------|----------|--------|-------|--------|-------|----------|-------|-------------|--------|--------|
| Surface          | 1.00    | 0.28       | -0.26    | -0.28  | -0.47 | 0.46   | -0.17 | -0.43    | 0.47  | 0.66        | -0.17  | 0.61   |
| Dist_arbre       | 0.28    | 1.00       | 0.14     | -0.62  | -0.78 | 0.63   | 0.24  | -0.67    | 0.67  | 0.69        | -0.02  | 0.73   |
| Or_arbre         | -0.26   | 0.14       | 1.00     | 0.02   | -0.17 | -0.23  | 0.07  | -0.19    | -0.02 | 0.02        | -0.13  | 0.00   |
| d_2.5m           | -0.28   | -0.62      | 0.02     | 1.00   | 0.64  | -0.53  | -0.17 | 0.40     | -0.69 | -0.53       | -0.24  | -0.64  |
| d_10m            | -0.47   | -0.78      | -0.17    | 0.64   | 1.00  | -0.69  | -0.30 | 0.77     | -0.61 | -0.84       | 0.28   | -0.79  |
| V_vent           | 0.46    | 0.63       | -0.23    | -0.53  | -0.69 | 1.00   | 0.34  | -0.49    | 0.52  | 0.65        | -0.13  | 0.64   |
| Ryt              | -0.17   | 0.24       | 0.07     | -0.17  | -0.30 | 0.34   | 1.00  | -0.26    | 0.19  | 0.13        | 0.04   | 0.19   |
| Humidite         | -0.43   | -0.67      | -0.19    | 0.40   | 0.77  | -0.49  | -0.26 | 1.00     | -0.61 | -0.85       | 0.28   | -0.80  |
| T_moy            | 0.47    | 0.67       | -0.02    | -0.69  | -0.61 | 0.52   | 0.19  | -0.61    | 1.00  | 0.73        | 0.43   | 0.91   |
| T_amplitude      | 0.66    | 0.69       | 0.02     | -0.53  | -0.84 | 0.65   | 0.13  | -0.85    | 0.73  | 1.00        | -0.29  | 0.94   |
| T_QT10           | -0.17   | -0.02      | -0.13    | -0.24  | 0.28  | -0.13  | 0.04  | 0.28     | 0.43  | -0.29       | 1.00   | 0.03   |
| T_QT90           | 0.61    | 0.73       | 0.00     | -0.64  | -0.79 | 0.64   | 0.19  | -0.80    | 0.91  | 0.94        | 0.03   | 1.00   |

| \$p.values  | Surface | Dist_arbre | Or_arbre | d_2.5m | d_10m | V_vent | Ryt   | Humidite | T_moy | T_amplitude | T_QT10 | T_QT90 |
|-------------|---------|------------|----------|--------|-------|--------|-------|----------|-------|-------------|--------|--------|
| Surface     | 0.000   | 0.179      | 0.213    | 0.169  | 0.017 | 0.022  | 0.404 | 0.033    | 0.018 | 0.000       | 0.421  | 0.001  |
| Dist_arbre  | 0.179   | 0.000      | 0.502    | 0.001  | 0.000 | 0.001  | 0.253 | 0.000    | 0.000 | 0.000       | 0.935  | 0.000  |
| Or_arbre    | 0.213   | 0.502      | 0.000    | 0.913  | 0.427 | 0.279  | 0.757 | 0.353    | 0.908 | 0.938       | 0.535  | 0.988  |
| d_2.5m      | 0.169   | 0.001      | 0.913    | 0.000  | 0.001 | 0.007  | 0.404 | 0.046    | 0.000 | 0.007       | 0.241  | 0.001  |
| d_10m       | 0.017   | 0.000      | 0.427    | 0.001  | 0.000 | 0.000  | 0.148 | 0.000    | 0.001 | 0.000       | 0.177  | 0.000  |
| V_vent      | 0.022   | 0.001      | 0.279    | 0.007  | 0.000 | 0.000  | 0.094 | 0.012    | 0.008 | 0.000       | 0.535  | 0.001  |
| Ryt         | 0.404   | 0.253      | 0.757    | 0.404  | 0.148 | 0.094  | 0.000 | 0.210    | 0.355 | 0.540       | 0.862  | 0.365  |
| Humidite    | 0.033   | 0.000      | 0.353    | 0.046  | 0.000 | 0.012  | 0.210 | 0.000    | 0.001 | 0.000       | 0.176  | 0.000  |
| T_moy       | 0.018   | 0.000      | 0.908    | 0.000  | 0.001 | 0.008  | 0.355 | 0.001    | 0.000 | 0.000       | 0.032  | 0.000  |
| T_amplitude | 0.000   | 0.000      | 0.938    | 0.007  | 0.000 | 0.000  | 0.540 | 0.000    | 0.000 | 0.000       | 0.154  | 0.000  |
| T_QT10      | 0.421   | 0.935      | 0.535    | 0.241  | 0.177 | 0.535  | 0.862 | 0.176    | 0.032 | 0.154       | 0.000  | 0.882  |
| T_QT90      | 0.001   | 0.000      | 0.988    | 0.001  | 0.000 | 0.001  | 0.365 | 0.000    | 0.000 | 0.000       | 0.882  | 0.000  |

