

Avec le soutien de :

Avec
la contribution
financière du compte
d'affectation spéciale
développement
agricole et rural
CASDAR



MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA SOUVERAINETÉ
ALIMENTAIRE

Liberté
Égalité
Fraternité

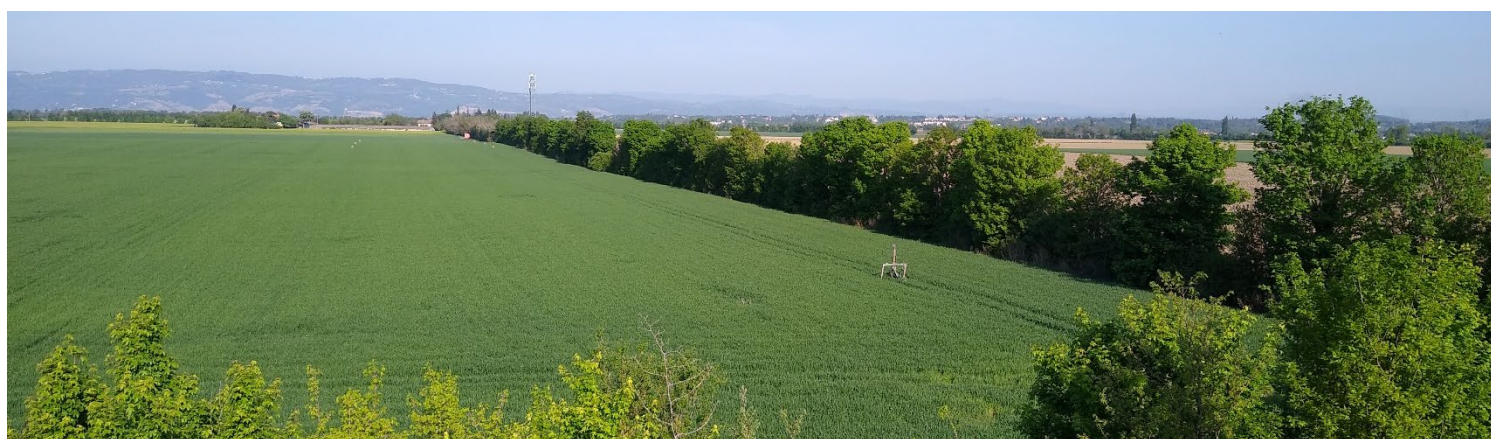


Resp^{haies}

Rapport n°6

Mise au point d'une méthodologie d'étude de l'effet brise vent des haies sur les grandes cultures

Rapport final — mai 2023



Auteurs :

Ambroise Martin-Chave – AGROOF

Camille Béral – AGROOF

Remerciements

AGROOF remercie en premier lieu les agriculteurs qui ont accepté les suivis et prélèvements sur leurs parcelles, et de partager leurs itinéraires techniques des parcelles suivies.

Ce travail a également pu être réalisé grâce à la participation de l'AFAC Pays de la Loire, nous remercions Olivier Cherreau pour l'accueil sur place et en particulier Cyrille Barbe pour son accompagnement dans la recherche de parcelle en Mayenne.

Merci à Aline Buffat de la Chambre d'Agriculture 26 pour la recherche de parcelles adéquates dans le département.

Nous remercions également Daniel Delahaye, Romain Reulier, Mathieu Marguerie et Samuel Corgne pour les échanges et leurs apports lors des COPIL et points méthodologiques, ainsi qu'Olivier Cantat pour les aspects climatiques.

Merci aux personnels d'ARVALIS des stations de Gréoux-les-Bains, Nîmes et Etoile sur Rhône pour leur apports méthodologiques et l'accès aux machines de laboratoires.

Table des matières

PARTIE 1 — PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF	4
1.1 — Problématique	4
1.2 — État de l'Art	4
1.3 — Objectifs	8
PARTIE 2 — METHODOLOGIE ET REALISATIONS	9
2.1 — Méthodologie	9
2.2 — Déroulé du projet	16
2.2.1 – Organisation mise en place	16
2.2.2 – Étapes	16
PARTIE 3 – RESULTATS	18
3.1 – Résultats	18
3.2 – Discussion des résultats	32
3.3 – Liste et descriptif des livrables	34
PARTIE 4 – PERSPECTIVES	34
4.1 – Suites envisagées	34
4.2 – Éléments évaluatifs	35
4.2.1 – Difficultés rencontrées	35
4.2.2 – Analyse d'impact du projet sur les différents publics cibles	35
4.2.3 – Indicateurs de suivis	35
4.2.4 – Indicateurs de résultats	36
4.2.5 – Indicateurs de suivis	Erreur ! Signet non défini.
PARTIE 5 – ANNEXES	37
Bibliographie	37
Index	Erreur ! Signet non défini.

PARTIE 1 — PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF

1.1 — Problématique

Dans le cadre du projet CAS'DAR RESP'HAIES (2018-2022) visant à évaluer l'impact des haies sur les performances économiques des exploitations agricoles, la sous-action 2.3 avait comme finalité la mise au point d'une méthodologie de l'étude de l'effet des haies sur les rendements des grandes cultures, en s'intéressant aux techniques d'imageries aériennes.

Les haies sont susceptibles d'affecter les rendements des grandes cultures à travers de multiples processus tels que les phénomènes de compétition ou facilitation pour les ressources (eau, nutriments, lumière), la création de microclimats influençant l'état hydrique des cultures, ou encore la modification des interactions entre auxiliaires et ravageurs pouvant influencer la régulation naturelle des bioagresseurs.

L'effet des haies sur les rendements est complexe car il est multifactoriel, dépendant des cultures et leur mode de gestion en lien avec le contexte pédoclimatique. Les références spécifiques par cultures et territoires en fonction du type de haie sont globalement lacunaires à l'échelle de la France métropolitaine. Dans le but d'avancer dans la définition d'une ou plusieurs méthodes pouvant permettre l'étude de l'effet des haies sur les rendements des grandes cultures dans des contextes variés, le présent document rend compte des travaux réalisés sur quelques parcelles en Mayenne et dans la Drôme, pour lesquelles l'effet des haies a été évalué via des mesures *in situ*, des analyses de cartes de rendements et du traitement d'imageries aériennes Sentinel-2.

1.2 — État de l'Art

Effet des haies sur les grandes cultures

Les haies ont plusieurs modes d'action possibles sur les cultures, à travers la modification de facteurs biotiques :

- Interactions entre arbres et cultures, et abiotiques, à travers les modifications microclimatiques.
- Compétition racinaire pour l'eau et les nutriments possible avec les cultures (effet pénalisant).
- Interception lumineuse au nord, à l'est et à l'ouest des arbres (effet négatif, neutre à positif selon l'intensité) et modification du bilan radiatif par capture et réémission des radiations solaires vers les cultures.
- Effet brise vent, modifiant la température et l'humidité de l'air, l'érosion éolienne.
- Dépôt de litière et renouvellement racinaire, pouvant générer des apports de matières organiques et améliorer la fertilité du sol.
- Modification de la disponibilité en habitat pour les bioagresseurs et leurs ennemis naturels.

Parmi les facteurs abiotiques que la haie peut modifier, le microclimat (qui diffère du macroclimat, à l'échelle régionale) est l'un des plus importants avec la limitation de l'érosion.

Au niveau microclimatique, le rôle des haies comme « brise vent » est expliqué principalement par la hauteur des alignements, et sa porosité au vent (Cleugh, 1998). La porosité est elle-même liée à de multiples facteurs, dont l'épaisseur de la haie (Böhm et al., 2014). On peut décliner cet effet brise vent en différents paramètres : vitesse moyenne, direction et turbulence du flux d'air. La conséquence de cet effet est la création théorique de différentes zones, différemment affectées par la haie (Cleugh, 1998) : zone abritée et zone de sillage, où des turbulences apparaissent. La spatialisation de ces zones par rapport au sens du vent est variable selon la localisation, l'orientation, la hauteur de la haie (H) et sa porosité en % (Nuberg, 1998). Les effets des haies peuvent ainsi être distingués de 0 à plusieurs fois la hauteur maximale (jusqu'à 30H parfois) et cela de façon non linéaire. La littérature scientifique mentionne ainsi la création d'une zone abritée pouvant aller de jusqu'à 10H dans le cas d'une haie imperméable, et jusqu'à 20H dans le cas de haies possédant une porosité supérieure de 40 ou 50 % (Nuberg, 1998). Cette zone débute généralement aux alentours vers 4H, dans la mesure où des turbulences dans les premiers m après la haie sont fréquentes. Une revue détaillée de ces mécanismes peut être trouvée dans (1998) ou Brandle et al. (2004).

