Innovations Agronomiques 79 (2020), 471-497

VITIFOREST : Evaluation de l'impact de l'arbre agroforestier en contexte viticole

Bourgade E.[1], Alonso Ugaglia A.[2], Bustillo V.[3], Dufourcq T.[4], Grimaldi J.[3,5], Guenser J.[6], Montagne V.[7], Ranjard L.[7]

[1] Arbre et Paysage 32, 93 route de Pessan, F-32000 Auch
[2] Bordeaux Sciences Agro, 1 cours du général de Gaulle, F-33170 Gradignan
[3] Université Paul Sabatier - UMR CESBIO – 13 av. Colonel Roche, F-31400 Toulouse
[4] Institut Français de la Vigne et du vin, Pôle Sud-ouest, Château de Mons, F-32100 Caussens
[5] INRAE - UMR System, 2 place Viala, F-34 060 Montpellier Cedex 1
[6] Vitinnov, 1 cours du général de Gaulle, F-33170 Gradignan
[7] INRAE - UMR Agroécologie, 17 rue de Sully, F-21065 Dijon Cedex
Les auteurs ont tous participé à part égale à la rédaction de cet article.
Correspondance : e.bourgade@ap32.fr ; Thierry.DUFOURCQ@vignevin.com

Résumé

Vitiforest est un projet exploratoire dont les objectifs étaient d'évaluer et de décrire l'impact de l'arbre sur le comportement agronomique de la vigne, le microclimat, ainsi que sur la biodiversité aérienne et du sol. Il s'est aussi intéressé aux aspects technico-économiques.

Une équipe pluridisciplinaire a testé divers protocoles et outils de mesure à l'échelle parcellaire. Six parcelles de vignes agroforestières ont été sélectionnées sur trois terroirs viticoles du sud-ouest de la France aux caractéristiques assez différentes (Bordelais, Côtes de Gascogne et Cahors) : Trois nouvellement plantées et trois plus anciennes.

Toutes les parcelles ont bénéficié de mesures pour établir un état initial selon divers paramètres (biodiversité aérienne, lombric, communautés microbiennes) et pour caractériser l'hétérogénéité intrinsèque. Les trois parcelles plus anciennes, dites "fonctionnelles" ont été décrites de manière plus détaillée (état hydrique et azoté de la vigne, rendement, composition du raisin, paramètres microclimatiques, etc.).

Au niveau des résultats, un rafraîchissement des vignes voisines du rang d'arbres a été observé lors de journées à forte demande évaporative, dans le cas de larges allées. Sur le plan agronomique, la présence d'arbres depuis 8 ou 9 ans à proximité de la vigne n'a pas d'effet direct sur sa vigueur et la composition des raisins. Ce résultat est encourageant mais devra être confirmé par de nouveaux suivis du système au cours des dix prochaines années. Il n'y a pas pour le moment d'effets forts et homogènes des arbres sur les arthropodes épigés et du feuillage. C'est le même constat pour les ravageurs. Au niveau du sol, on n'observe pas non plus d'effets sur l'abondance et la diversité microbienne. La composition des communautés microbiennes semble cependant légèrement impactée par la présence des arbres. Enfin, une abondance supérieure de lombrics a été mesurée sur les lignes d'arbres.

Concernant les aspects technico-économiques, des travaux complémentaires seront nécessaires. La modélisation sera certainement un outil à privilégier pour tenir compte de la diversité et de la complexité de ces systèmes.

Mots-clés : Agroforesterie viticole, approche parcellaire et exploratoire, comportement agronomique de la vigne, microclimat de la parcelle, biodiversité aérienne et du sol, état des connaissances technico-économiques, vignobles du sud-ouest de la France.

Abstract : VITIFOREST - Exploratory research to access the effects of trees on agroforestry-based vineyards

Vitiforest is an exploratory project. The objectives were to assess and describe the effects of trees on the agronomic behavior of the vine, on the microclimate, as well as on the aerial and soil biodiversity. The technical and economic aspects were also assessed. A multidisciplinary team of researchers set up various protocols and measurement tools at vineyard scale. The study compared six plots of agroforestry-based vineyards from three viticultural areas in the southwest of France (Bordelais, Côtes de Gascogne et Cahors): three vineyards newly planted and three older ones (9 years old max).

All the plots were measured in order to establish initial states for various parameters (aerial biodiversity, earthworms, microbial communities) and to characterise the intrinsic heterogeneity. Extra data were collected on the three older plots, among which yield and vigor of vines, microclimatic parameters, etc.

On configuration with wide tree rows, we observed a decrease in maximal temperatures on vines, particularly on days with high evaporative demand. After 9 years, the practice of having grown trees alongside vines has not impacted yield, vigor of vines or composition of grapevines. This result is promising, but further and longer monitoring is needed.

No evidence of effects on ground-surface and foliage arthropods were observed, nor on pests. For the moment, no influence on the abundance and diversity of soil microorganisms has been observed either. On the other hand, an increase in the abundance of earthworms has been shown on all tree rows. It seems that communities of microorganisms were slightly modified due to the presence of trees.

Regarding technical and economic aspects, further investigations are necessary. At this stage, it is clear that one of the best ways to deal with the complexity of agroforestry-based vineyards resides in mathematical modelling, to be still constructed.

Keywords : Agroforestry-based vineyards, exploratory research, agronomic behavior of vine, microclimate at plot scale, aerial and soil biodiversity, state of the art on economical aspects, vineyards in the southwest of France.

Introduction

Contexte

L'agroforesterie, qui consiste à intégrer et à gérer des arbres dans le système de production agricole, présente des caractéristiques d'innovation qui répondent aux principes de l'agro-écologie. L'agroforesterie en viticulture pourrait offrir divers atouts notamment via des services éco-systémiques comme l'amélioration de la biodiversité dont celle du sol, l'atténuation des excès climatiques, le stockage de carbone, la valorisation de biomasse supplémentaire, la production de bois d'œuvre. Les apports de l'arbre en terme d'image pour le vignoble et son paysage sont aussi des éléments d'intérêt.

La maîtrise des compétitions entre l'arbre et la vigne est un élément essentiel pour la réussite de l'agroforesterie viticole et pour son acceptation. Or, les études portant sur les vignobles agroforestiers sont, à ce jour, très rares. En France, une seule étude d'ampleur a été conduite sur plusieurs années au domaine de Restinclière dans l'Hérault en contexte climatique méditerranéen.

Pour évaluer de manière plus large les interactions entre l'arbre et la vigne, le projet Vitiforest a choisi d'étudier l'agroforesterie dans différents contextes de productions viticoles : Bordelais, Côtes de Gascogne et Cahors, en s'appuyant sur une équipe pluridisciplinaire aux compétences variées et complémentaires.

Objectifs généraux

Le projet « Vitiforest », est une approche exploratoire et descriptive dont l'objectif était de décrire l'état initial de parcelles agroforestières viticoles et d'évaluer l'impact de l'arbre sur (1) le microclimat à l'échelle parcellaire, (2) le comportement agronomique de la vigne, (3) la biodiversité aérienne et du sol, (4) les aspects technico-économiques.

Les partenaires du projet Vitiforest

Institut Français de la Vigne et du Vin, pôle Sud-Ouest - Arbre et Paysage 32 - Cesbio - Vitinnov - INRAE UMR Agroécologie - Bordeaux Sciences Agro - Chambres d'Agriculture de Gironde et du Gers.

1. Un réseau de parcelles aux formes variées

Le choix des parcelles "Vitiforest" s'est fait selon des critères définis par le groupe de partenaires. Pour des questions de représentativité, ont été recherchées en priorité des parcelles : associant arbres et vigne en intra-parcellaire sur au moins 1 ha ; s'inscrivant dans la durée ; représentatives des pratiques viticoles actuelles et évitant les contextes trop atypiques - avec si possible une implantation simultanée des arbres et de la vigne, ou avec des arbres plantés après la vigne ; avec un minimum de motivation et de respect des dispositifs expérimentaux de la part des viticulteurs ; et un accès aux données économiques et extra-comptables.

Six parcelles viticoles situées dans le Sud-Ouest (Bordelais, côtes de Gascogne et Cahors) ont été retenues pour faire l'objet des suivis "VitiForest" (Figure 1) :

- Parcelles dites "fonctionnelles" : Lagardère (Gascogne) - Lapouyade (Bordeaux) - Landiech-Lacapelle (Cahors)
- Parcelles "nouvelles" : Lagraulet (Gascogne) - Eauze (Gascogne) - Le Montat (Cahors)

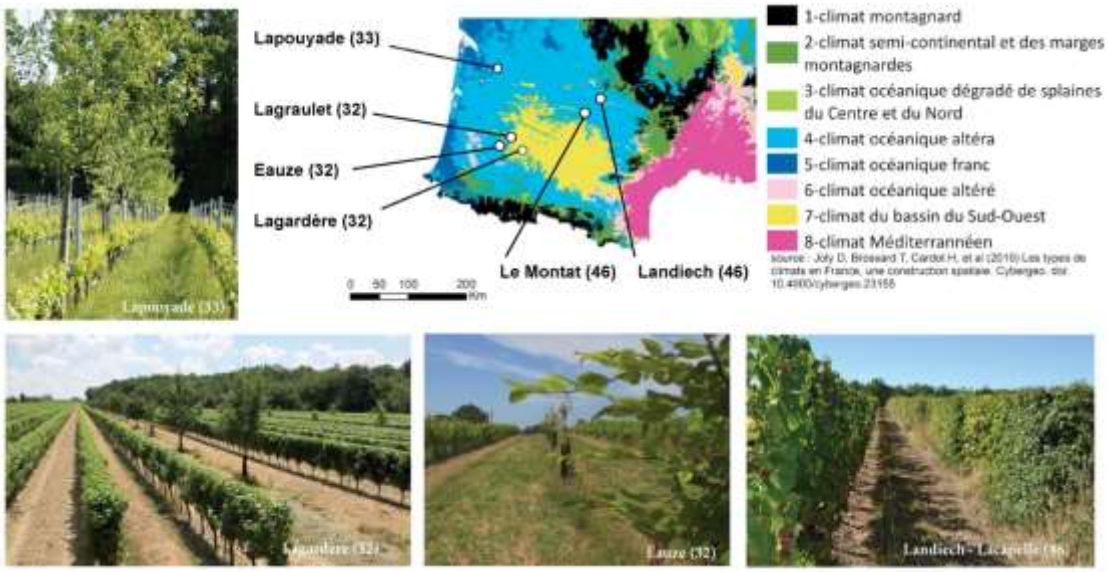

Figure 1 : Localisation et vues des parcelles suivies dans le sud-ouest de la France

Au-delà de la diversité des terroirs et des exigences liées aux appellations, les parcelles présentent des caractéristiques assez variées, que ce soit au niveau des aménagements arborés, des cépages, des modes de conduite ou des motivations du viticulteur. On trouve ainsi diverses formes arborées (arbres de haut jet, arbres fruitiers, haies arbustives) intégrées dans la parcelle sous forme de lignes plantées à diverses distances des rangs de vignes, voire même pour le site de Lapouyade intégrées au sein même du rang de vigne, en remplacement de pieds manquants (Tableau 1).

Tableau 1 : Principales caractéristiques des parcelles Vitiforest décrites de 2015 à 2017

Commune	Lagardère (32)	Lapouyade (33)	Liandech (46)	Lagraulet (32)	Eauze (32)	Le Montat (46)
Surface (ha)	2	3.5	20	5	2	1.5
Orientation	E-O	N-S	N-S	N-S	E-O	E-O
Formes arborées étudiées	Arbres intra-parcellaires	Arbres intra-parcellaires	haies intra-parcellaires	Arbres et haies intra-parcellaires	Arbres intra-parcellaires	Arbres intra-parcellaires (truffière)
Année plantation vignes	2009	2001	2009	2015	2015	2015
Année plantation arbres	2009	2010	2009	2015	2015	2015
Distance arbre-vigne (m)	3.5	Dans le rang	2.6	3	5	3
Nbre de rangs vignes/rangs arbres	6	20	40	10	8	4
Cépages	Sauvignon Gris	Merlot N	Malbec N	Colombard	Ugni blanc	Malbec
Système de culture	Conventionnel	Biologique	Conventionnel	Biologique	Biologique	Conventionnel
Motivations / arbres	Paysage-esthétique	Agroécologie-marketing	Biodiversité	Bois-biodiversité	Agronomie	Trufficulture-pédagogie

Chaque parcelle a été suivie indépendamment des autres, sans objectif de comparaison.

2. Impacts de l'agroforesterie sur le microclimat des vignobles

2.1 Introduction

Implanter des arbres dans un vignoble peut engendrer des modifications du microclimat du fait de l'ombrage, de l'émission de chaleur sensible supplémentaire, ainsi que des modifications locales de la circulation de l'air et du cycle de l'eau. Les conséquences potentielles sur la photosynthèse de la vigne, la température de ses organes et son statut hydrique pourraient elles-mêmes avoir des conséquences à la fois sur le rendement et la qualité vinicole des baies (Carbonneau et al., 2015 ; Kliewer et Lider, 1970). Par ailleurs, le changement climatique questionne les stratégies d'adaptation à la survenue de gels printaniers, de sécheresses et de canicules de plus en plus fréquents et intenses. Cependant, seulement quelques résultats sont disponibles à ce jour et ce sur le Domaine de Restinclières, à Prades le Lez (Hérault), marqué par un contexte méditerranéen (Goma-Fortin et Trambouze, 2009 ; Gouttesoulard, 2015).