journées de type 1 (en haut) et de type 2 (en bas)

| \$coef.estimates | Surface | Dist_arbre | Or_arbre | d_2.5m | d_10m | V_vent | Ryt   | Humidite | T_moy | T_amplitude | T_QT10 | T_QT90 |
|------------------|---------|------------|----------|--------|-------|--------|-------|----------|-------|-------------|--------|--------|
| Surface          | 1.00    | 0.28       | -0.26    | -0.28  | -0.47 | 0.46   | -0.17 | -0.43    | 0.49  | 0.54        | 0.05   | 0.54   |
| Dist_arbre       | 0.28    | 1.00       | 0.14     | -0.62  | -0.78 | 0.63   | 0.24  | -0.67    | 0.66  | 0.69        | 0.09   | 0.72   |
| Or_arbre         | -0.26   | 0.14       | 1.00     | 0.02   | -0.17 | -0.23  | 0.07  | -0.19    | 0.02  | 0.09        | -0.17  | 0.06   |
| d_2.5m           | -0.28   | -0.62      | 0.02     | 1.00   | 0.64  | -0.53  | -0.17 | 0.40     | -0.69 | -0.53       | -0.39  | -0.63  |
| d_10m            | -0.47   | -0.78      | -0.17    | 0.64   | 1.00  | -0.69  | -0.30 | 0.77     | -0.68 | -0.83       | 0.10   | -0.78  |
| V_vent           | 0.46    | 0.63       | -0.23    | -0.53  | -0.69 | 1.00   | 0.34  | -0.49    | 0.54  | 0.64        | 0.00   | 0.63   |
| Ryt              | -0.17   | 0.24       | 0.07     | -0.17  | -0.30 | 0.34   | 1.00  | -0.26    | 0.20  | 0.21        | 0.02   | 0.23   |
| Humidite         | -0.43   | -0.67      | -0.19    | 0.40   | 0.77  | -0.49  | -0.26 | 1.00     | -0.66 | -0.84       | 0.12   | -0.79  |
| T_moy            | 0.49    | 0.66       | 0.02     | -0.69  | -0.68 | 0.54   | 0.20  | -0.66    | 1.00  | 0.84        | 0.52   | 0.95   |
| T_amplitude      | 0.54    | 0.69       | 0.09     | -0.53  | -0.83 | 0.64   | 0.21  | -0.84    | 0.84  | 1.00        | -0.02  | 0.96   |
| T_QT10           | 0.05    | 0.09       | -0.17    | -0.39  | 0.10  | 0.00   | 0.02  | 0.12     | 0.52  | -0.02       | 1.00   | 0.26   |
| T_QT90           | 0.54    | 0.72       | 0.06     | -0.63  | -0.78 | 0.63   | 0.23  | -0.79    | 0.95  | 0.96        | 0.26   | 1.00   |