La présente étude s'intéresse principalement aux effets de la haie dans la zone abritée, où la vitesse du vent est réduite en comparaison d'une zone non abritée. La modification de ces paramètres agit ensuite sur d'autres paramètres microclimatiques tels que la température et l'humidité de l'air. Un des premiers effets de cette réduction de la vitesse du vent est une augmentation en journée de la température de l'air, jusqu'à plusieurs degrés (5) jusqu'à 8H. De 8 à 24H, la température diminue de plusieurs degrés en comparaison d'une zone témoin. La nuit, les températures de 0 à 1m du sol sont aussi généralement plus élevées de 1 – 2 °C, et plus fraîches au-dessus de 2m. Les nuits très calmes, des inversions peuvent se produire (Argete and Wilson 1989 dans Cleugh (1998)).

L'absence de turbulence dans la zone abritée cause également une hausse de l'humidité de l'air car cette dernière reste à la surface, ce qui limite l'évapotranspiration (gradient moins important), le jour et la nuit.

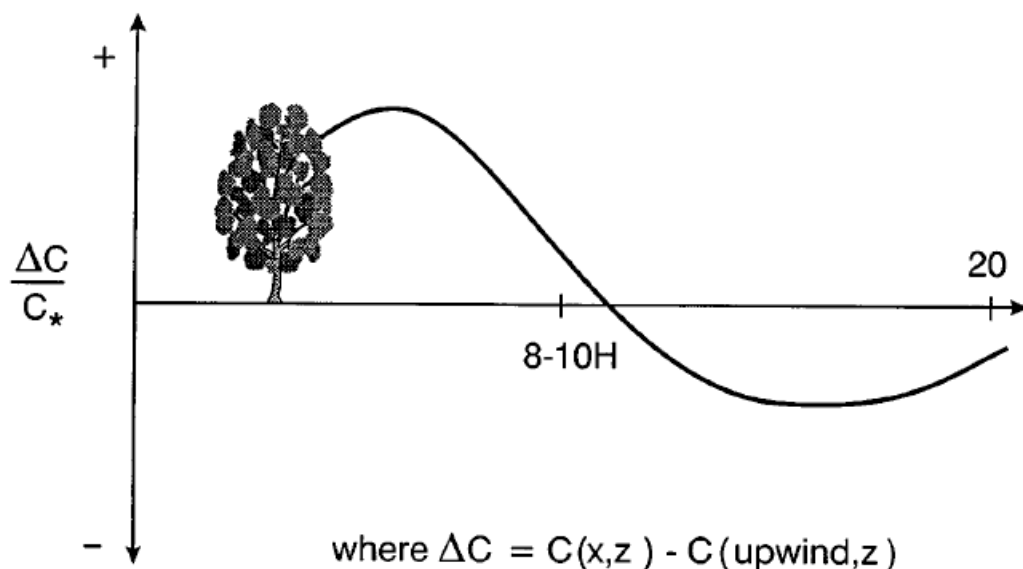


Figure 10. Hypothetical spatial distribution of changes in a scalar concentration (C) whose source is at the ground surface and is spatially uniform upwind and downwind of a windbreak. Scalar concentrations have been normalised by C^ (= Flux of C/u_0^* where u_0^* is the upwind shear stress – a measure of the airflow's turbulence and surface roughness upwind) to account for differences in radiation and windspeed.*

Source: after McNaughton (1988).

Il est possible de considérer la réduction de la vitesse du vent réduit l'évapotranspiration en zone abritée si le sol est humide (pluie, irrigation) et que de l'air sec est renouvelé par advection. Si la surface du sol est sèche et qu'il n'y a pas d'advection, ralentir la vitesse du vent augmente généralement l'évaporation. Ces phénomènes sont complexes car il n'existe pas de relation simple entre vitesse du vent et évapotranspiration. Ainsi, le ralentissement de la vitesse du vent peut conduire à la fois à une réduction ou à une augmentation de l'évaporation, en fonction de la température (du rayonnement), de la résistance stomatique des plantes concernées et de la résistance aérodynamique de la surface de contact (sol, plantes). La résistance stomatique est elle-même fonction des ressources en eau de la plante, de la température ambiante. L'un des mécanismes en jeu est que sous l'effet du rayonnement, la pression de la vapeur d'eau dans la feuille est supérieure à celle de l'air, ce qui entraîne la transpiration (et permet de réduire la température de la feuille). En réduisant la vitesse du vent, cela conduit à l'augmentation de la température de la feuille et donc mécaniquement à l'augmentation de la pression de vapeur interne et la transpiration. Ces mécanismes sont aussi synthétisés dans Cleugh (1998), avec quelques résultats de mesures d'évapotranspiration en fonction de la distance à la haie réalisées dans les années 1970-80. Ces modifications microclimatiques contribuent à modifier les rendements des cultures dans la zone abritée et la zone de turbulence, en comparaison d'un témoin sans haie brise vent.

Rendement en fonction de la distance à la haie

Dans Nuberg (1998), une revue d'articles portant sur les effets des haies sur les cultures a été réalisées (publications de 1986 à 1996). Il reprend le travail de Kort, dont des résultats d'études montrant des réductions d'érosion du sol et un accroissement des rendements de blé d'hiver et orge de printemps sur une période de 25 ans, avec un tallage et une formation des grains améliorés pour l'orge, résultant dans un accroissement du rendement de 290 kg/ha en comparaison de champs non protégés. En Ukraine, une étude montre que le rendement de plusieurs grandes cultures (blé d'hiver, tournesol et maïs d'ensilage) est augmenté de 12 à 38% sur une année à tempête de sable en comparaison d'un témoin sans arbre, et de 11 à 24% sur une période de 3 ans. Ces effets sont également relevés en Australie avec des haies d'Eucalyptus, principalement expliqué par la réduction de l'érosion éolienne.

En République Tchèque, une étude de Bulir (1992, cité par Nuberg 1998) montre un accroissement du rendement de blé d'hiver jusqu'à 20H (soit 300m) d'une haie de peupliers et d'érables, avec un accroissement de 3.8% du poids de mille grains, en comparaison d'une parcelle témoin. Cela pourrait être lié à davantage d'humidité du sol dans la zone protégée durant le remplissage des grains.

Ces exemples sont largement dépendants du contexte pédoclimatique et de l'année climatique. Par exemple, en considérant que la haie crée une augmentation de la température dans la zone abritée, cela peut conduire à des effets positifs en condition plus fraîche que la normale de saison, ou à des effets négatifs par accélération du développement de la plante et diminution de la période de photosynthèse. Ceci peut contribuer à expliquer de meilleurs résultats avec le blé d'hiver que le blé tendre (culture de printemps).

Une modélisation de Van Vooren et al. (2017) sur l'effet des services écosystémiques de la haie en contexte tempéré, réalisée à partir de 11 jeux de données de rendements en fonction de la distance et la hauteur de la haie montre des résultats similaires aux synthèses de 1998. Les auteurs montrent une réduction systématique d'environ 20% à proximité immédiate (entre 0 et 2.1 Distance/Hauteur) de la haie puis une restauration du rendement lorsque la distance à la haie augmente, de 103% à 2.5H et 109 % à 5H. Sur une distance de 20H, le rendement est de 103%, sans compter la perte de surface liée à la haie. Trois des études avec des distances maximales à la haie inférieures à 2H montrent des résultats strictement négatifs sur le rendement.

Récemment, dans une étude de Osorio et al (2019), les auteurs ont réalisé une analyse des données de rendements géolocalisés pour deux cultures, soja et blé d'hiver, issues de capteurs de rendements embarqués. Ils ont comparé la zone a priori protégée (20H) et la zone a priori non protégée (>30H) du champ, principalement sur des parcelles avec des haies en bon état du Kansas et Nebraska, en climat tempéré continental. Grâce à la collaboration de 9 agriculteurs, ils ont analysé les données de 264 moissons de soja et blé d'hiver en fonction de la distance à la haie, (caractérisée par sa composition spécifique, densité optique, hauteur, longueur, largeur, uniformité, continuité et orientation) pour des champs en AC présentant des longueurs de 80 H.

Les résultats montrent que sur 60 % des moissons étudiées, une différence significative de rendement existe entre zone a priori abritée et zone non abritée. Dans 38 sur 60 moissons on constate une hausse de rendement et dans 22 sur 60 une baisse du rendement. Il y a probablement un effet site très fort du fait de la situation climatique et de compétitions racinaires qui peuvent être exacerbées en cas de plus faibles pluviométrie (négatif au sud, plus positif au nord).

Pour le blé les gains sont de 10% de rendement dans 30% des cas, et de 16% dans 46% des cas pour le soja.

Les auteurs soulignent l'importance de la localisation au nord de la haie pour améliorer les rendements comparativement aux haies situées au sud.