Afin d'élargir les connaissances concernant l'impact microclimatique des arbres et ses répercussions sur la vigne, des recherches ont été menées par le CESBIO dans le cadre de la thèse de Juliette Grimaldi (Grimaldi, 2018). Premièrement, le contexte météorologique de chaque terrain d'étude et des millésimes 2015 et 2016 (section 2.2) ont été précisés. Deuxièmement, des suivis de température ont été conduits au sein des vignobles de Lagardère (32) et Lapouyade (33) et confrontés aux données de rendement et de qualité des raisins (section 2.3). Troisièmement, à partir d'images drone et de données météorologiques collectées à Lagardère, des simulations numériques de l'ombrage présent et futur ont été réalisées (section 2.4).

2.2 Contexte météorologique des millésimes 2015 et 2016

D'après les données SAFRAN entre 1990 et 2017 fournies par Météo France, le site d'étude de Lagardère (32) se caractérise par un climat de type océanique à continental humide, avec une température moyenne de 13.1 °C et des précipitations annuelles de 741 mm. Le Tableau 2 donne les caractéristiques des années 2015 et 2016 par rapport aux maximales, médiane et minimales climatiques observées depuis 1990. Le millésime 2015 a été marqué par un printemps et une première partie d'été la plus chaude enregistrée depuis 1990. Ces anomalies de températures se sont combinées à un fort déficit de précipitation sur l'ensemble de la période allant du débourrement à la floraison. Puis en août, à la suite d'importantes précipitations, les températures se sont rétablies dans les normales saisonnières. La période de dormance entre 2015 et 2016 a été à nouveau la plus chaude enregistrée depuis 1990 ce qui a contribué à un débourrement précoce en 2016, 10 jours plus tôt qu'en 2015. La période du débourrement à la véraison 2016 s'est déroulée dans des conditions très proches des normales. En revanche, toute la période de maturation des baies de 2016 s'est déroulée dans des conditions anormalement sèches et chaudes, notamment la nuit.

Tableau 2 : Tendances climatiques à Lagardère en 2015, 2016 et sur l'ensemble des années entre 1990 et 2017 (Données SAFRAN). Les températures (T) journalières sont moyennées tandis que l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les précipitations (P) sont cumulées sur trois périodes. qt.= quantile.

2015	2016		1er avril au 31 mai			1er juin au 31 juil.			1er août au 30 sept.		
qt.99%	*qt.50%*	*qt.1%*									
T max. journalière [° C]			19.4	17.4		27.2	24.2		23.7	26.6	
			21.9	*18.4*	*16.1*	*28.0*	*24.9*	*22.6*	*28.4*	*24.5*	*22.8*
T moy. journalière [° C]			15.0	13.4		22.0	19.9		18.8	20.8	
			16.4	*13.6*	*11.7*	*22.6*	*20.2*	*18.0*	*21.7*	*19.3*	*17.2*
T min. journalière [° C]			10.7	9.6		17.3	16.0		14.1	15.3	
			11.5	*9.6*	*7.8*	*17.7*	*15.7*	*14.2*	*16.5*	*14.7*	*12.7*
ETP cumulée [mm]			189	171		315	262		207	228	
			240	*177*	*144*	*315*	*260*	*208*	*248*	*213*	*166*
P cumulées [mm]			77	153		90	83		158	43	
			224	*151*	*51*	*268*	*99*	*41*	*183*	*95*	*43*

Le site d'étude de Lapouyade (33) se caractérise par un climat de type océanique, avec une température moyenne de 13,0 °C et des précipitations annuelles de 824 mm. De façon similaire à Lagardère, l'année 2015 a été marquée par des conditions particulièrement sèches et chaudes du débourrement à la véraison (Tableau 3). Puis les conditions chaudes se sont maintenues durant la véraison, en dépit du retour des précipitations dans les normales. Le millésime 2016 a quant à lui été marqué par un printemps particulièrement pluvieux puis au contraire un déficit de précipitations entre la floraison et la véraison. La première période de la maturation des baies a été marquée par des températures moyennes et maximales de 22 °C et 29 °C respectivement, valeurs les plus chaudes encore jamais enregistrées ces trente dernières années. Durant la seconde partie de la maturation, les températures sont redescendues dans les normales saisonnières, simultanément à un retour des précipitations.

Tableau 3 : Tendances climatiques à Lapouyade en 2015, 2016 et sur l'ensemble des années entre 1990 et 2017 (Données SAFRAN). Les températures (T) journalières sont moyennées tandis que l'évapotranspiration potentielle (ETP) et les précipitations (P) sont cumulées sur trois périodes. qt.= quantile.

2015	2016		1er avril au 31 mai			1er juin au 31 juil.			1er août au 30 sept.		
qt.99%	*qt.50%*	*qt.1%*									
T max. journalière [° C]			20.4	18.1		28.8	25.2		24.4	27.3	
			22.7	*18.5*	*16.6*	*28.8*	*24.8*	*23.3*	*27.9*	*24.4*	*22.6*
T moy. journalière [° C]			15.4	13.8		22.7	20.0		18.7	20.8	
			16.5	*13.8*	*12.1*	*22.8*	*19.9*	*18.7*	*21.2*	*19.0*	*17.2*
T min. journalière [° C]			10.4	9.6		16.7	15.1		13.6	14.2	
			11.3	*9.6*	*7.7*	*17.9*	*15.4*	*14.0*	*16.1*	*14.2*	*12.4*
ETP cumulée [mm]			218	187		335	253		217	223	
			257	*191*	*164*	*335*	*260*	*234*	*248*	*214*	*178*
P cumulées [mm]			96	170		82	76		174	64	
			264	*123*	*32*	*181*	*101*	*43*	*242*	*118*	*43*

2.3 Patrons de températures

2.3.1 Mesures réalisées

Les sites de Lagardère (32) et Lapouyade (33) ont fait l'objet de suivis microclimatiques en 2015 et 2016. Sur chacun des sites, une station météorologique de type Vantage Pro (Davis ©) câblée sur une station GSM de chez CAIPOS a été installée à 2m de hauteur et a enregistré le rayonnement global incident, la vitesse et direction du vent, la température de l'air, l'hygrométrie et les précipitations, à une fréquence de 10 minutes. De plus, des mini capteurs de température de type iButton® (DS1923 – résolution = 0,5 °C, précision = 0,5 °C) ont été placés au sein de boitiers aérés, le tout placé dans la vigne à hauteur des grappes (0,50 m au-dessus du sol). Ces mesures ont été distribuées au sein des deux vignobles expérimentaux selon des transects perpendiculaires aux arbres intraparcellaires et aux lisières boisées alentours. Au total, à Lagardère, 15 et 49 placettes ont été suivies respectivement du 29/07 au 4/07/2015 et du 10/03 au 02/09/2016 ; à Lapouyade, 27 placettes ont été suivies du 11/07 au 23/09/2016. Sur l'ensemble de ces périodes, la température instantanée a été mesurée en continu toutes les 15 minutes.

Ces séries de données ont été découpées par stade phénologique (pré-débourrement, débourrement à floraison, floraison à véraison et véraison à vendange) et par seuil d'évapotranspiration potentielle inférieure ou supérieure à la médiane de la période. Pour chacune de ces sélections, les valeurs journalières de températures ont été centrées sur la moyenne de l'ensemble des placettes de mesures et classées par classification ascendante hiérarchique de manière à identifier les placettes au comportement thermique similaire.

2.3.2 Variabilité des températures

- **Un faible impact de l'ombrage à ce stade de la croissance des arbres intraparcellaires**

Sur le site de Lapouyade (33), seulement une des 27 placettes de mesure présente une anomalie de température attribuable à l'ombrage des arbres. Celle-ci se trouve à 2.5 m au Nord-Ouest du plus grand des arbres intraparcellaires, un pommier (*Malus domestica*) conformé en gobelet, dont le feuillage atteint 3.4 m au plus haut. Cette placette de vigne se caractérise par des maxima de température journalière inférieurs de 2,5 °C à la moyenne de toutes les placettes lors des journées à forte demande

évaporative (ET0 > 4mm). Cet effet semble ponctuel sur la journée, possiblement lié au passage de l'ombrage de quelques branches d'arbre, car une diminution de la durée passée au-delà du seuil des 30 °C n'a été observée qu'occasionnellement et que dans une faible mesure (1 à 2 heures en moins par rapport à la moyenne). Dans ce contexte météorologique, un léger impact positif sur la durée passée entre les bornes optimales pour la photosynthèse (20 à 30 °C) est observé durant la période de floraison à véraison.

A Lagardère (32), aucun patron de température particulier n'a été observé au nord des arbres, l'effet de l'ombrage ne semble pas encore sensible à ce stade de leur développement.

- **Un rafraichissement des vignes voisines du rang d'arbre dans le cas de larges allées**

A Lagardère (32), de manière inattendue, toutes les placettes situées sur le premier rang de vigne au sud d'une allée d'arbre se distinguent par des températures sensiblement plus fraiches lors du pic des maximales journalières. Ce phénomène a été observé durant toute la période de floraison à vendange (Figure 3). Le rafraîchissement mesuré est de l'ordre de 1,5 °C lors des journées estivales à forte demande évaporative (ET0 > 4mm). Pour ces vignes, la durée journalière cumulée au-delà des 30 °C est inférieure de 1h à 3h30 à la moyenne de toute la parcelle. Les interangs de vigne sont habituellement marqués par un important confinement de l'air (Riou et al., 1987). L'ouverture générée par l'allée d'arbre, dont la largeur est de 2,5 fois celle d'un inter-rang de vigne, se combinant à l'ombrage du feuillage de la vigne sur le sol (vigne palissée orientée NO-SE) génèrerait la mise en place d'une cellule de convection d'air responsable de ce rafraichissement (Figure 2).

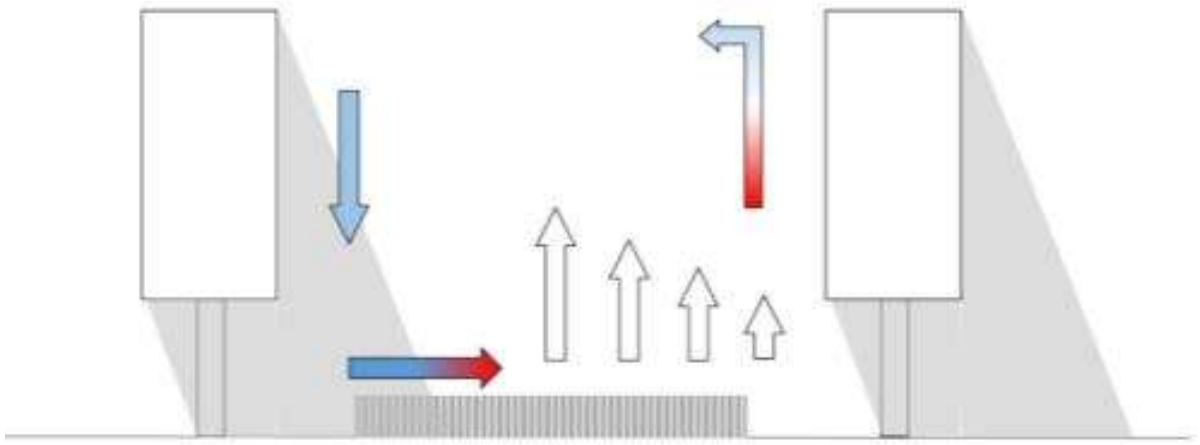

Figure 2 : Cellule de convection d'air qui semble s'établir entre deux rangs de vignes situées de part et d'autre d'une l'allée d'arbres (non représentés), à Lagardère (Représentation en vue Sud (gauche) – Nord (droite), orientation des rangs de vigne : NO-SE, hauteur de feuillage : 1.6 m, largeur de l'allée : 7 m).

- **Effet paysager : topographie, arbres intraparcellaires et de bordure ont un effet combiné**

Au-delà de la présence d'arbres intra-parcellaires, des facteurs paysagers semblent également expliquer certains patrons de température observés à Lagardère (32). Une influence conjointe de la topographie (pente NE-SE), des haies et boisements alentours et des propriétés hydriques du sol semble notamment responsable de deux patrons distincts. D'une part, la zone « témoin » située la plus au Nord-Est, est la zone la plus exposée au rayonnement, la moins coupée de la circulation de l'air par les arbres alentours et aux sols les moins profonds. Celle-ci se démarque par des températures nocturnes plus chaudes que le reste de la parcelle, et ce sur l'ensemble de la période du pré-débourrement à la vendange (Figure 4). Les minimales journalières sont de 0,6 °C à 1,5 °C plus chaudes que la moyenne au moment du débourrement et de 0,4 °C à 0,8 °C plus chaudes que la

moyenne durant la maturation des baies (Figure 3). D'autre part, la zone au sud des rangs de poiriers, située en bas de pente et proche d'un étang, dans la partie la plus enclavée de la parcelle montre des températures nocturnes relativement plus froides qu'ailleurs et un risque de gel accru au moment du débourrement (Figure 4).