| \$p.values  | Surface | Dist_arbre | Or_arbre | d_2.5m | d_10m | V_vent | Ryt   | Humidite | T_moy | T_amplitude | T_QT10 | T_QT90 |
|-------------|---------|------------|----------|--------|-------|--------|-------|----------|-------|-------------|--------|--------|
| Surface     | 0.000   | 0.179      | 0.213    | 0.169  | 0.017 | 0.022  | 0.404 | 0.033    | 0.013 | 0.005       | 0.823  | 0.006  |
| Dist_arbre  | 0.179   | 0.000      | 0.502    | 0.001  | 0.000 | 0.001  | 0.253 | 0.000    | 0.000 | 0.000       | 0.653  | 0.000  |
| Or_arbre    | 0.213   | 0.502      | 0.000    | 0.913  | 0.427 | 0.279  | 0.757 | 0.353    | 0.918 | 0.663       | 0.415  | 0.779  |
| d_2.5m      | 0.169   | 0.001      | 0.913    | 0.000  | 0.001 | 0.007  | 0.404 | 0.046    | 0.000 | 0.006       | 0.052  | 0.001  |
| d_10m       | 0.017   | 0.000      | 0.427    | 0.001  | 0.000 | 0.000  | 0.148 | 0.000    | 0.000 | 0.000       | 0.644  | 0.000  |
| V_vent      | 0.022   | 0.001      | 0.279    | 0.007  | 0.000 | 0.000  | 0.094 | 0.012    | 0.006 | 0.001       | 0.996  | 0.001  |
| Ryt         | 0.404   | 0.253      | 0.757    | 0.404  | 0.148 | 0.094  | 0.000 | 0.210    | 0.326 | 0.315       | 0.926  | 0.268  |
| Humidite    | 0.033   | 0.000      | 0.353    | 0.046  | 0.000 | 0.012  | 0.210 | 0.000    | 0.000 | 0.000       | 0.571  | 0.000  |
| T_moy       | 0.013   | 0.000      | 0.918    | 0.000  | 0.000 | 0.006  | 0.326 | 0.000    | 0.000 | 0.000       | 0.007  | 0.000  |
| T_amplitude | 0.005   | 0.000      | 0.663    | 0.006  | 0.000 | 0.001  | 0.315 | 0.000    | 0.000 | 0.000       | 0.941  | 0.000  |
| T_QT10      | 0.823   | 0.653      | 0.415    | 0.052  | 0.644 | 0.996  | 0.926 | 0.571    | 0.007 | 0.941       | 0.000  | 0.217  |
| T_QT90      | 0.006   | 0.000      | 0.779    | 0.001  | 0.000 | 0.001  | 0.268 | 0.000    | 0.000 | 0.000       | 0.217  | 0.000  |



## Résumé

Le microclimat du sol, notamment la température et l'humidité, sont des facteurs de première importance pour la production maraîchère. Au moyen de mesures spatialisées, réalisées du 8 avril au 7 juillet 2016, le microclimat d'un verger-maraîcher a été décrit. En parallèle, le contexte paysager (distance, orientation et densité d'arbres) a été finement caractérisé. Par une approche statistique, nous montrons que les températures moyennes mesurées sont inférieures en systèmes agroforestiers par rapport à celles observées dans un système moins densément planté d'arbres. L'amplitude journalière de température du sol est tamponnée par la présence des arbres, et les extrêmes hauts de température du sol sont diminués. Ces effets sont plus marqués à proximité des arbres qu'au centre des placettes. Le paillage et le non-travail du sol permettent de tamponner les variations journalières de température et diminuent les températures moyennes de surface. Les conditions offertes par les systèmes agroforestiers et paillés sont également favorables au développement de la pédofaune, ce qui permet de retrouver un sol fonctionnel.

## Abstract

Soil microclimate, particularly temperature and humidity, greatly influence market gardening's production. Spatial measures conducted from 8 of april to 7 of july were used to describe the microclimate of an agroforestry system combining vegetables and fruits production. Distance, orientation to the trees and trees density was also characterised. With a statistical approach, we showed that measured mean temperatures were inferior in the agroforestry system compared to those observed in a system with less trees. Soil temperature range is buffered by trees' presence, and high soil temperature extremes are lowered. These effects diminish while distance to the trees increase. Mulching and no-tillage buffer temperature daily variations and lower mean surface temperatures. Conditions offered by agroforestry and mulched systems also are favorable to pedofauna development, allowing the soil to become functional again.