Table 1 Significant differences (frequency %) by crop for both yield increase and decreases due to windbreak effect, number of significantly different crop field/years and the number of crop field/years analyzed

Crop	Yield increase (%)	Yield decrease (%)	Significantly different crop field/years	Total of crop field/years analyzed	Field avg. size increase (ha)	Field avg. size decrease (ha)
Soybeans	46	23	38	57	28.7	25.3
Wheat	30	20	22	44	28.7	27.5
Total			60	101		

Field average size (hectares) for yield increase and decrease is shown for each crop, respectively

Développement, qualité et rendement du blé tendre et du blé dur

Cette étude porte principalement sur le blé tendre et le blé dur, qui possèdent des comportements similaires dans la construction de leur rendement.

Le rendement est le produit de la densité de plants par unité de surface, du nombre de talles par plants, du nombre d'épis par talle, du nombre d'épillets et de grains par épis, et du remplissage de ces derniers, traduit par le Poids de Mille Grains. L'ensemble de ces phases de développement sont directement liés aux facteurs pédoclimatiques.

Par exemple, les gelées peuvent détruire les plants durant l'hiver, entraîner des nécroses foliaires, geler les épis et causer le blanchissement des épis en phase de montaison. Des températures proche de 0 peuvent également engendrer des déficits de fécondation des épis (Beauvais et al., 2019).

Les températures cumulées en degré jours déterminent la vitesse à laquelle le blé se développe. Ainsi, des températures moyennes plus élevées peuvent conduire à un raccourcissement du cycle végétatif, et une moindre accumulation de carbohydrates permettant le remplissage ultérieur des grains (Bellia, 2003). Des températures élevées peuvent aussi limiter l'activité photosynthétique au profit de la transpiration, et les mécanismes de remplissage du grain, en lien avec la ressource en eau disponible.

Ainsi, l'ensemble des modifications microclimatiques causées par la haie sont susceptibles d'affecter le développement, le rendement et la qualité du blé. L'observation de certaines variables physiologiques peut ainsi renseigner sur les phénomènes climatiques subits par la céréale.

Télédétection et estimation des rendements

De nombreuses études ces dernières années sont parues sur l'utilisation des photographies aériennes, satellites, pour évaluer de nombreux paramètres ou traits physiologiques et agronomiques des cultures : biomasse, assimilation d'azote, rendement potentiel, etc. Ces technologies et méthodes d'analyses pourraient être utiles pour approcher l'effet brise vent des haies à des échelles parcellaires.

En fonction des technologies employées, de nombreuses variables peuvent être acquises à l'échelle parcellaires et d'un territoire plus vaste. Ainsi de nombreux auteurs ont cherché à établir des relations entre différentes variables issues de télédétection et rendement d'une culture donnée, la plupart du temps établi par des mesures *in situ*. (Toscano et al., 2019) ont travaillé sur la modélisation du rendement en blé d'hiver en Italie d'après des images satellitaires, couplé à des échantillonnage terrain sur une parcelle de 5 ha et les résultats de moisson issus d'un prestataire. Les relations entre NDVI au mois de mars-avril et rendements obtenus sont tantôt positives, tantôt négatives, selon l'année climatique, mais généralement assez corrélées ($r^2 > 0.5$). Les auteurs soulignent cependant la nécessité de calibrer ce genre d'approches pour chaque territoire donné. La présence de nuage à cette période limite aussi la possibilité d'obtenir des images de qualité, de même que la présence d'adventices.

Une étude similaire dans l'approche sur le maïs mais utilisant des capteurs manuels déplacés à la hauteur des cultures (Freeman et al., 2007) montre qu'une analyse du NDVI couplée à une mesure de la hauteur sur trois années permet une prédiction similaire du rendement ($r^2 > 0.64$) dans des conditions de cultures cependant bien maîtrisées (même semences et itinéraires techniques). L'utilisation de drone est également possible pour répondre à ce type de problématique (Duan et al., 2017), avec une palette très large de capteurs pouvant être mobilisés. Les traitements d'images issues de drones sont cependant plus complexes et moins adaptés pour des études à large échelle en comparaison des satellites.

Deux études récentes (Hunt et al., 2019; Segarra et al., 2022) ont réalisé des modélisations du rendement en céréales à partir de la corrélation entre rendement et indices de végétation, à l'échelle parcellaire et territoriale, en s'appuyant sur des données issues de cartes de rendements et d'images Sentinel-2 prises à différents stades clés du développement des cultures. Ces deux études montrent qu'il est possible d'approcher des variations intra parcellaires de rendement via les indices de végétation (LAI, NDVI) à partir d'un jeu de données de rendement servant de calibration. Les données issues des cartes de rendements sont cependant susceptibles d'être biaisées par plusieurs facteurs, et doivent être préanalysées et filtrées en amont de leurs utilisation finale (Leroux et al., 2019).

1.3 — Objectifs

L'objectif de la sous-action 2.3 est de construire un protocole pour apprécier l'effet microclimatique spécifique à la haie sur la productivité agricole, notamment en termes d'impact vis à vis de la protection du vent. Ce protocole réalisé à partir des outils d'imagerie aérienne sera ensuite mis à disposition des partenaires, afin de créer un observatoire futur de l'effet de la haie sur la production agricole adjacente à partir d'un réseau de parcelles expérimentales.

PARTIE 2 — METHODOLOGIE ET REALISATIONS

2.1 – Méthodologie

1 – Mesures in situ de parcelles

Les sites d'études

Plusieurs parcelles ont été repérées puis visitées du 26 au 28 avril 2021 dans la Loire, puis en mars 2022 dans la Drôme. La recherche visait à identifier des haies de 5m de hauteur minimum, continues, avec le linéaire le plus important possible, perpendiculaires au vent dominant, adjacentes à des cultures de blé tendre. La présence d'une zone témoin en dehors de l'influence protectrice de la haie était également recherchée, soit au-delà de 20 fois la hauteur de la haie, soit dans une parcelle adjacente conduite de manière similaire. 27 parcelles ont en tout été identifiées et visitées, avec l'appui de l'AFACH Pays de la Loire en 2021, et la Chambre d'Agriculture de la Drôme en 2022.

Deux sites d'expérimentation principaux ont été retenus :

- **Segré en Anjou bleu, Pays de la Loire**

Le premier site est situé en Maine et Loire, proche de la commune de la Segré en Anjou bleu. Il s'agit d'une parcelle de 40 ha, comportant plusieurs haies anciennes gérées au lamier. En 2021, elle était cultivée en blé tendre conventionnel. 4 variétés y ont été semées (ABSALON, FRUCTIDOR, ADVISOR et CESARIO) en octobre 2020 en semi-direct. La parcelle a été désherbée chimiquement, et a été moissonnée le 22 juillet.

Le sol de cette parcelle est limono-argileux, profond, avec une faible charge caillouteuse. La pente est quasiment nulle.

La haie étudiée est située dans un alignement sud-ouest nord-est et traverse la parcelle étudiée permettant ainsi d'étudier son influence de part et d'autre et ainsi de disposer de sous-parcelles d'étude. La strate haute de la haie est principalement composée de chênes pubescents pouvant atteindre en moyenne 12m. La strate basse et intermédiaire est composée d'alisiers, saules, genêts, pruneliers, merisiers, lierre, aubépines, érables champêtres, noisetiers.

Caractérisation des vents

Les vents de la région sont globalement assez fluctuants, avec une dominance sud-ouest (figure 1), et des épisodes de vents d'ouest, d'est et du Nord. Plusieurs sources de données ont été utilisées pour caractériser les vents dominants de la parcelle d'étude de la Loire (direction et vitesse du vent) :

- Données en libre accès Météo France pour les années 2016-2016-2018 pour les stations les plus proches.

- Données de 2020 - 2021 fournies par l'université de Caen (Olivier Cantat) dans le cadre de son partenariat avec météo France pour une station voisine de Segré en Anjou bleu.