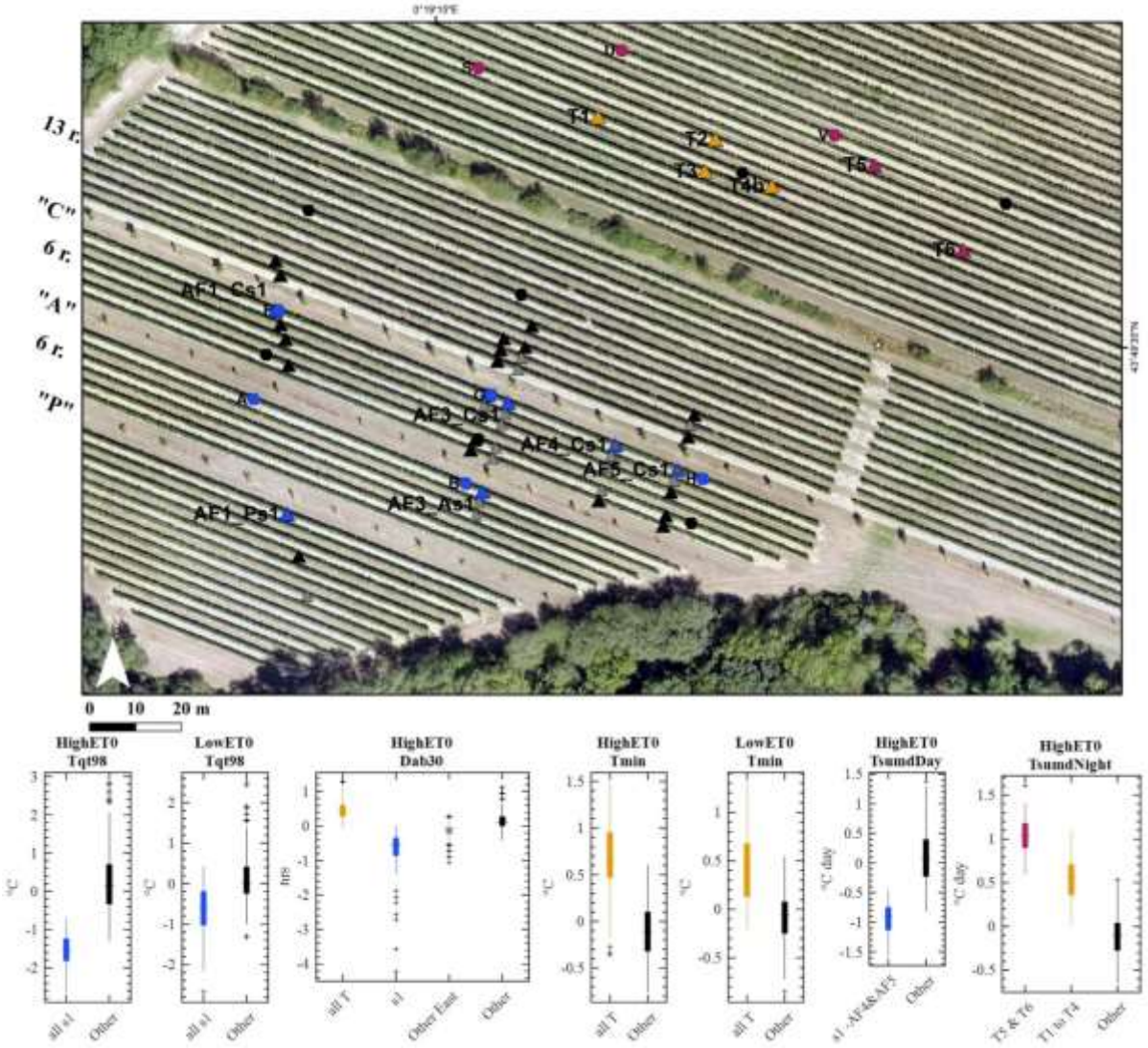

Figure 3 : Patrons de température observés à Lagardère en 2015 et 2016 durant la période de véraison à vendange. Les box plot sont donnés en différence par rapport à la moyenne et par classe de placettes reconnaissables par leur couleur. Abréviations : ET0 : Evapotranspiration Potentielle. Tq98 : température maximale journalière (quantile 98%) ; Dab30 : Durée cumulée journalière au-delà des 30 °C ; Tmin : température minimale journalière ; TsumDay : Somme journalière des températures diurnes ; TsumNight : Somme journalière des températures nocturnes.

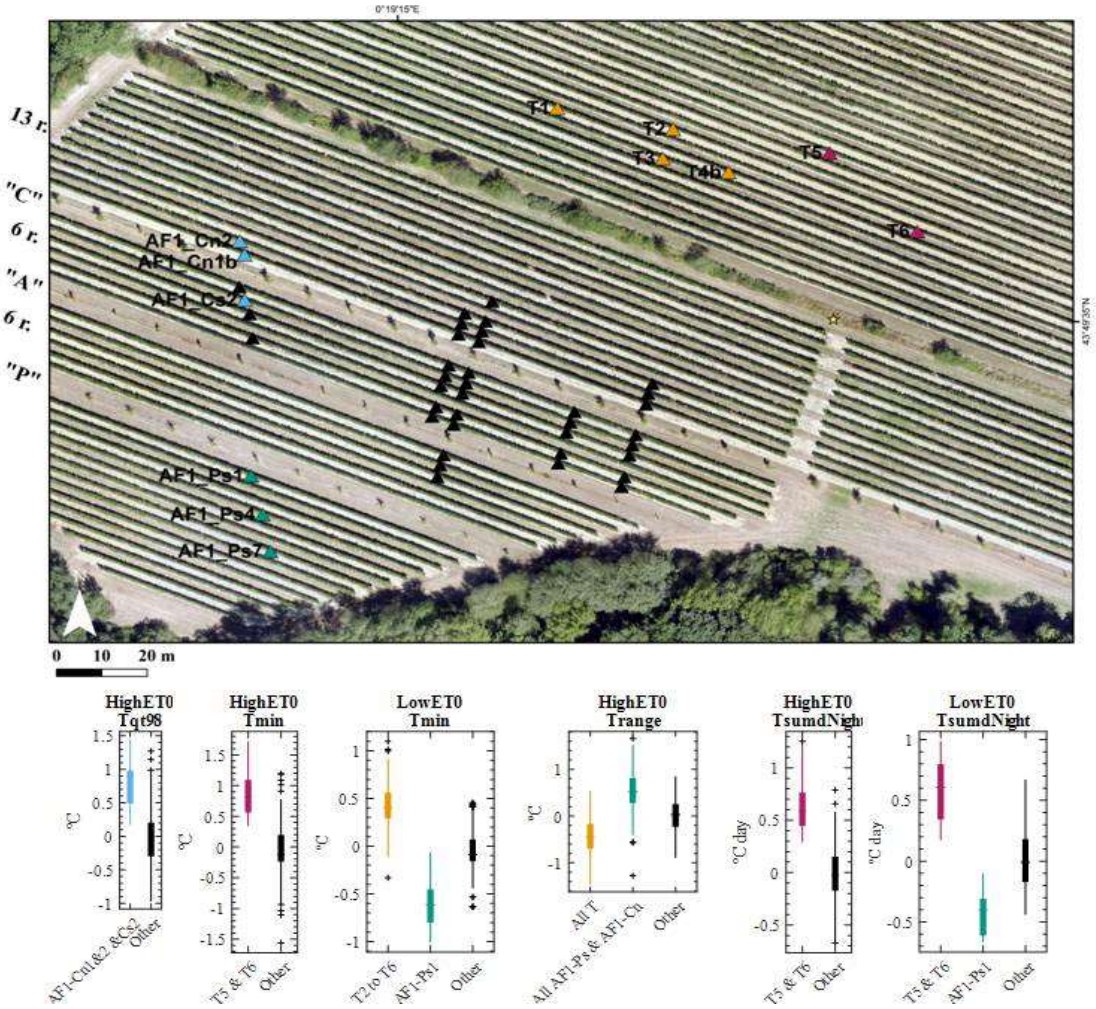

Figure 4 : Patrons de température observés à Lagardère en 2016 durant la période pré-débourrement. Les box plot sont donnés en différence par rapport à la moyenne et par classe de placettes reconnaissables par leur couleur. Abréviation : Trange : amplitude journalière

2.3.3 Corrélations avec rendements et qualité des raisins

La Figure 5 présente les valeurs des composantes du rendement et de la qualité des moûts par groupe de placettes ayant montré des températures contrastées. Parmi l'ensemble des variables agronomiques testées, des corrélations significatives avec les patrons de températures sont observées dans le cas du rendement total, de l'acidité totale, du pH, de la teneur en acide malique et de l'indice de polyphénol total tandis que les autres variables ne semblent pas corrélées.

On observe d'une part que les vignes qui ont été exposées aux maximales de températures les plus faibles durant la période de floraison à la vendange (premier rang au sud des allées d'arbres *s1*) coïncident avec les rendements les plus élevés de la parcelle ainsi que les acidités les plus fortes. Cette acidité relativement plus élevée semble liée à des concentrations relativement élevées en acide malique, témoin d'une maturation plus progressive. Au contraire, les points de mesures caractérisés par des températures nocturnes chaudes durant toute l'année (zone témoin *T*), figurent parmi les plus faibles rendements et les plus faibles acidités mesurées.

Les teneurs en polyphénols suivent des variations qui semblent liées à celles du rendement. Elles sont les plus faibles là où le rendement est le plus élevé, vraisemblablement par effet de dilution.

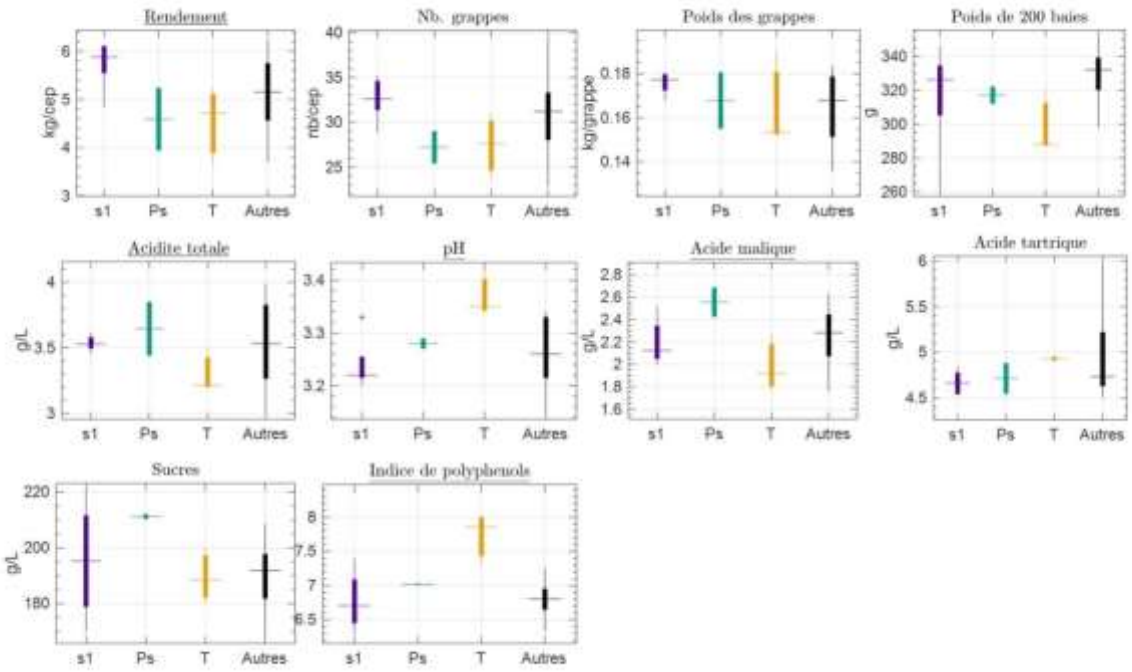

Figure 5 : Distribution statistique des variables agronomiques par groupe de placettes se distinguant par leurs patrons de températures. Le groupe 's1' est constitué des 7 placettes de mesures positionnées sur le premier rang au sud des arbres ; Le groupe 'Ps' rassemble les 3 placettes situées au sud du rang de poirier, en bas de pente ; Le groupe 'T' rassemble les 4 placettes de la zone témoin les plus au nord-est du domaine (numérotées T3 à T6). Pour chaque boite à moustache, la marque centrale indique la médiane et les limites basse et haute de la boîte indiquent respectivement les quantiles 25% et 75%. Les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs extrêmes tant qu'elles ne sont pas considérées comme des valeurs statistiquement aberrantes ('+'), sinon elles s'étendent sur une amplitude de +/- 2,7 fois l'écart type.

2.4 Ombrage présent et futur à Lagardère

L'objectif de ce travail était d'évaluer plus spécifiquement l'impact présent et futur des arbres en termes de réduction de la lumière par ombrage. Nous avons privilégié une approche par modélisation à l'aide du modèle 3D de bilan radiatif DART (Gastellu-Etchegorry et al., 2012, 1996).

2.4.1 Construction de maquettes numériques 3D

Le site d'étude à Lagardère (32) a été utilisé comme référence. Deux zones de 57 m par 57 m ont été délimitées, l'une au sud-ouest, intégrant 3 rangs d'arbres intercalés entre 6 rangs de vigne, l'autre au nord-est, uniquement plantée de rangs de vigne (Figure 6).

Un drone de type aile volante (eBee® de chez senseFly) a effectué des vols le 20/07/2016, avec successivement à son bord un appareil photo numérique et un capteur d'images multispectrales 4 bandes. Une première étape d'analyse de ces images a consisté à cartographier les différents types de végétation (arbre, vigne, couvert herbacé, sol nu) par classification supervisée de type random forest. La seconde étape a consisté à cartographier la hauteur de canopée à partir du modèle numérique de surface (MNS) obtenu par photogrammétrie (Figure 6). Pour cette seconde étape, un modèle numérique de terrain (MNT) a été généré par interpolation des valeurs de MNS renseignées dans les zones de sol nu ou enherbé. La hauteur de végétation a été calculée par soustraction entre le MNS et le MNT (H_{veg} = MNS – MNT).

Sur la base des cartes d'occupation du sol, de hauteurs de canopée et du modèle numérique de terrain de ces deux zones, un total de cinq maquettes numériques 3D ont été construites (Figure 6) : trois des maquettes correspondent à la zone en agroforesterie (1 rang de cormier, 1 rang d'alisier et 1 rang de poiriers francs) et varient par leur orientation des rangs (NO-SE ou NS) et par la hauteur des arbres (actuelle ou future) ; les deux autres maquettes correspondent à la végétation de la zone sans arbre, orientée NO-SE (orientation réelle) ou NS.