Segré FXY

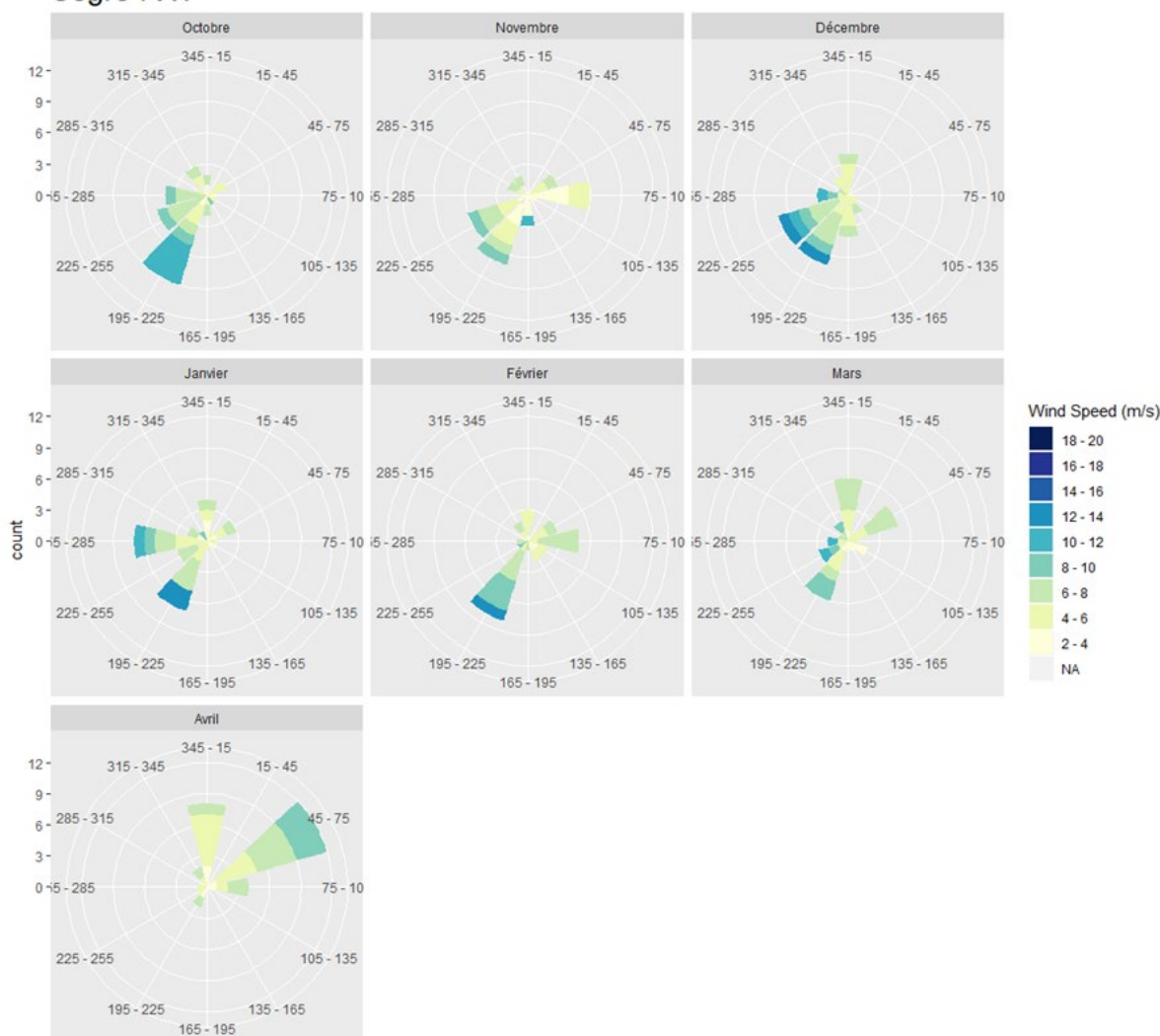


Figure 1. Vitesse et direction des vents moyens par direction et par mois pour le site du Maine et Loire.

• Montélier, Drôme

Le second site est situé dans la Drôme, sur la commune de Montélier. Il s'agit d'une parcelle de 8 ha, cultivée en 2022 en blé dur suivant un mode conventionnel. Elle possède une haie située au nord, composée de troène de chine en strate haute, noyer commun et d'une strate buissonnante composées de cornouillers sanguins, aubépines, lierre. Elle mesure en moyenne 8.2 m de haut.

Le blé de variété ANVERGUR a été semé (semis direct) en septembre 2021, à raison de 220 kg en espacement 16.5 cm. La parcelle a été désherbée chimiquement, et irriguée au canon asperseur à 4 dates entre avril et mai. Les apports d'azote ont été réalisés sans optimisation. La moisson a lieu le 22 juin 2022. La parcelle est plate, avec un sol limoneux argileux à charge caillouteuse faible à moyenne.

Caractérisation des vents

Le vent n'a pas pu être étudié pour la parcelle, faute d'équipement ou d'accès à des données payantes. Les données de vent de la station la plus proche, à Montélimar (26) a été récupérée via la base SYNOPS de Météo France pour l'année 2022 (figure 2). Elle est située à environ 50 km du site d'étude plus au sud. Les vents y sont très légèrement plus faibles mais semblent très corrélés à ceux de Valence.

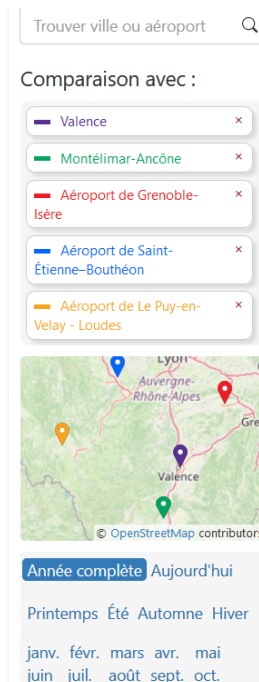
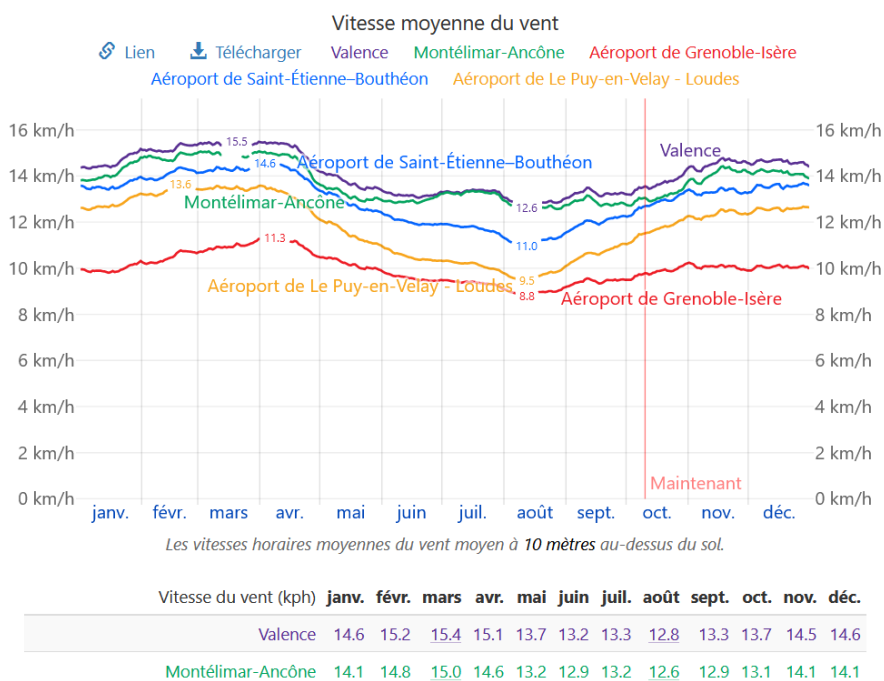


Figure 2. Source <https://fr.weatherspark.com/compare/y/50276~147977~148013~147980~147960/Comparaison-de-la-m%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Valence-Mont%C3%A9limar-Anc%C3%B4ne-A%C3%A9roport-de-Grenoble-Is%C3%A8re-A%C3%A9roport-de-Saint-%C3%89tienne-E2%80%93Bouth%C>

Le vent est caractérisé par une très forte domination du vent du Nord / Nord-Ouest, avec quasi-absence des vents d'ouest, est et sud.

Montélimar FFM

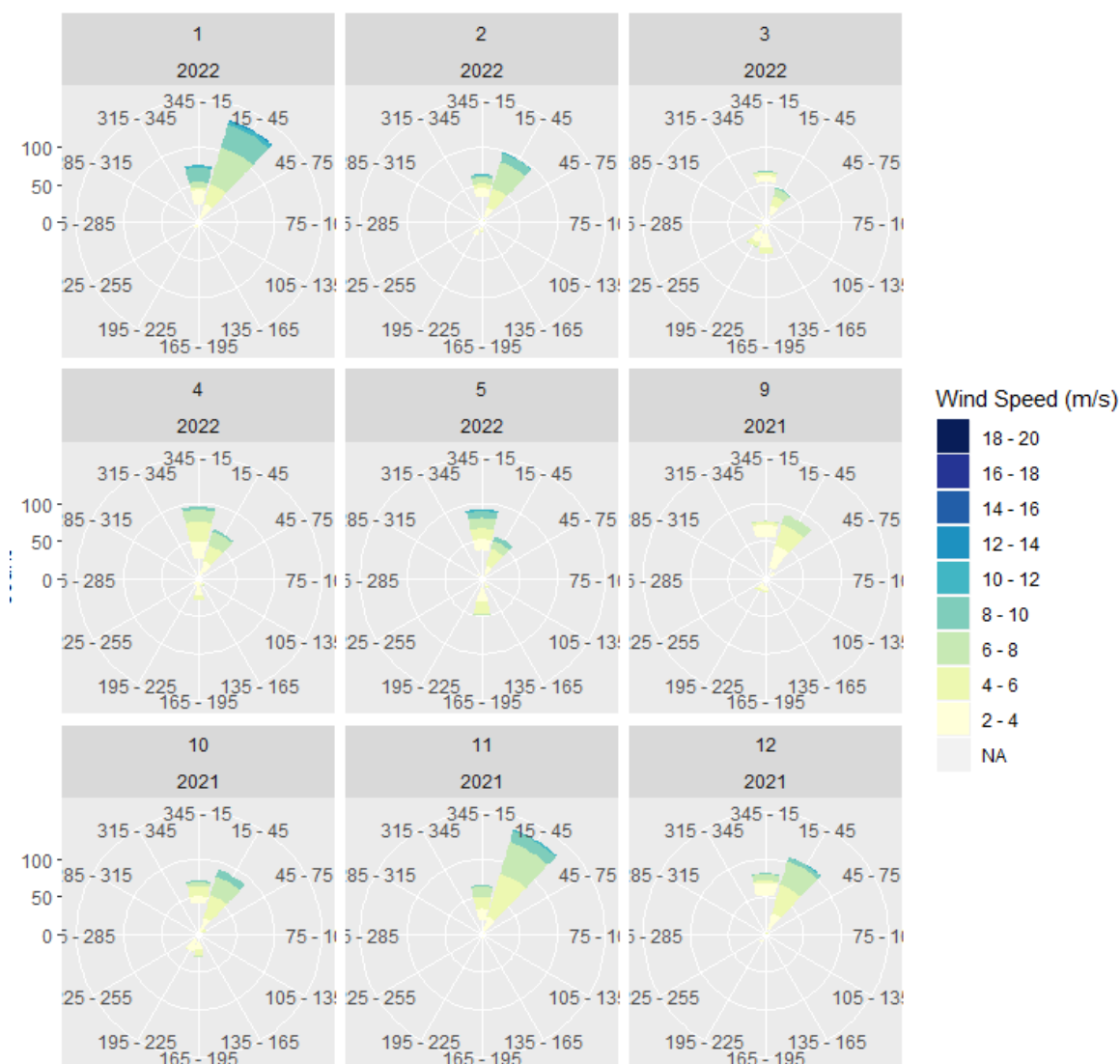


Figure 3. Vitesse moyenne du vent par direction et par mois en 2021 à Montélimar.

Caractérisation de la porosité optique des haies

La porosité optique des haies des deux sites principaux a été estimée à travers l'analyse de photographies de la haies prises en juillet.

Pour chacune des haies, les photographies ont été prises à 5 points différents de la haie, espacés d'au moins 12m et correspondant au point de départ des différents transects. En chaque point trois photographies ont été prises à une distance permettant de capturer l'ensemble de la hauteur de la haie (environ 20m), à l'appareil photo reflex (PENTAX K-30, objectif 18 mm, 16 M pixels).

Les photographies ont ensuite été prétraitées sous Lightroom, puis traitées avec le logiciel CAN-EYE (©INRAE-UMT CAPTE).

Suivis in situ du blé

La croissance, le développement et le rendement/qualité du blé ont été suivis à différentes distances des haies (5 distances potentiellement sous influence + une distance témoin), avec 5 répétitions par distance, résultant en 30 points par parcelle par direction de vent étudié :

- Pour la parcelle de Segré, il a été choisi d'étudier après caractérisation des vents dominants sur la période de culture, deux sous-parcelles protégées des vents du nord-est (zone E) et des vents du sud ouest (zone S). Les épisodes de vents d'est ont notamment la réputation d'être séchant et

dommageables aux cultures. Une analyse des données météo non publiées ici montre que l'épisode de vent du nord-est du mois d'avril est corrélé à une humidité relative inférieure aux autres mois, ainsi qu'à une absence globale de précipitation.

- Sur chacune de ces sous-parcelles, 5 distances à la haie ont été échantillonnées fonction de la hauteur de la haie ($H=12m$) : 1H, 2H, 6H, 10H, 20H, ainsi qu'un témoin situé en dehors de la zone potentielle d'effet brise vent pour chaque zone (au-delà de 25H).
- Concernant la parcelle de Montéliér, protégée par la haie des vents du Nord, il a été choisi d'échantillonner le blé à 5 distances de 1H, 2H, 6H, 10H, 15H, ainsi qu'en zone témoin située à 27H.
- Chaque placette a été géolocalisée au GPS avec une précision de 3m.

Le développement du blé a été caractérisé *in situ* à deux périodes :

- Avril : Stade Epiaison / Floraison

Mesures de la hauteur maximale sur 10 plants, stade phénologique moyen, densité, MS de 5 plants par placette, état phytosanitaire moyen, LAI au moyen de 8 photos hémisphériques par placette suivies d'analyse sous CANEYE.

- Juin / Juillet : Maturité (Moisson)

Mesures de la hauteur sur 10 plants.

Prélèvements sur 2 m linéaire (2 fois 1 m linéaire contigus) : nombre de plants, nombre d'épis total, poids de mille grains, poids frais de la paille, poids frais du grain, teneur en humidité de la paille et du grain, teneur en protéines et poids spécifique du grain.

Le battage et mesures du PMG, poids frais et poids sec du grain ont été réalisées aux stations d'ARVALIS Nîmes en 2021 et d'Etoile sur Rhône en 2022. Le taux de protéine et poids spécifique du grain a été mesuré par machine de spectrophotométrie (FOSS Infratec) à la station ARVALIS de Gréoux les bains.

Mesures microclimatiques

Le microclimat a été caractérisé grâce à des enregistreurs de températures et d'humidité relative de l'air placés à 1m20 sous des abris météorologiques. Des abris commerciaux utilisés en 2021 ont montré un échauffement très important en journée et les données de cette année n'ont donc pas été analysées.

Sur le site à Montéliér, les enregistreurs ont été disposés à 1H, 6H et témoin avec 3 répétitions par distance, espacés d'environ 25m. L'enregistrement des données a été réalisé de mars à juin 2022, toutes les 10 minutes.

Photographies aériennes

Les photographies satellites issues de Sentinel-2 ont été sélectionnées pour les dates de floraison et en absence de couverture nuageuse sur la plateforme PEPS, et analysées après correction atmosphérique. Elles ont été choisies autour de la date de floraison (à plus ou moins 15 jours) et en absence de nuage au-dessus des zones d'études en 2021.

En 2022, une analyse sur la période de mars à juin a été réalisée afin d'identifier la période où le NDVI serait le plus corrélé aux rendements mesurés.

Analyses statistiques

L'ensemble des analyses statistiques ont été réalisées avec les logiciels R et RStudio.

Cultures

Les données de croissance et rendement du blé ont été analysées sous R, par ANOVA en condition d'homoscédasticité des variances et normalité des résidus, suivis de test posthoc de Tukey, au moyen du package « emmeans » sous R (v3.6.0).

En absence de ces conditions, des tests non paramétriques de Kruskal-Wallis et Dunnett ont été utilisés.

Indice de végétation

Le NDVI a été calculé selon la formule $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$ sous R pour les images multibandes, ou directement téléchargé depuis la plateforme PEPS pour la zone d'étude.

La corrélation entre rendement en fonction du NDVI a ensuite été examinée graphiquement sous R au moyen de graphique de régression locale (Package ggplot2).

2 - Analyse des cartes de rendements

En complément des deux sites principaux d'expérimentation, 3 cartes de rendements sur 2 parcelles ont été fournies dans le secteur de la parcelle d'étude de la Loire, par les ETS Coulon en secteur sud Mayenne. Ces parcelles sont caractérisées par un sol limoneux profond (> 75 cm). La parcelle FE n'a pas été retenue pour la partie in situ en raison d'une configuration trop étroite en est-ouest. La parcelle NS présente une pente positive de l'ouest vers l'est, dans la zone de protection de la haie ouest et n'a pas été retenue pour cette raison dans l'étude in situ. Ce sont deux parcelles à fort potentiel (AFACH PdL, Com.Pers.).

Les haies de ces parcelles ont été sommairement caractérisées lors de la journée de prospection de 2021, aucune mesure *in situ* de blé, de microclimat ou de porosité optique des haies n'ont été réalisées.

Les données ont été acquises au moyen d'une moissonneuse équipée d'un capteur de rendement avec géolocalisation. Les variables fournies analysées sont le rendement instantané en grain, l'humidité du grain et la position de la mesure. En complément, une carte d'épandage d'azote a été fournie par le prestataire agricole pour la parcelle FE.