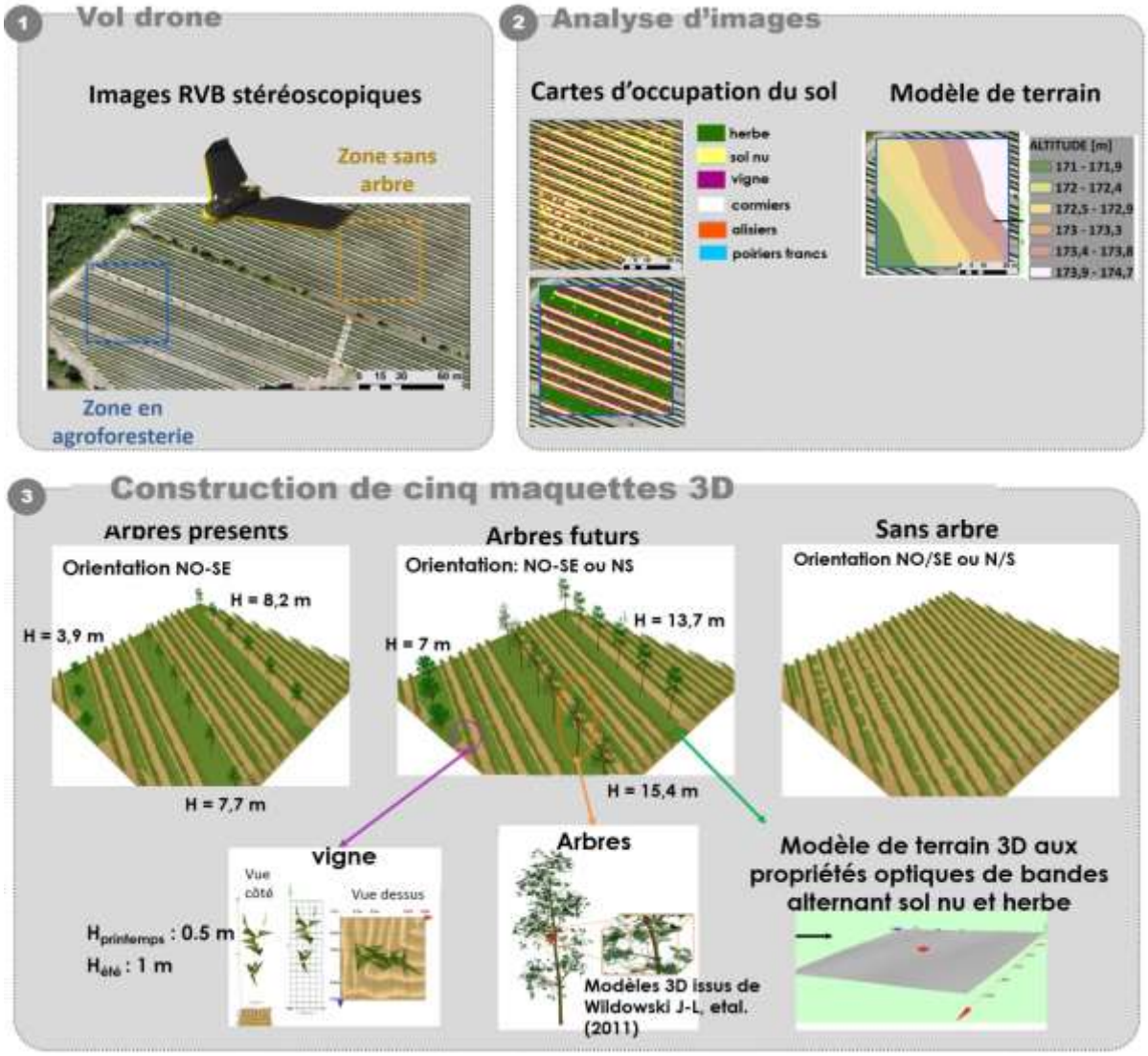

Figure 6 : Construction de maquettes 3D numériques à partir d'images drone acquises à Lagardère. H = hauteur

2.4.2 Bilan d'énergie instantané pour différentes conditions d'ensoleillement

Pour chacune des maquettes, le bilan radiatif dans le domaine spectral du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) a été simulé chaque heure du jour tous les cinq jours, sur l'ensemble de la période allant du 15 avril (débourrement) au 12 septembre (vendange) 2016. Une succession réaliste de ciel clair ou nuageux a été modélisée en ajustant la densité optique de nuage de chaque simulation d'après le rayonnement global mesuré sur site. Cette méthode de représentation des nuages a fait l'objet d'un développement méthodologique inédit en collaboration avec l'équipe de recherche qui développe le modèle DART (Wang et al., 2020).

Dans des conditions estivales ensoleillées, les vignes situées dans l'ombre des arbres absorbent 20% à 40% du rayonnement qu'elles absorberaient en plein soleil, selon la densité foliaire des arbres. En revanche, lors de passages nuageux, l'effet de l'ombrage disparait, le rayonnement incident étant essentiellement diffus (Figure 7).

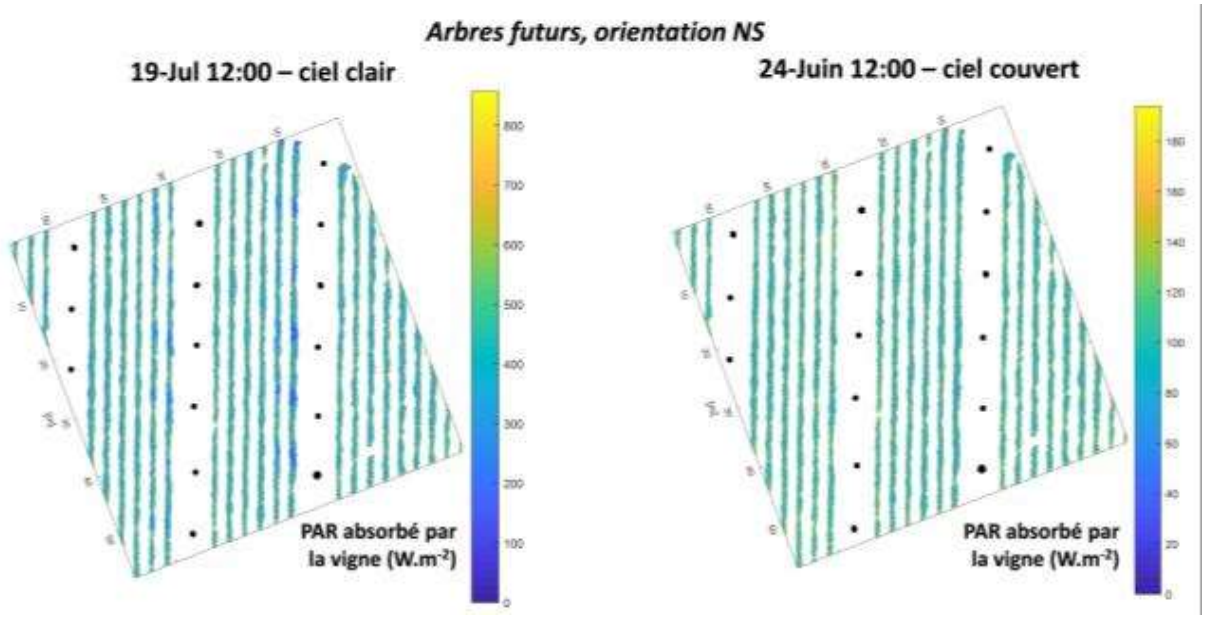

Figure 7 : Rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) absorbé par la vigne en conditions de ciel clair (19 Juillet à 12h, gauche) et de ciel couvert (24 juin 12h, droite). Cas d'une orientation NS des rangs et d'arbres de 7 m, 14,4 m et 13,7 m de hauteur.

2.4.3 Cumul du rayonnement absorbé par la vigne du débourrement jusqu'à la vendange

Pour chacune des maquettes, les simulations instantanées ont été cumulées de manière à estimer la totalité du rayonnement absorbé par la vigne entre son débourrement et sa vendange.

On estime que les vignes en agroforesterie absorbent actuellement en moyenne 67% de l'énergie absorbée par les vignes en zone sans arbre et et qu'une hauteur probable à maturité provoquera une réduction supplémentaire de 2% (Figure 8). L'orientation des rangs montre un faible impact sur le cumul de rayonnement absorbé mais influence sa variabilité spatiale : qu'ils soient en agroforesterie ou en monoculture, les rangs de vigne orientés NS absorbent 2% de plus d'énergie que les rangs orientés NO-SE et la variabilité selon les ceps est inférieure de près de 3% au cas NS.

Une différence systématique d'épaisseur du feuillage de la vigne entre les zones en agroforesterie et sans arbre a été identifiée comme une limite possible à la généralisation de ces résultats au-delà du contexte de ce vignoble. En effet, une étude de sensibilité, non présentée ici, a mis en évidence un impact fort de l'architecture 3D du feuillage sur son absorption de la lumière. Les résultats pourraient donc varier selon les pratiques de taille et de palissage, et la vigueur de la vigne. Il n'en demeure pas moins que ces résultats apportent de premiers ordres de grandeur et que l'approche méthodologique développée peut être appliquée à d'autre contextes météorologiques et arrangements de la végétation.

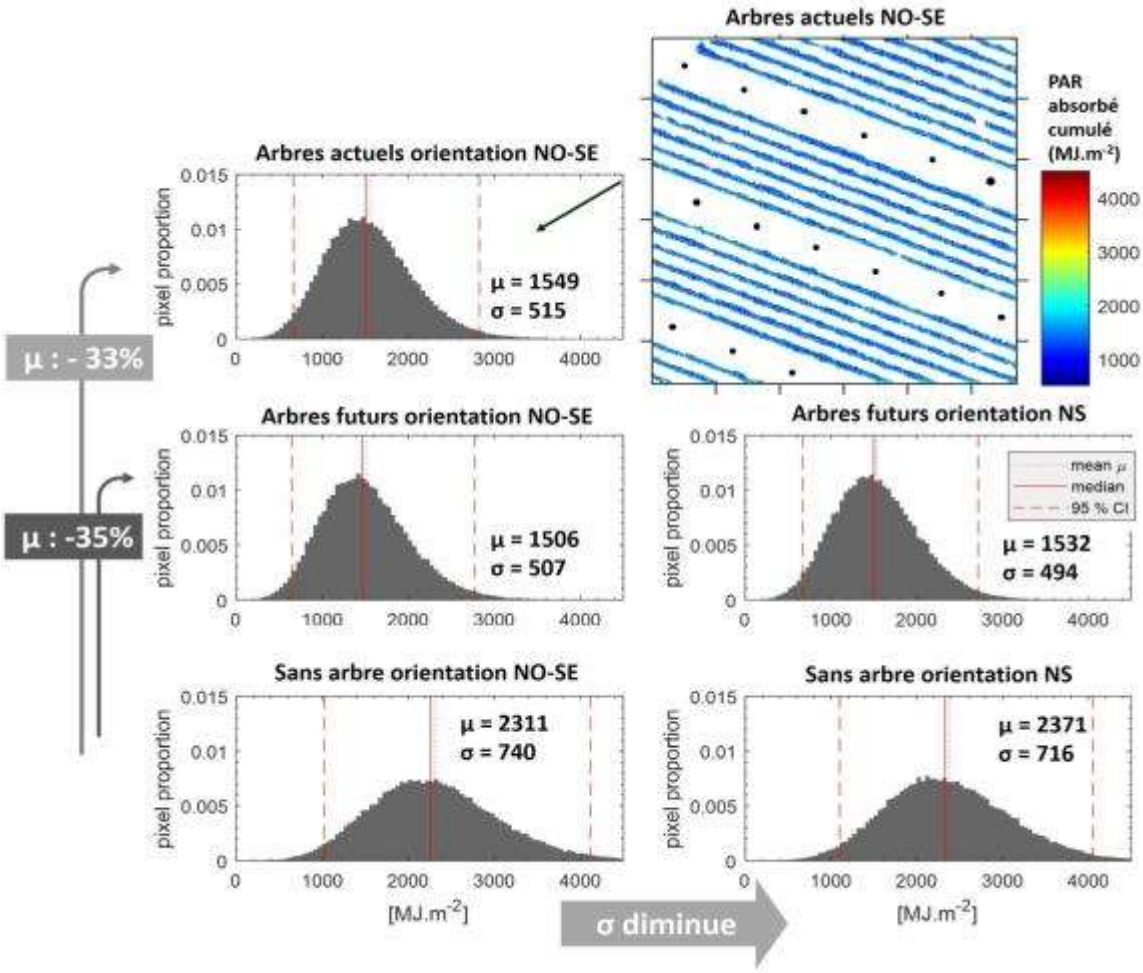

Figure 8 : Distribution du rayonnement absorbé par la vigne cumulé du débourrement à la vendange. Symboles : μ : moyenne ; σ : écart-type.

2.5 Conclusions et perspectives

L'impact microclimatique des arbres a été documenté dans deux cas d'agroforesterie viticole : le vignoble de Lapouyade en contexte océanique, planté d'arbres directement dans le rang de vigne ; et le vignoble de Lagardère en contexte continental humide, planté de larges allées d'arbres.