Tableau 1. Descriptif des jeux de données analysés

Nom de la parcelle	Année de moisson	Culture
NS	2019	Blé tendre
NS	2020	Maïs
FE	2019	Blé tendre

Les données de rendements ont été filtrées avant analyse au moyen du package CleanRField (Matcham et al., 2022) sous R, afin de supprimer les valeurs aberrantes du jeu de données.

Le rendement a ensuite été interpolé sur une grille de point régulière à partir de la fonction « idw » du package gstat sous R, permettant de donner une valeur à chaque point, calculés en fonction des valeurs adjacentes pondérées par leurs distances relatives.

Afin de comparer les rendements en fonction de la distance aux haies, une grille d'échantillonnage (figure 4) a été construite pour chaque parcelle sous QGIS. La valeur moyenne de rendement a ensuite pu être moyennée par quadrat sous R et modélisée en fonction de la distance du quadrat à la haie, calculé avec la fonction Distance du package « Sp » sous R.

Comme aucune donnée microclimatique concernant les vents n'a pu être obtenue pour ces moissons, ces échantillonnages ne prennent pas en compte un éventuel effet brise vent.

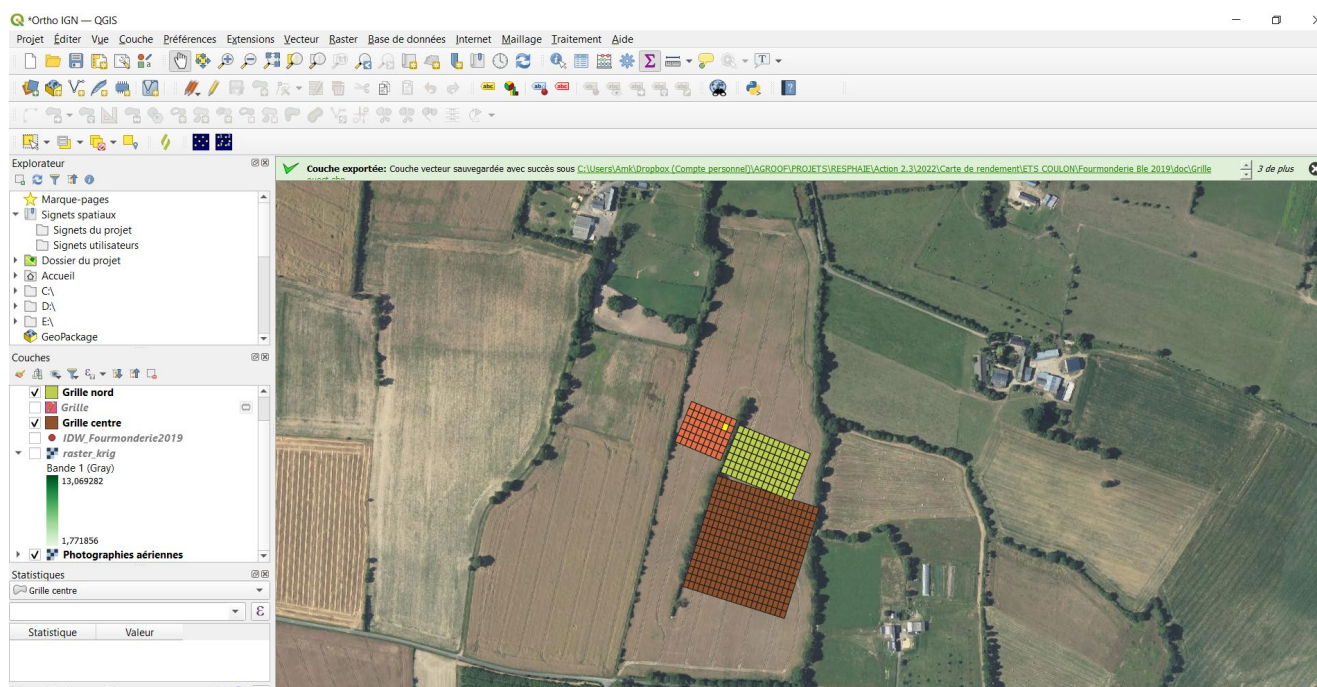


Figure 4. Définition des grilles d'échantillonnage : orange = bloc Ouest; Jaune = bloc nord; Marron = bloc centre

2.2 – Déroulé du projet

2.2.1 – Organisation mise en place

Pour répondre à l'objectif fixé, plusieurs moyens ont été mobilisés :

- Etat de l'art des effets brises vents et effets connus sur les grandes cultures en contextes tempéré, en mobilisant les ressources scientifiques classiques (Science Direct, Google Scholar).
- Entretien avec des chercheurs sur les méthodologies possiblement exploitables
- Tests des méthodologies sur deux parcelles en grandes cultures

La sous action a bénéficié de plusieurs appuis externes au projet matériel et humain, notamment pour le traitement des échantillons de blés dans les laboratoires d'ARVALIS Gréoux les bains et d'Etoiles sur Rhône.

Tâches	Personnels	Moyens matériels
Etat de l'art 2019	Ambroise Martin-Chave	Google Scholar
Entretiens 2020	Ambroise Martin-Chave Fabien Liagre	Entretiens libres
Etude terrain Pays de la Loire 2021	Ambroise Martin-Chave Camille Béral Lilia Benzerara (Stagiaire MFE)	Sondes températures et humidité Données MétéoFrance Analyses composantes du rendement avec appui ARVALIS Achat de cartes de rendements aux ETS Coulon.
Etude terrain Drôme 2022	Ambroise Martin-Chave Camille Béral	Sondes températures et humidité Analyses composantes du rendement avec appui ARVALIS
Traitement des résultats 2021 2022	Ambroise Martin-Chave Camille Béral	R Studio, QGIS

2.2.2 – Étapes

Le calendrier ci-dessous présente un récapitulatif du travail engagé dans le cadre du projet :

2019	2020	2021	2022
Entretiens UMT CAPTE Avion Jaune Phytodrone	Entretiens AFACH Pays de la Loire Samuel Corgne ARVALIS	Entretiens Olivier Cantat	Etude de terrain Drôme

Etat de l'art		Etude de terrain Pays de la Loire	Analyses statistiques Rédaction
		Analyse Cartes de rendement	

PARTIE 3 – RESULTATS

3.1 – Résultats

Résultats

Segré en Anjou Bleu 2021

Porosité de la haie

La porosité de la haie est estimée en moyenne à 35% ($\pm 0,03$).

Développement du blé

La hauteur moyenne maximale du blé est significativement différente en fonction de la distance à la haie (ANOVA, $p < 0.05$), dans les zones E et S (Figure 6).

En zone E, le blé est significativement plus haut à maturité à 6H (104 cm) en comparaison des autres modalités, et à 2H (99 cm) en comparaison de 1H (95 cm) et du témoin (94 cm). En zone S, il existe un gradient de diminution de la hauteur de 2H (96 cm) au témoin (84 cm). L'analyse du stade de développement à floraison montre que le blé est moins développé à 1H et 2H dans les deux zones (début de floraison) en comparaison de 10H et 20H (fin de floraison), avec des situations intermédiaires à 6H et en témoin en zone E (Figure 5). En zone S, on observe un gradient de maturité depuis 1H jusqu'au témoin (fin de floraison).

Qualité et quantité

Les rendements maximums (Figure 7 gauche) sont observés à 6H et témoin (79 qtx/ha) en zone E et à 6H (70 qtx/ha) et 10H (68 qtx/ha) en zone S. Le taux de protéines (figure 7 droite) est significativement plus élevé en zone E à 2H (14.2%) que dans toutes les autres distances, et à 1H (12.7%) en comparaisons des autres distances (10.5-11%). En zone S, On observe un taux de protéines maximal à 2H (12.7%), inférieur à 1H (11.5%), intermédiaire à 6H (10.8%) et inférieur à 10% à 10H et en témoin.