A Lapouyade, 7 ans après la plantation, l'ombrage provoque un rafraîchissement très ponctuel des vignes de l'ordre de 2,5 °C durant la période de véraison. A Lagardère, aucun effet de l'ombrage n'est encore observé. En revanche, une circulation de l'air y rafraichit les vignes spécifiquement situées au sud de larges allées d'arbres de l'ordre de 1,5 °C lors des journées à forte demande évaporative. De plus, nos résultats suggèrent un effet sensible des patrons plus frais de températures sur l'élaboration du rendement et la maturation des baies puisqu'ils coïncident avec les zones de plus fort rendement et acidités. L'impact des arbres intraparcellaires ne peut être isolé de celui des arbres de bordures, de la topographie et de l'hétérogénéité du sol, c'est pourquoi l'ensemble de ces paramètres doit être pris en compte lors du raisonnement de l'agencement d'une plantation.

Enfin, lorsque les arbres seront plus grands à Lagardère, les vignes de la zone en agroforesterie devraient montrer une réduction à hauteur d'un tiers du rayonnement absorbé par la vigne en zone sans arbre. La réduction de la densité foliaire des arbres mais aussi un raisonnement de la taille et du palissage de la vigne se présentent comme des stratégies pouvant permettre de limiter cet effet s'il s'avérait négatif sur la vigne.

3. Comportement agronomique de parcelles viticoles dans un système de culture agroforestier

L'objectif de ce travail a été de caractériser le comportement de la vigne en lien avec la présence d'arbres ou de haies intra parcellaires et d'évaluer sa performance agronomique à travers des mesures intégratives sur différents organes (bois, feuilles, fruits).

3.1 Mesures et méthodes

Les travaux menés sur 3 millésimes, entre 2015 et 2017 ont permis de tester des méthodes et des outils de mesures de la variabilité agronomique intra parcellaire. Sur trois parcelles fonctionnelles (Lagardère, Lapouyade et Liandech), un état initial a été réalisé avec mesure de la résistivité électrique et caractérisation physico-chimique des sols et un diagnostic de la conduite du vignoble. Ensuite, au cours des différents millésimes, des mesures ont été menées pour caractériser le comportement de la vigne dans le système de culture. Les points retenus sont ceux pour produire un raisin de qualité : Alimentation hydrique et azotée de la plante, rendement à la récolte et composition des baies. La distance à l'arbre est le facteur qui a été le plus souvent utilisé pour analyser la variabilité du système.

Différentes méthodes d'acquisition de données ont été mises en œuvre (Tableau 4). Tout d'abord, des mesures échantillonnées sur placettes de 5 pieds de vigne positionnées sur l'ensemble de la parcelle à une distance variable par rapport à l'arbre ou à la haie. Ensuite, nous avons réalisé un travail d'acquisition et de cartographie de la résistivité électrique des sols en prestation de service avec la société Geocarta (http://www.geocarta.net/). Ce paramètre est étroitement lié aux caractéristiques intrinsèques et pérennes des sols tels que la teneur en argile, la teneur en eau, la texture, la structure, le taux d'éléments grossiers, la profondeur, le type de substrat géologique, la compaction. Puis nous avons utilisé des mesures à distance à l'aide de capteurs montés sur quad, le GreenSeeker® pour mesurer l'indice NDVI (normalysed difference vegetative index) sur la plante et le Physiocap® pour estimer la quantité de bois produite par la plante. Ces deux indicateurs renseignent de manière globale de la vigueur de la culture.

Sur les nouvelles parcelles agroforestières (Lagraulet, Eauze et Le Montat), une caractérisation de l'état initial de la parcelle a été faite avec mesure de la résistivité électrique et composition physico-chimique du sol. Ces résultats ne sont pas présentés ici, mais pourront servir pour un suivi à long terme.

Tableau 4 : Mesures et outils mis en œuvre sur les diverses parcelles Vitiforest

Mesure sur vigne	Indicateur	Outil	Méthode	Sites
Etat hydrique vigne	$\delta^{13}C$ sur sucres	Analyses en laboratoire	Prélèvement 200 baies par placette	**Parcelles fctionnelles :** 1 - Lagardère (32) 2 - Lapouyade (33) 3 - Lacapelle (46)
Etat azoté vigne	Indice chlorophylle	Capteur Dualex	10 feuilles par placette	
	Indice NDVI	Capteur GreenSeeker	Proxy détection montée sur quad	
	Azotes des raisins	Labo	Prélèvement 200 baies par placette	
Production vigne	Poids de récolte	Nombre de grappes ; poids moyen de grappe ; poids par pied	Pesée 5 pieds de toutes les placettes	
	Maturité des raisins	Analyses en laboratoire	Prélèvement 200 baies par placette	
	Bois de taille	Capteur physiocap	Proxy détection montée sur quad	
Mesures sol	**Indicateur**	**Outil**	**Méthode**	**Sites**
Hétérogénéité	Résistivité électrique	Capteur système ARP	Proxy détection montée sur quad	**Parcelles fctionnelles :** 1 - Lagardère (32) 2 - Lapouyade (33) 3 - Lacapelle (46) **Parcelles nouvelles :** 4 - Eauze (32) 5 - Lagraulet (32) 6 - Le Montat (46)
Composition	Texture Eléments chimiques	Analyses sur 2 horizons (0-30cm et 30-60cm)	Prélèvement sur zones de résistivité variable	

3.2 Caractéristiques agronomiques des parcelles fonctionnelles

La parcelle de Lagardère, située dans le Gers, est constituée d'une vigne de Sauvignon Gris, plantée en 2008 dans laquelle ont été co-plantées 3 lignes d'arbres (cormier, alisier et poirier). Des placettes de 5 pieds (48 points de contrôle) ont été suivies sur l'ensemble de la zone et suivant 4 transects qui permettent d'observer les effets sur la plante en lien avec la distance à l'arbre.

On observe 2 zones de résistivité du sol distincte. Elle est plus élevée au sud-est de la parcelle (> à 150 Ohm.m). Des prélèvements de sols sur les horizons 0-30cm et 30-60cm ont été réalisés sur les 2 zones de résistivité : > à 150 Ohm.m et ≈ 70 Ohm.m.

La parcelle de Lagardère est située sur un sol limono-argileux très acide avec une forte réserve en eau potentielle. Sur la zone d'étude agronomique, les prélèvements de terre ne permettent pas d'expliquer clairement les différences de résistivité que ce soit par la granulométrie ou les analyses.

La parcelle de Lapouyade, située en Gironde, est constituée d'une vigne de Merlot Noir, plantée en 2008 dans laquelle des arbres, principalement fruitiers, ont été implantés sur 2 rangs. La zone d'étude agronomique a été subdivisée pour permettre un échantillonnage suivant la distance à l'arbre sur placettes de 5 pieds (25 points de contrôle). On observe 2 principaux niveaux de résistivité sur la parcelle. Au sud, elle est faible (<12 Ohm.m). Au nord elle est plus importante, autour de 30 Ohm.m avec quelques lentilles à résistivité élevée (>70 Ohm.m). Aucune mesure n'a pu être réalisée sur raisins en 2017 suite aux gels du mois d'avril qui ont fortement impacté la parcelle.

Des prélèvements de sols sur les horizons 0-30cm et 30-60cm ont été réalisés sur les 2 zones de principales résistivités : <12 Ohm.m et ≈ 30 Ohm.m

La parcelle de Lapouyade est située sur un sol sableux avec un sous-sol plus ou moins argileux. Sur la zone d'étude agronomique, les prélèvements de terre permettent d'expliquer les différences de résistivité. C'est la présence d'argile (41%) dans le sous-sol (horizon 30-60 cm) qui différencie la zone au sud de la zone au nord. D'après les analyses, le sol n'est pas déficitaire au moment de l'échantillonnage.

La parcelle de Liandech, située dans le Lot, est constituée d'une vigne de Malbec, plantée en 2009 dans laquelle a été co-plantée une haie arbustive d'essences diverses (groseilliers, muriers, figuiers, noisetiers…). La zone d'étude agronomique principale a été subdivisée pour permettre un échantillonnage suivant la distance à la haie. Des placettes de 5 pieds ont été suivies (35 points de contrôle) sur l'ensemble de la zone. Cette parcelle a été sélectionnée en 2016. Aucune mesure n'a pu être réalisée sur les raisins en raison de dégâts de mildiou en 2016, sans lien avec la présence de la haie, ni en 2017 suite aux gels du mois d'avril qui ont fortement impacté le rendement.

On observe 3 principaux niveaux de résistivité sur la parcelle : une zone à résistivité faible (<88 Ohm.m), une zone à résistivité intermédiaire (≈ 160 Ohm.m), une zone à résistivité élevée (>280 Ohm.m). Des prélèvements de sols sur les horizons 0-30cm et 30-60cm ont été réalisés sur 2 zones : <88 et >280 Ohm.m.

La parcelle de Liandech (46) possède un sol limono-sableux avec un sous-sol argileux lui conférant une réserve en eau élevée. Les zones de résistivité sont différenciées par la présence ou non de calcaire dans le sous-sol. D'après les analyses, le sol n'est pas déficitaire au moment de l'échantillonnage.

3.3 Etat hydrique des parcelles vitiforestières

La mesure du $\delta^{13}C$ (rapport isotopique ^{12}C et ^{13}C) sur les sucres des raisins à récolte indique l'état de contrainte hydrique subit par la plante entre véraison et récolte. L'analyse de variance est réalisée avec les données issues des placettes proches des lignes d'arbres (rang n adjacent) et des placettes éloignées (rang n+2).

Il n'y a pas de différences significatives au cours des différentes années sur les parcelles suivies (Tableau 5). Les niveaux de contraintes sont faibles (<-26), malgré un été 2016 très sec. Le sol, sur les 2 parcelles, est profond et possède une réserve utile suffisante bien explorée par la vigne. Les arbres n'ont pas eu d'impact sur le régime hydrique de la vigne.

Tableau 5 : Etat hydrique de la vigne entre véraison et récolte en fonction de leur distance à la ligne d'arbre ; parcelle Lagardère et Lapouyade ; millésime 2015-2017

$\delta^{13}C$	Lagardère (32)			Lapouyade (33)	
Distance/arbre	**2015**	**2016**	**2017**	**2015**	**2016**
Eloignée	-28,2	-26,6	-26,7	-27,1	-26,0
Proche	-28,0	-26,6	-26,9	-27,0	-25,9
Pr > F(distance /arbre)	*0,163*	*0,989*	*0,295*	*0,570*	*0,595*
Significatif	*Non*	*Non*	*Non*	*Non*	*Non*

3.4 Etat azoté des parcelles vitiforestières

Plusieurs mesures permettent de caractériser l'état azoté de la vigne. Nous avons utilisé la mesure NDVI, la mesure de la quantité de bois de taille avec le capteur Physiocap, des mesures sur placettes de 5 souches à l'aide du capteur piéton Dualex® (https://www.force-a.com/fr/produits/dualex) et le dosage de l'azote assimilable dans les raisins à la récolte.

A Lagardère (Figure 9), l'état azoté des vignes sur la parcelle est homogène. Que ce soit avec les observations en proxy-détection ou par échantillonnage, pas de différences significatives ne sont mises en évidence au cours des 3 années d'études. Les arbres n'ont pas eu d'impact sur les rangs de proximité.

A Lapouyade (Figures 10 et 11), la mesure NDVI ne met en évidence qu'une variabilité interannuelle, normale pour une parcelle de vigne. Pas d'effet à proximité des lignes d'arbres n'est observé.

A Liandech (Figure 11), on retrouve sur la mesure de biomasse la zone de plus forte vigueur au nord-ouest de la carte. Il n'y a pas de variation de ces indicateurs à proximité de la haie.

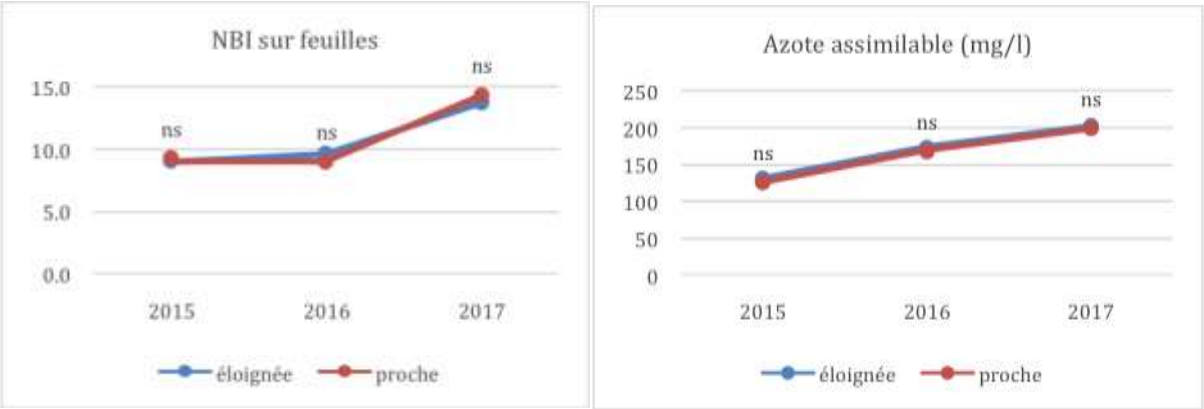

Figure 9 : Etat azoté du feuillage et des raisins en fonction de leur distance à la ligne d'arbre ; capteur Dualex®, NBI= Nitrogen Balance Index ; azote assimilable dans les raisins à récolte ; parcelle Lagardère ; millésime 2015-2017 ; ns= non significatif.

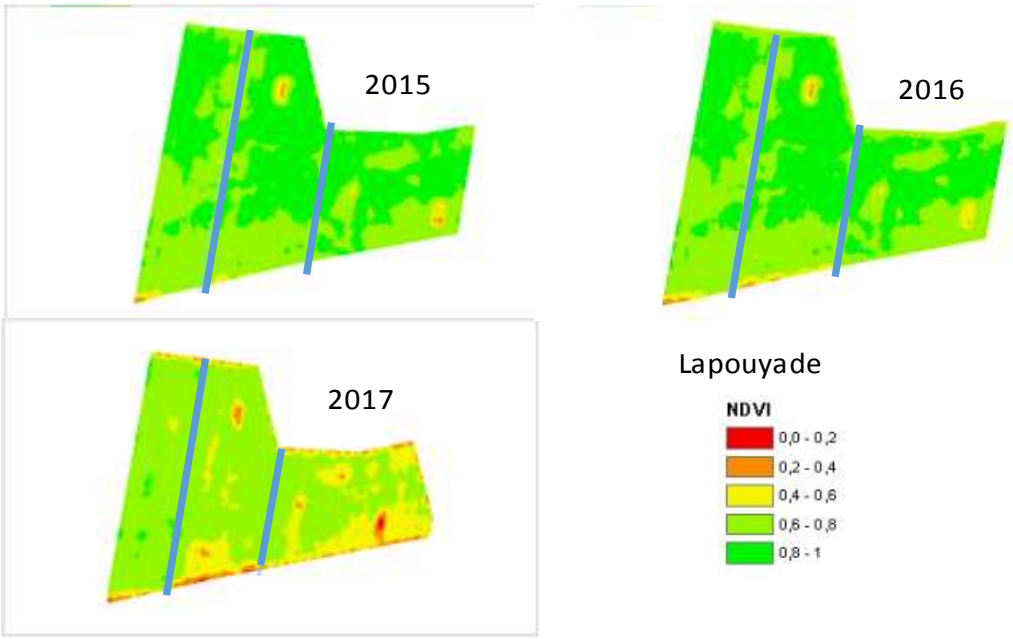

Figure 10 : Répartition de l'indice NDVI sur une parcelle viticole agroforestière ; millésime 2015-2017 ; Lapouyade (33).

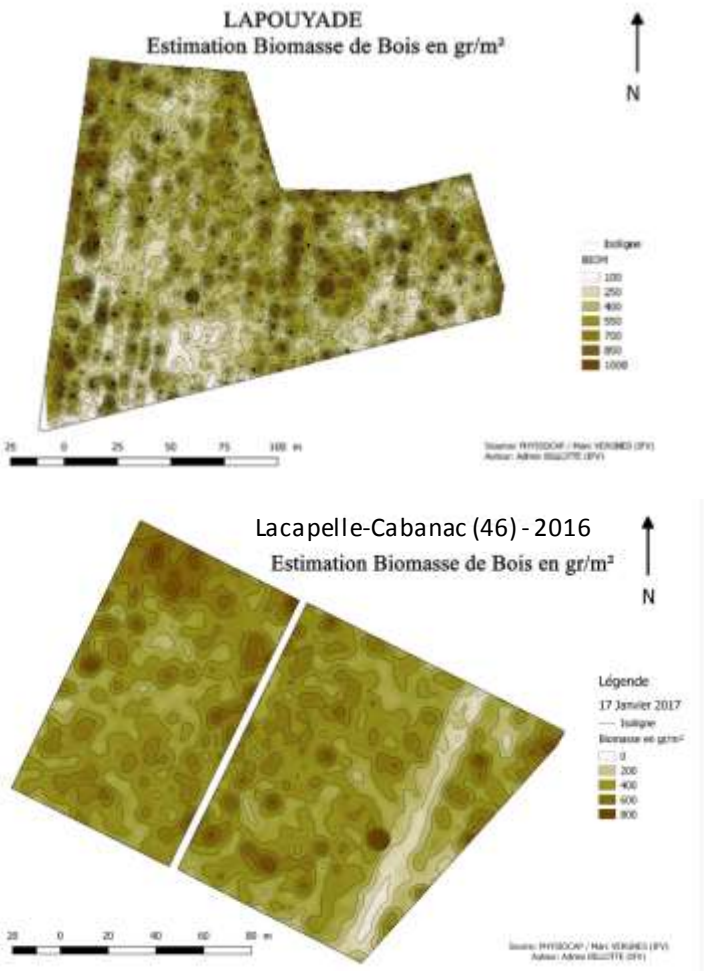

Figure 11 : Répartition de l'indice de biomasse de bois sur deux parcelles viticoles agroforestières ; millésime 2016; Lapouyade (33) et Liandech (Lacapelle-Cabanac) (46).

3.5 Rendement et qualité des raisins

Le rendement est significativement différent lors de la première année d'étude à Lagardère (Tableau 6). Cette différence est en faveur des zones en bordure des lignes d'arbres. Pour les 2 années suivantes, aucune différence significative ne s'est confirmée. Il n'y a pas de différences sur la parcelle de Lapouyade.

Les faibles écarts de rendement entre les zones proches et éloignées des lignes d'arbres n'ont pas impacté la maturité des raisins au cours des différentes années. Une seule différence est significative sur l'indice de polyphénol total (IPT) en 2015 (Tableau 7). Elle ne se retrouve pas en 2016 et ne peut être associée clairement à la présence de l'arbre.

Tableau 6 : Rendement en kg de raisins par m² de sol selon la distance des vignes à la ligne d'arbres ; parcelle Lagardère et Lapouyade ; millésime 2015-2017 ; [a,b] = groupe homogène à 5% test Newman-Keuls.

Rendement (kg/m²)	**Lagardère (32)**			**Lapouyade (33)**	
Distance/arbre	2015	2016	2017	2015	2016
Eloignée	0,88 [a]	1,89	1,55	0,86	0,91
Proche	1,03 [b]	2,02	1,49	0,85	0,78
Pr > F(distance /arbre)	*0,004*	*0,233*	*0,464*	*0,954*	*0,314*
Significatif	*Oui*	*Non*	*Non*	*Non*	*Non*

Tableau 7 : Composition des raisins à la récolte selon la distance des vignes à la ligne d'arbre ; parcelle Lagardère et Lapouyade ; millésime 2015-2017 ; [a,b] = groupe homogène à 5% test de Newman-Keuls.

Parcelle	**Largardère (32)**						**Lapouyade (33)**			
Millésime	**2015**		**2016**		**2017**		**2015**		**2016**	
Distance/arbre	proche	éloignée	proche	éloignée	proche	éloignée	proche	éloignée	proche	éloignée
Sucres [g/l]	218	214	200	198	201	197	225	222	232	230
Acidité Totale [g/l H_2SO_4]	5,6	5,6	3,4	3,5	5,0	5,0	3,0	2,9	2,5	2,5
S/AT	39	38	58	58	41	40	75	78	95	92
IPT							61[a]	52[b]	115	109
Anthocyanes [mg/kg de baies]							1118	997	1644	1583

3.6 Conclusion

Les travaux d'observations du comportement agronomique des différentes parcelles de vigne cultivées en agroforesterie nous permettent de tirer quelques enseignements. Après 9 ans de co-plantation, on ne met pas en évidence de différences de comportements, que ce soit pour la production de biomasse ou la qualité des raisins, entre les vignes situées proches des arbres (rang adjacent) et les vignes situées au cœur de la parcelle et éloignés de plus de deux rangs de ceux-ci. Cette observation est valable pour les trois configurations de parcelles suivies pendant les trois années du projet. Il serait pertinent de remettre en œuvre ce suivi lorsque le système approchera les 20 ans de co-culture avec des arbres adultes et dont le développement sera important.

4. Evaluation de l'impact de l'arbre sur la biodiversité de la parcelle viticole

4.1 Dispositifs expérimentaux

Afin de déterminer si les arbres présents dans les parcelles influencent la répartition spatiale de la biodiversité dans le vignoble : lombrics, microorganismes, insectes et araignées, avec un focus particulier sur le ravageur *Empoasca vitis* (cicadelles vertes), des stations de prélèvement ont été disposées sur les diverses parcelles agroforestières retenues dans le cadre du projet Vitiforest. Ces points de mesure ont été disposés à des distances croissantes des lignes d'arbres intra-parcellaires. Les densités de prélèvement et les méthodes d'échantillonnage ont été adaptées selon les communautés d'organismes étudiées.

4.1.1 Echantillonnage de la biodiversité en arthropodes

Les arthropodes (insectes, araignées, ravageurs de la vigne) ont été prélevés par trois méthodes distinctes, appliquées sur des stations de prélèvement disposées à proximité directe des lignes d'arbres (rang vignes/arbres, premier rang adjacent, puis à 30 et 60 m de distance aux arbres).

- La faune épigée a été capturée au moyen de pot-piège (temps d'exposition : 3 jours, sessions de capture répétées 3 fois sur les mois de juin et juillet.
- La faune de la canopée de la vigne a été collectée par aspiration sur une série de 5 ceps consécutifs à chaque station. Les insectes collectés par ces deux méthodes ont été triés et comptabilisés par grande catégorie (ordres taxonomiques) au laboratoire.
- Les cicadelles vertes ont été dénombrées séparément, toutes les 2 semaines sur une plaque engluée jaune (5 cm * 10 cm) disposée au niveau de chaque station sur le fil de palissage bas.

4.1.2 Echantillonnage des lombrics

Pour chacune des parcelles suivies, un plan d'échantillonnage adapté au site a été défini avec 3 modalités : Ligne d'arbres - Distance à l'arbre sur le rang de vigne - Distance à l'arbre sur l'inter-rang enherbé. Chaque modalité bénéficie de 6 répétitions.

C'est le protocole « Test Bêche Vers de Terre » qui a été appliqué**.** Il consiste à extraire à la bêche **6 blocs de sol pour chaque modalité**. La terre est ensuite triée manuellement pour récupérer les vers de terre qui sont triés par catégorie écologique (Epigés - Epi-anéciques - Anéciques - Endogés). Une grille avec des caractères morphologiques a été utilisée.

4.1.3 Echantillonnage des micro-organismes du sol

Des prélèvements de sol à l'aide de tarières ont été réalisés dans les parcelles d'étude, à différentes distances des arbres (1m, 4m, 9m et 19m dans la configuration de Bordeaux ; 1m, 4m, 7m, 14m, 27m dans la configuration de Cahors), afin de déterminer si la distance aux arbres influence la quantité ou la composition des communautés microbiennes. Le sol a ensuite été séché et tamisé, pour procéder à l'extraction de l'ADN et aux analyses métagénomiques. Ces analyses permettent de décrire les communautés microbiennes des sols par leur abondance et leur diversité. On aborde notamment les paramètres suivants :

- La **biomasse moléculaire microbienne** qui renseigne sur l'abondance totale des micro-organismes dans le sol et qui est évaluée par la quantité d'ADN extraite;
- Le **ratio champignons/ bactéries** qui renseigne sur d'éventuels déséquilibres microbiens avec des effets sur le fonctionnement biologique du sol. C'est un indicateur de perturbations dues à des pratiques agricoles. L'abondance relative des champignons et des bactéries est évaluée à partir de l'ADN du sol

par la technique de qPCR (quantitative Polymerase Chain Reaction. Le séquençage massif des gènes taxonomiques permet d'évaluer la diversité taxonomique microbienne en nombre d'« Operational Taxonomic Units (OTU) », qui sont une approximation pour les « espèces » dans le cas particulier des micro-organismes. Le séquençage permet également d'appréhender la composition taxonomique des communautés microbiennes. Cette approche nécessite un travail de bio-informatique important.

4.2 Des tendances variables selon les communautés d'organismes

4.2.1 Les arthropodes : Résultats contrastés selon le groupe observé, le site et la période

Dans les pots-pièges, les abondances en arthropodes épigés n'ont pas révélé d'effet des alignements d'arbres sur le site de Lapouyade (Bordeaux). Les arthropodes du feuillage ont été plus nombreux à proximité des alignements d'arbres en 2015, mais un effet inverse a été mis en évidence en 2016 (Figure 12).

Dans le vignoble de Lagardère (Côtes de Gascogne), des abondances plus faibles d'arthropodes épigés ont été relevées sporadiquement à proximité d'éléments arborés en 2015 et 2016. Pour les arthropodes de la canopée, seule la haie composite montre des abondances significativement plus élevées à proximité directe (Figure 12).