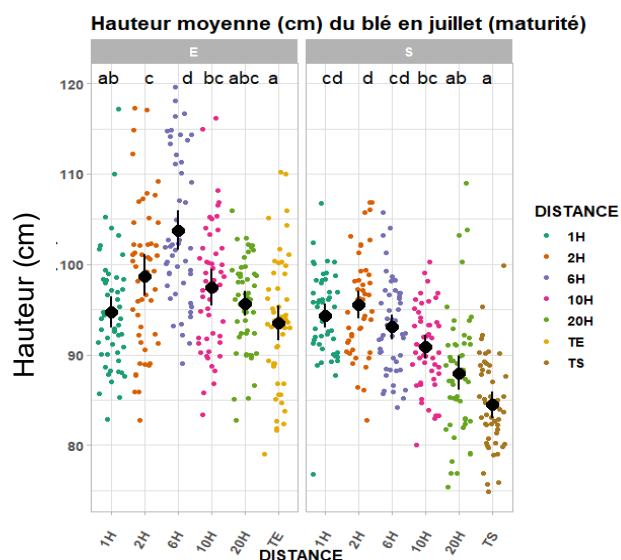


Figure 6. Hauteur moyenne du blé à Segré dans les zones E et S

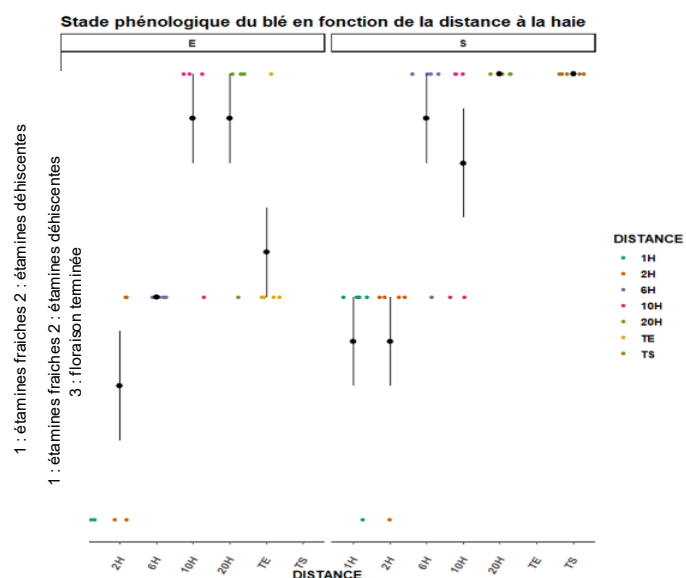


Figure 5. Stade phénologique du blé à Segré dans les zones E et S

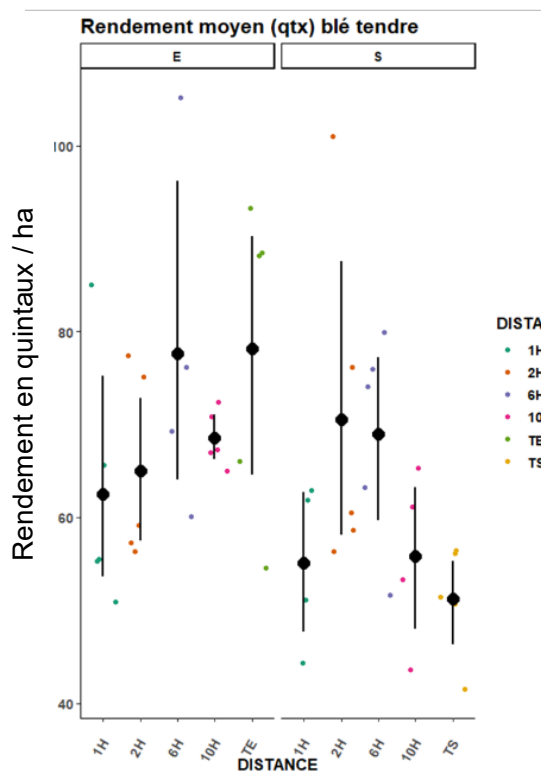
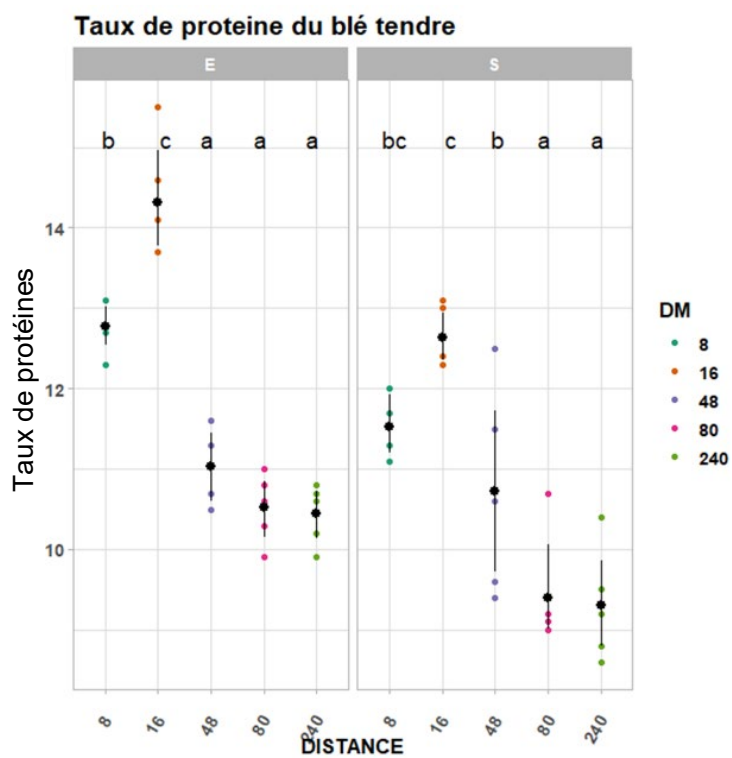


Figure 7. Rendement moyen et taux de protéines dans les zones E et S à Segré



Caractérisation de la haie

La porosité optique estimée de la haie est de 31% (± 1) sur les transects étudiés.

Microclimat

Sur l'ensemble de la période de mesure, la présence de la haie modifie les températures et d'humidité relative de l'air. La température moyenne de l'air est supérieure à 1H avec 0,5 °C de plus que dans les modalités 6H et témoin (Tableau 2). Dans le détail, ce sont surtout les températures maximales moyennes qui semblent être impactées avec 2,7 °C de plus à 1H qu'en témoin. 6H ne montre pas de fortes différences de températures en comparaison du témoin.

Tableau 2– Températures moyennes journalières, températures minimales moyennes et températures maximales moyennes dans les différentes distances à la haie à savoir 1H, 6H (H étant la hauteur de la haie) et témoin (en dehors de l'influence de la haie) ($\pm$ écart type)

	Températures journalières moyennes (°C)	Températures minimales moyennes (°C)	Températures maximales moyennes (°C)
1H	18,1 ($\pm 0,05$)	8,6 ($\pm 0,5$)	29,6 ($\pm 0,9$)
6H	17,6 ($\pm 0,04$)	8,6 ($\pm 0,5$)	27,1 ($\pm 0,9$)
TEMOIN	17,6 ($\pm 0,04$)	8,7 ($\pm 0,6$)	26,9 ($\pm 0,8$)

A l'échelle d'une journée moyenne sur l'ensemble de la période la figure 8 illustre une variation de température plus importante à 1H, notamment au niveau des températures diurnes largement supérieures aux températures retrouvées en 6H et Témoin (+2,4°C vers 13h). Les températures nocturnes apparaissent quant à elles supérieures en zone témoin, en comparaison de 1H ou 6H très légèrement inférieures (environ -0,5°C). A noter un réchauffement plus tardif au lever du soleil en 1H (figure 8). L'humidité relative de l'air apparaît supérieure en 1H et 6H en comparaison du témoin, sauf de 9h à 15h à 1H où l'humidité relative de l'air est inférieure aux autres modalités d'environ 1,2% (figure 8).

Par ailleurs, les différences de températures entre 1H, 6H en comparaison de la zone témoin s'accroissent en fonction de la vitesse du vent, comme le montre la figure 9.

Développement du blé

Les comparaisons des mesures de hauteur maximale moyennes du blé par distance en avril montrent des hauteurs supérieures en 1H avec en moyenne 69 cm ($\pm 3,4$), inférieures en témoin avec 58.9 cm ($\pm 4,1$), et intermédiaire en 2H, 6H, 10H (65 cm) puis 15H (figure 10). En juin, seule la modalité témoin avec une hauteur moyenne de 76,5 cm ($\pm 4,8$) est inférieure aux autres modalités dont la hauteur moyenne s'élève environ à 85 cm. En avril, la phénologie (figure 11) est également influencée significativement par la distance à la haie, le blé ayant un stade plus avancé à 1H et 2H que dans les autres modalités de distances (stade 43 et 41 contre 37)

Qualité et quantité

Le blé a été récolté le 22 juin 2022. Le rendement moyen de la parcelle selon l'agriculteur est de 60 qtx ha⁻¹. La moyenne pour l'ensemble des placettes est de 66 qtx ha⁻¹. Le rendement par distance est présenté figure 12. Les rendements les plus faibles sont observés en témoin avec 47 qtx/ha ($\pm 1,9$), et sur une des placettes proches à 1H avec 62.5 qtx/ha en moyenne). Les rendements les plus importants sont observés à 2H et 6H avec 79 et 83 qtx/ha respectivement. Une hétérogénéité longitudinale importante est

observée dans la parcelle à 10H et 15H. Le rendement le plus fort dans ces zones est corrélé à un nombre accru d'épis et une densité plus importante.