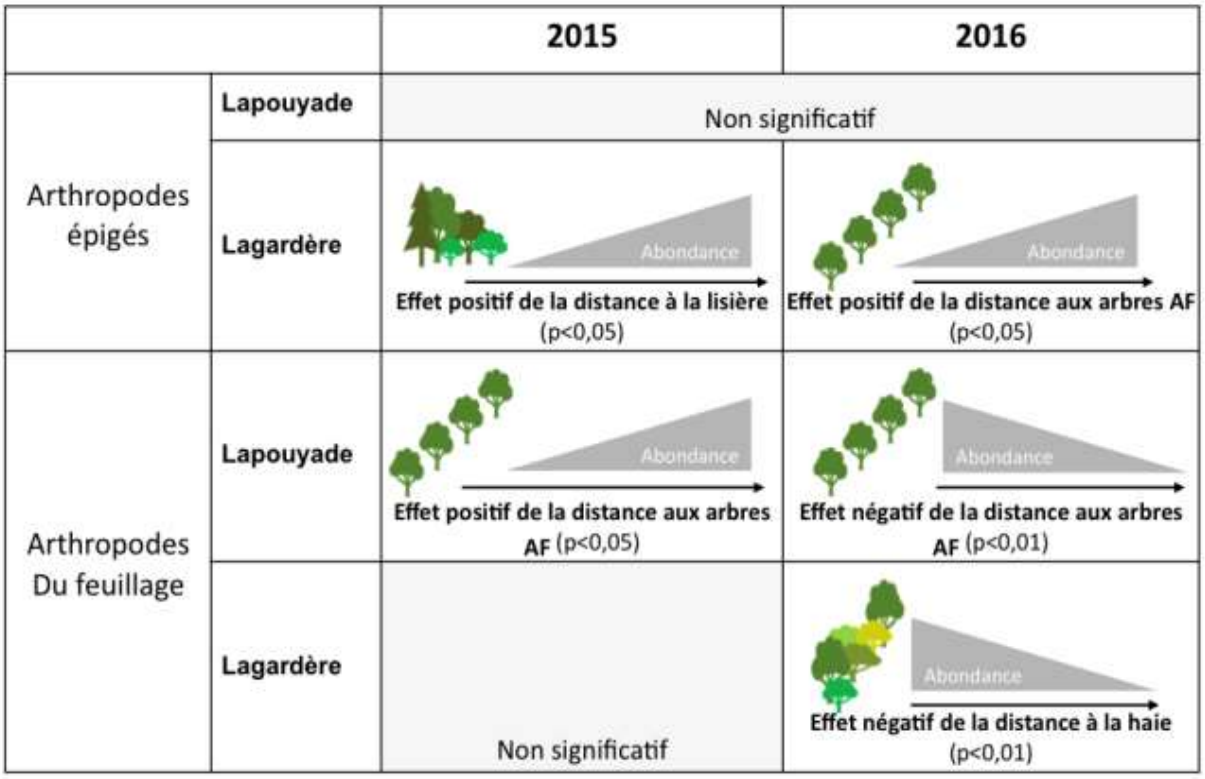

Figure 12 : Effets de la distance à l'arbre (alignement d'arbres intra-parcellaire, lisière de forêt, et/ou haie composite) sur les abondances d'arthropodes épigés et du feuillage dans le vignoble de Lapouyade (Bordeaux) et de Lagardère (Côtes de Gascogne) en 2015 et 2016.

Concernant les populations de cicadelles vertes, un effet dépressif de la rangée d'arbres a été démontré sur la parcelle de Lapouyade en 2015. Cependant, cet effet n'a pas été retrouvé l'année suivante. Un effet de la distance à la lisière de la forêt située au sud de la parcelle a également été constaté, mais les résultats sont contradictoires entre 2015 et 2016. Sur la parcelle gersoise (Lagardère), aucun effet des lignes d'arbres n'a été constaté sur la cicadelle verte (Tableau 8).

Tableau 8 : Effets de la distance à l'arbre le plus proche (alignement d'arbres intra-parcellaire, lisière de forêt, et/ou haie composite) sur les abondances d'*Empoasca vitis.*

	Distance à la ligne d'arbres		**Distance à la lisière de forêt**		**Distance à la haie composite**	
	t value	p value	t value	p value	t value	p value
2015 Lapouyade (Bdx)	**3,73**	**<0,001**	**2,91**	**0,007**	/	/
2016 Lapouyade (Bdx)	1,22	0,23	**-2,54**	**0,02**	/	/
2015 Lagardère (CdG)	-0,23	0,82	-0,67	0,51	-0,22	0,83
2016 Lagardère (CdG)	1,12	0,27	-0,56	0,58	-0,15	0,88

4.2.2 Un effet significatif des lignes d'arbres sur l'abondance en lombrics

Sur plusieurs parcelles du projet Vitiforest, un impact significatif de la présence des lignes d'arbres sur la distribution des vers de terre a été mis en évidence. Davantage de lombrics ont été retrouvés sur la bande d'arbres enherbée. On note que les zones travaillées (inter-rang ou rang de vignes) présentent un nombre significativement moins élevé d'individus que les zones avec un enherbement permanent. L'enherbement de l'inter-rang a cependant un effet positif sur l'abondance lombricienne. Au niveau qualitatif, les catégories écologiques semblent similaires entre les modalités (Figure 13).

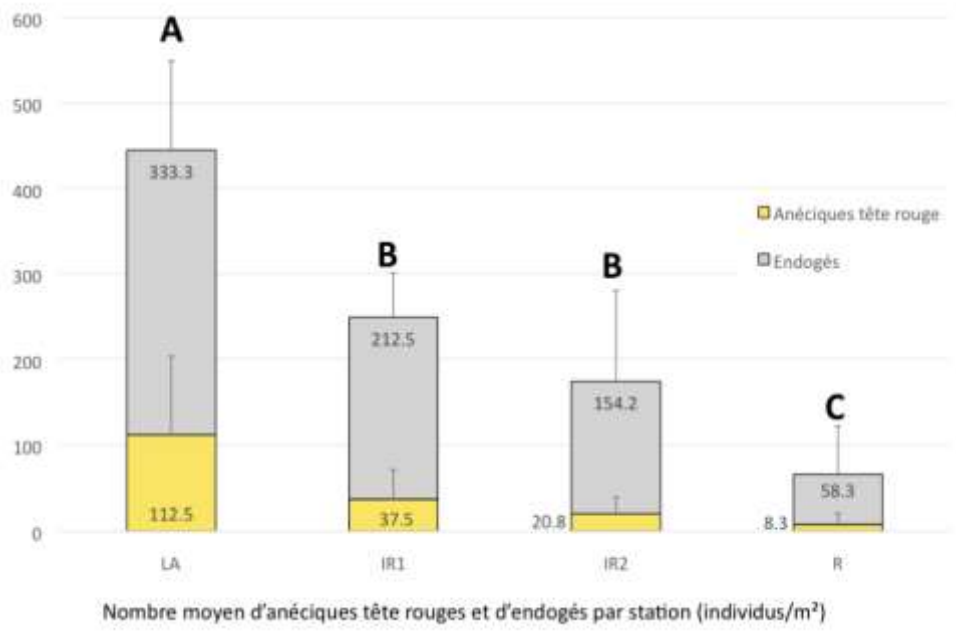

Figure 13 : Abondance en lombrics selon les modalités (LA : Ligne agroforestière - IR : Inter-rang - R : Rang de vigne) – Parcelle de Liandech 2016

4.2.3 Un effet qualitatif des arbres sur la composition des communautés microbiennes du sol

Dans la parcelle de Lagardère (Côtes de Gascogne), la biomasse moléculaire microbienne est homogène le long du gradient d'éloignement à l'arbre, elle est comprise entre 30 et 40µg d'ADN par gramme de sol. Le rapport champignons/bactéries ne varie pas significativement le long du gradient et prend des valeurs classiquement rencontrées pour des systèmes agricoles. La diversité bactérienne (en termes de nombre d'OTU - operationnal taxonomic unit) est naturellement plus élevée que celle des champignons et est homogène, quelle que soit la distance aux arbres. Ces indicateurs montrent l'absence d'influence des arbres sur l'abondance et la diversité microbienne (Tableau 9).

Tableau 9 : Biomasse, diversité bactérienne et diversité de champignons à plusieurs distances des arbres

Eloignement à l'arbre	1m	4m	10m	20m	Unité
Biomasse	32.8±5.7	34.8±4.8	36.5±6.2	35.9±4.8	µg ADN/g sol
Diversité bactérienne	1414±45	1368±81	1466±28	1359±93	Nb de taxons
Diversité de champignons	1054±288	1028±202	1101±185	1066±233	Nb de taxons

Cependant les résultats sont plus contrastés lorsque l'on s'attache à la composition des communautés microbiennes, c'est-à-dire en comparant les espèces microbiennes présentes à proximité des arbres et éloignées des arbres (Figure 14).

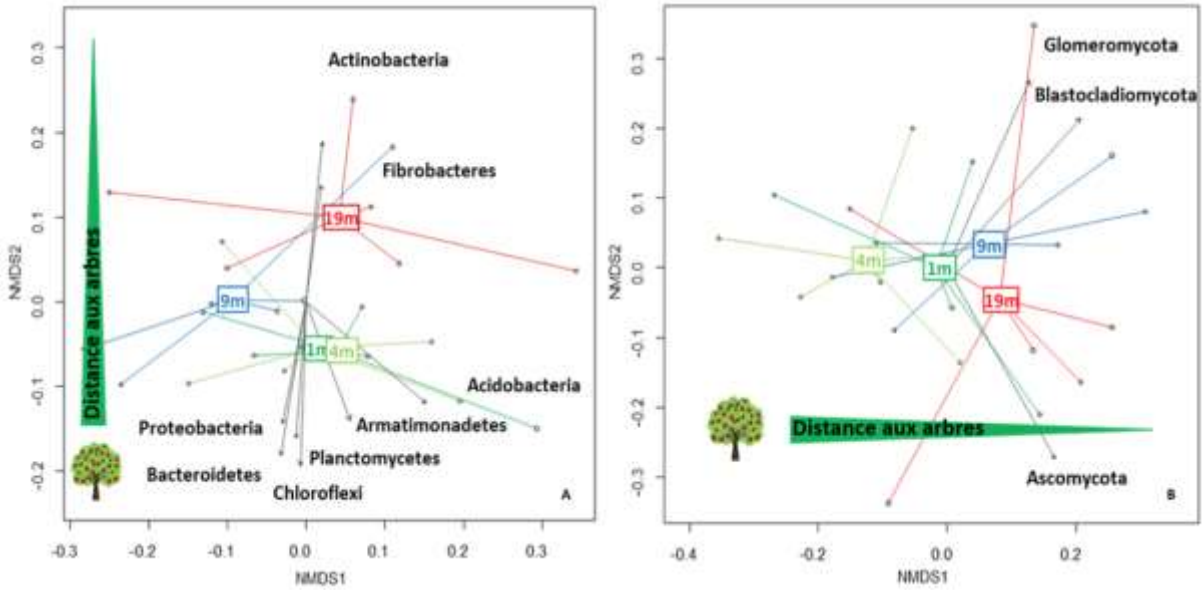

Figure 14 : Comparaison de la similitude des structures des communautés bactériennes (à gauche) et fongiques (à droite) en fonction de la distance aux arbres avec analyse de positionnement multidimensionnel non-métrique (NMDS). La valeur de stress pour les graphiques est < 0,2. Les phyla, ou « familles microbiennes », explicatifs de cette organisation figurent en noir.

La composition bactérienne diffère selon la distance aux arbres, avec des phyla spécifiques à proximité comme par exemple les *Acidobacteria*, *Bacteroidetes* et *Proteobacteria*. Ces phyla sont généralement présents dans des sols forestiers riches en matières organiques et impliqués dans un fonctionnement biologique stabilisé et durable. Les groupes *Actinobacteria*, *Fibrobacteres* sont quant à eux plus présents à grande distance des arbres. Concernant les champignons, le phylum *Basidiomycota* est

stimulé quand proche des arbres, alors que le taxon *Glomeromycota* est réprimé. Le taxon *Basidiomycota* est classiquement retrouvé en sols forestiers dans des environnements riches en matières organiques stabilisées. Les *Glomeromycota* regroupent des champignons capables de faire des symbioses mycorhiziennes notamment avec les arbres et leur diminution avec l'éloignement à l'arbre peut s'expliquer par l'absence de plantes hôtes.

Sur la parcelle de Cahors, aucune différence significative n'est observée le long du gradient d'éloignement à l'arbre pour les indicateurs globaux : la biomasse moléculaire est autour de 20-30µg DNA / g de sol, le ratio champignons/bactéries se situe autour [4 - 8], c'est-à-dire que la densité des champignons est 4 à 8 fois plus élevée que celle des bactéries. La diversité bactérienne est plus élevée loin de l'arbre [1250 – 1550 d'OTUs] que proche de l'arbre [1150 – 1300 d'OTUs]. La diversité des champignons est autour de [700 – 900 d'OTUs]. Concernant la comparaison de la structure des communautés, les structures bactériennes et fongiques ne semblent pas varier en fonction de la distance aux arbres. Dans ce contexte agroforestier, où une haie basse est intégrée dans la parcelle, les arbustes ne semblent donc pas influencer significativement les communautés microbiennes.

5. Evaluation de l'impact économique de l'agroforesterie en viticulture

Peu de références technico-économiques sont disponibles sur les systèmes agroforestiers en viticulture, et les viticulteurs associent souvent ces derniers avec des profits incertains et des coûts significatifs à long terme (Rapey, 1995), sans oublier les contraintes organisationnelles générées par l'introduction de l'arbre dans les parcelles. Peu d'études ont évalué la rentabilité des systèmes agroforestiers en général, et cela est d'autant plus vrai pour les systèmes viticoles. La plupart des références disponibles sont issues de publications techniques dans des journaux professionnels et dans les rapports annuels de projets de recherche et portent sur des expérimentations dans des cas bien spécifiques. Quatre types d'impacts économiques sont mis en évidence : (i) le coût de plantation et d'entretien des arbres, (ii) les coûts additionnels pour l'entretien de la vigne, (iii) les profits issus de la valorisation des arbres ou de leurs produits et (iv) les aménités et services environnementaux, en comparant système en monoculture et système viticole agroforestier.

5.1 Investissement pour la plantation et coûts de production des parcelles agroforestières

Pour l'investissement associé à la plantation et à l'entretien des jeunes arbres, la seule référence accessible (avec calculs disponibles) repose sur les calculs faits sur le Domaine de Restinclières et concernent des parcelles plantées avec du *Sorbus Domestica* (100 arbres par ha) et de la vigne (cépages Syrah et Grenache plantés à 3600 pieds/ha). Dans cette configuration, l'investissement total par ha a été estimé à 1074 €, soit 5,7 €/arbre en 2000 (Goma-Fortin et Trambouze, 2011). Pour autant, le coût dépend de la densité plantée mais également des essences choisies et du système de protection adopté. D'autres publications, non spécifiques à la vigne, donnent des ordres de grandeur de coût de plantation en différenciant les allées intra parcellaires (4580€ /ha sur 30 ans) des arbres plantés en bordure de champ (43€/mètre linéaire de haie sur 30 ans). Pour des allées intra parcellaires de 75 arbres par hectare, Bellassen et al. (2019a) montrent que la main d'œuvre est le poste le plus coûteux (85%) et que l'entretien des arbres est l'activité la plus coûteuse (77%), par comparaison à la planification (3%) et à la plantation (20%). Pour ce qui est des haies arbustives en tour de parcelle, il n'y a aucun coût de semis et de gestion de l'herbe qui soient inclus, et c'est le coût d'entretien des arbres qui est le plus important (77%) (Bellassen et al., 2019b). Le financement de projets agroforestiers est une des difficultés pour convaincre les viticulteurs de s'engager dans ce type de système dans la mesure où – même si une mesure spécifique a été inclue dans la réforme de la PAC 2007-2013, elle n'a pas été transcrite dans la loi française (Angeniol et Liagre 2005). Il existe toutefois des programmes dans certaines zones finançant une partie des coûts de plantation (dans la limite de 40% du montant des achats). Peu d'agriculteurs y ont eu recours jusqu'à présent. D'autres opportunités sont également

disponibles via les Conseils Départementaux et Régionaux, et les fonds privés (fondations ou fonds Carbone pour compensation).

Les coûts supplémentaires et indirects sont liés aux modifications des opérations culturales du vignoble et à l'entretien des arbres. Tout d'abord, les opérations culturales d'entretien du vignoble peuvent être modifiées avec la mise en place des arbres dans les parcelles (la récolte des raisins peut par exemple passer de mécanique à manuelle à cause de la forme et/ou de la taille des arbres). Certaines opérations culturales peuvent donc s'avérer plus coûteuses, en fonction de la densité des arbres dans la parcelle. Les opérations d'entretien des arbres sont aussi à prendre en compte et dépendent de leur densité, de leur position dans les parcelles et des objectifs qui leur sont assignés, selon que leur destination soit la production de fruits ou de bois de construction, ou qu'il n'y ait aucun objectif de production particulier. Ces opérations peuvent être coûteuses, mais sont toutefois essentielles pour une conduite efficace d'une parcelle en agroforesterie. Cela demande de la disponibilité de main d'œuvre (environ 13h/ha pour la plantation et 6h/ha/an pour l'entretien des arbres pendant les 3 premières années) (Bellassen et al., 2019a).

5.2 Pertes et profits

On peut également considérer les pertes de rentabilité en termes de production de raisin et de vin, même si aucune référence n'a encore été produite en viticulture. Suivant Pellerin et al. (2013) et Bellassen et al. (2019a), on peut considérer deux types de pertes en système viticole agroforestier :

- La perte de surface plantée en vigne si l'on introduit des arbres dans la parcelle.
- La perte de rendement sur les surfaces en production à cause d'une possible compétition vigne/arbre pour la lumière, l'eau et les nutriments, notamment quand les arbres sont plus âgés (à partir de 15 ans selon Bellassen et al. (2019a), les chiffres dépendant des essences et densités de plantation).

Pour autant, d'autres papiers attestent également de rendements meilleurs ou plus sécurisés en systèmes agroforestiers, ainsi que du développement de nouveaux marchés lorsqu'il s'agit d'arbres destinés à la production et donc de diversification du revenu, même si les chiffres dépendent de la valorisation des coupes de bois qui varie selon les essences (Rapey, 2000). Cette valorisation du bois est à ce jour encore assez incertaine à cause du manque de visibilité sur le long terme et de la faible densité des arbres dans les parcelles agro-forestières par comparaison aux références disponibles sur la forêt. La variabilité des rendements obtenus par les arbres (bois, énergie, fruits, etc.) due aux différences de contexte et à l'efficacité de l'entretien des arbres et de la conduite des parcelles ajoutent de l'incertitude sur les prix et donc sur la valorisation de ces systèmes. On note également la valeur ajoutée créée en termes de paysage pour les consommateurs, riverains et touristes.

5.3 Externalités et services environnementaux

Des externalités indirectes et des services environnementaux sont également en jeu dans la mise en place de systèmes viticoles agroforestiers, notamment en termes de biodiversité et de paysage. Ces services sont souvent mentionnés mais jamais évalués monétairement, en tous cas pas dans le cas de la viticulture. Il s'agit pourtant d'une étape souvent incontournable pour la mise en œuvre de politique publique de soutien à ce type de démarche et à la rémunération de tels services rendus à la société. Il est en particulier possible de jouer sur l'effet positif à long terme des projets, d'évaluer cet effet et de le transformer en aide à l'investissement (Angeniol et Liagre 2005). Les services rendus par les projets agroforestiers sont toutefois complexes à évaluer alors qu'ils pourraient être un levier individuel et collectif important pour le développement de ce type de projets. La compensation de chaque service écosystémique rendu au profit de l'agriculteur pourrait soutenir des initiatives individuelles locales

lorsque les bénéfices sont collectifs. On ne relève que deux publications s'intéressant à l'évaluation des services environnementaux apportés par l'agroforesterie en général, l'un introduisant la perte de sol dans la comparaison économique d'un système agricole et d'un système agroforestier (Rasul et Thapa, 2006) et l'autre, plus qualitatif, visant à comparer différentes pratiques de gestion d'un système agroforestier (Oppermann, 2003) en considérant la richesse spécifique et la structure de la biodiversité. Un effort de recherche est alors nécessaire en économie de l'environnement afin de construire des politiques publiques cohérentes prenant en compte les externalités positives de l'agroforesterie.

Conclusion

Le programme Vitiforest a permis de tester et valider divers protocoles et outils de mesure à l'échelle parcellaire en contexte viticole. Il a également mis en lumière une diversité de configurations d'aménagements arborés au sein de la vigne.

En termes d'impact microclimatique, à ce stade de développement des arbres (<10 ans), on constate un faible effet de l'ombrage (rafraîchissement très ponctuel de 2,5 °C durant la période de véraison sur la parcelle de Lapouyade dont les arbres sont plantés dans les rangs de vigne). Aucun effet pour le moment sur la parcelle de Lagardère dont les arbres sont plantés sur de larges allées entre la vigne. En revanche, on observe sur ce site un effet de couloir avec une circulation d'air qui rafraîchit les rangs de vigne situés au sud des allées d'arbres de l'ordre de 1,5 °C lors des journées à forte demande évaporative. Enfin, pour des projections à plus longs termes, les travaux de modélisation montrent un possible effet d'ombrage avec réduction d'un tiers du rayonnement absorbé par la vigne, effet qui pourra être corrigé, si nécessaire, par la taille des arbres.

Au niveau agronomique, les premiers suivis montrent que la présence d'arbres depuis 9 ans à proximité de la vigne n'a pas d'effet concurrentiel (vigueur, rendement et composition des raisins). Cette observation est valable pour les trois configurations de parcelles étudiées. Ce résultat est encourageant, mais il devra être confirmé par le suivi de la co-culture lors des dix prochaines années.

Pour ce qui est la biodiversité, le projet Vitiforest a montré des effets contrastés de l'arbre sur la répartition des ravageurs (cicadelle verte) et de la biodiversité aérienne (insectes, araignées, etc.). Les résultats sont fluctuants d'une année à l'autre et selon les sites et ne permettent pas de conclure sur un effet tranché et uniforme. Au niveau du sol, on n'observe pas non plus d'effets sur l'abondance et la diversité des micro-organismes. La composition des communautés microbiennes semble cependant légèrement impactée par la présence des arbres. Enfin, une abondance supérieure de lombrics a été mesurée sur les lignes d'arbres. A ce stade de développement des arbres, il est encore difficile de conclure sur l'effet isolé des arbres intra-parcellaires sur la biodiversité, ou de leur attribuer des effets agronomiques directs comme la régulation sur les ravageurs ou l'amélioration de la qualité biologique des sols par exemple. Des suivis à moyens termes, sur des parcelles plus âgées permettront d'affirmer et d'affiner les observations et les tendances.

Enfin, concernant l'impact économique de l'agroforesterie en viticulture, il semble encore difficile de produire une analyse multicritère des performances de ce type de systèmes. La modélisation sera certainement un outil à privilégier pour tenir compte de la diversité et de la complexité de ces systèmes. Il existe un enjeu scientifique et méthodologique autour de l'identification des indicateurs pertinents pour évaluer les contributions environnementales, sociales et économiques des systèmes viticoles agroforestiers et envisager leur conversion en valeurs monétaires dans le cadre de politiques publiques.

Remerciements

Merci aux divers domaines qui ont mis à disposition leurs parcelles : Domaine Emile Grelier (Lapouyade) – Clément et Patrick Dubos (Lagardère) – Château Lagrezette (Landiech) - Domaine de Pajot (Eauze) – Tanguy Meliet (Lagraulet) – Lycée du Montat.

Merci aux membres des diverses équipes pour leur participation : Myriam Desanlis, Laure Gontier, Marc Vergnes (IFV Sud-Ouest) - Séverine Mary, Pauline Tolle (Vitinnov) – Loreleï Cazenave, Pascal Guibault (Chambre d'Agriculture 33) - Thomas Houet (LETG-Rennes CNRS) - Jean-Philippe Gastellu (CESBIO Université Toulouse III) et son équipe de recherche.

Merci à tous les étudiants ayant participé à la collecte des données de terrain.

Merci à la Fondation de France pour son soutien financier dans le cadre de l'appel à projet « Jeunes chercheurs sur les agroforesteries tempérées ». De même que l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, la Région Occitanie et le syndicat des Côtes de Gascogne.

Références bibliographiques

Angeniol C., Liagre F., 2005. Programme Agroforesterie 2006/08 – Groupe de travail GT5, Mise en place d'un réseau national de placettes de référence, R5.2 Synthèse sur la mise en place du réseau, Mission DAR, Projet 2005-n°321, 16p.

Bellassen V., Cardinael R., Mézière D., et al., 2019a. Développer l'agroforesterie dans les parcelles cultivées. In: Le potentiel de l'agriculture et de la forêt françaises en vue de l'objectif d'un stockage de carbone dans les sols à hauteur de 4 pour mille. (Coord. S. Pellerin), INRA.

Bellassen V., Cardinael R., Mézière D., et al., 2019b. Pratique stockante. In: Le potentiel de l'agriculture et de la forêt françaises en vue de l'objectif d'un stockage de carbone dans les sols à hauteur de 4 pour mille (Coord. S. Pellerin), INRA

Carbonneau A., Deloire A., Jaillard B., 2015. Traité de la vigne : physiologie, terroir, culture. Dunod, Paris.

Gastellu-Etchegorry J.-P., Demarez V., Pinel V., Zagolski F., 1996. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. Remote sensing of environment 58, 131–156.

Gastellu-Etchegorry J.-P., Grau E., Lauret, N., 2012. DART: A 3D model for remote sensing images and radiative budget of earth surfaces, in: Modeling and Simulation in Engineering. pp. 29–68.

Goma-Fortin N., Trambouze W., 2009. Program concerning Agroforestry at Restinclieres. Study report 2009. [French: Programme Intégré de Recherches en Agroforesterie à Restinclières. Rapport d'étude 2009, CA34, Montpellier SupAgro UMR SYSTEM & UMR CBGP, AGROOF.

Goma-Fortin N, Trambouze W., 2012. Study of grapevine and tree interactions under agroforestry practices. [French: Etude des interactions entre l'arbre et la vigne en agroforesterie.] in PIRAT: Integrated research program concerning Agroforestry at Restinclières. Study report 2012. [French: Programme Integre de Recherches an Agroforesterie à Restinclières. Rapport d'étude 2012 - Document remis au Conseil Général du Répartement de l'Hérault]. AGROOF, CA 34, INRA, Valhoriz.

Gouttesoulard C., 2015. Assessment of the inter- and intra-lot variability of agronomic performances of grapevine under agroforestry practices [French: Analyse de la variabilité intra et inter parcellaire du comportement agronomique des vignes en agroforesterie] (Master Thesis). ISARA-Lyon & Chambre d'agriculture de l'Hérault, Lyon, France.

Grimaldi J., 2018. Impacts of agroforestry on microclimate for grape and wine production : Assessment in Southern France [French: Impacts microclimatiques de l'agroforesterie en viticulture : étude de cas dans le Sud de la France] (phD thesis). Université Toulouse III Paul Sabatier, Toulouse, France.

Kliewer W.M., Lider L.A., 1970. Effects of day temperature and light intensity on growth and composition of *Vitis vinifera* L. fruits. Journal of American Society for Horticultural Science 95, 766-769.

Oppermann R., 2003. Nature balance scheme for farms evaluation of the ecological situation. Agriculture, ecosystems and Environnement 463-475.

Rapey H., 1995. Plantation de feuillus précieux en prairie pâturée chez des propriétaires privés : résultats et contexte technico-économique. Rapport Cemagref, INRA, Clermont-Ferrand, 25p.

Rapey H., 2000. Conditions économiques d'adoption de systèmes agroforestiers, Enquête et modélisation dans le cas du sylvopastoralisme. Thèse, ENSA de Montpellier, pp. 7-91.

Rasul G, Thapa G.B., 2006. Financial and economic suitability of agroforestry as an alternative to shifting cultivation: The case of the Chittagong Hill Tracts, Bangladesh. Agricultural Systems 29-50.

Riou C., Pieri P., Valancogne C., 1987. Variation de la vitesse du vent a l'intérieur et au-dessus d'une vigne. Agricultural & Forest Meteorology 39, 143–154. https://doi.org/10.1016/0168-1923(87)90033-5

Wang Y., Grimaldi J., Landier L., Chavanon E., Gastellu-Etchegorry J.-P., 2020. Introducting 1-D clouds in DART model. Presented at the XXIV ISPRS Congress, Nice, France.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL ou DOI).