Le taux de protéines moyen est de 14.27 %. Le taux de protéines est négativement corrélé au rendement. Ainsi on retrouve les taux les plus faibles à 6H avec 12% ($\pm 1,0$), et les plus forts en témoin avec en moyenne 16.6% ($\pm 0,8$). La quantité de protéines totale (Taux de protéines X rendement) produite à l'ha est la plus importante à 2H (13% $\pm 0,9$) et la plus faible en témoin.

Une représentation extrapolée des rendements obtenus sur la parcelle est présentée figure 13.

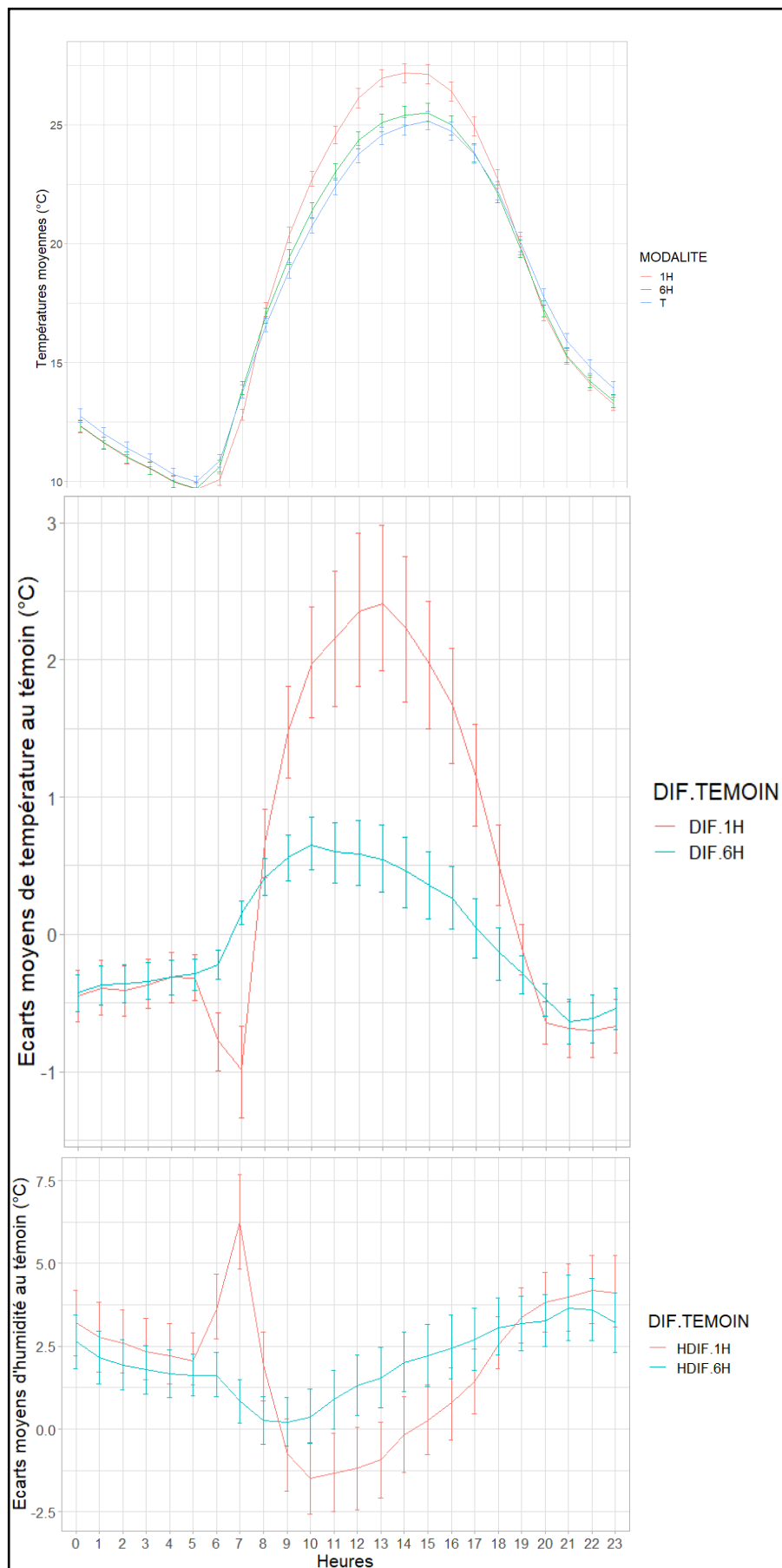


Figure 8. – Moyenne des températures horaires (a) et humidité relative (b) de mars à juin 2022 sur la parcelle située dans la Drôme, en fonction de la modalité de distance à la haie (1H, 6H) et en zone témoin, hors de l'influence de la haie.

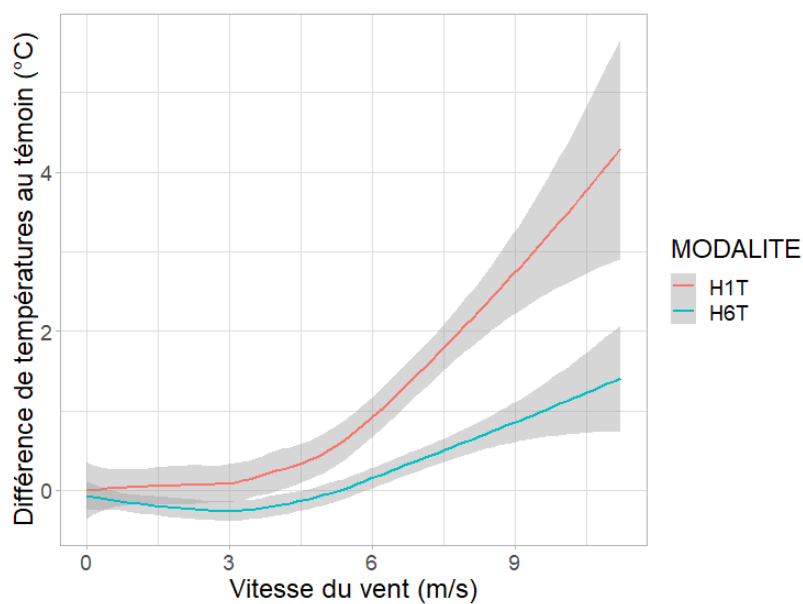


Figure 9 – Différences de températures horaires au témoin en fonction de la vitesse des vents et selon les distances à la haie (1H et 6H, H étant la hauteur de la haie).

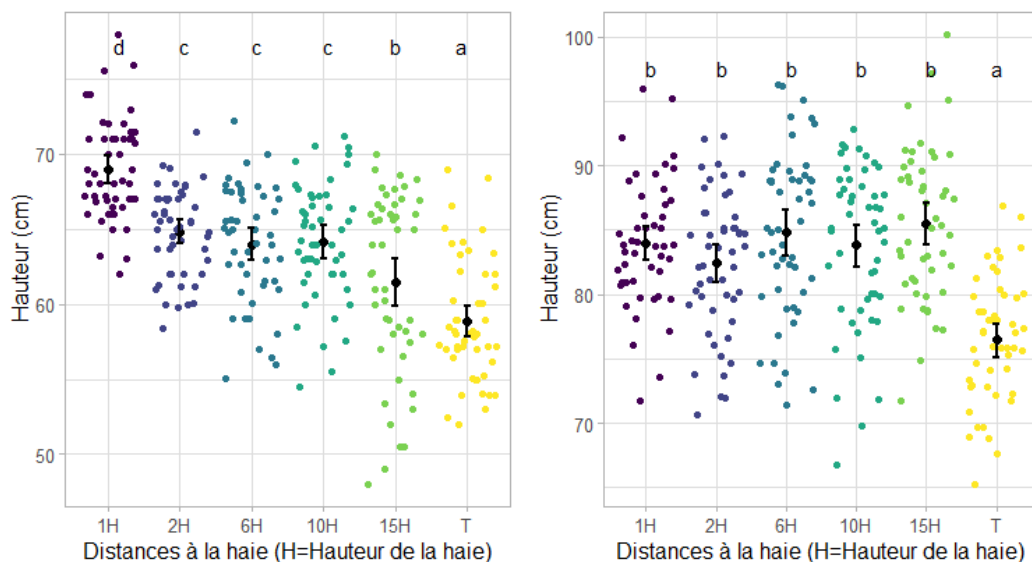


Figure 10. Hauteur du blé en avril et en juin en fonction de la distance à la haie. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les moyennes (Tukey HSD, $p < 0.05$).

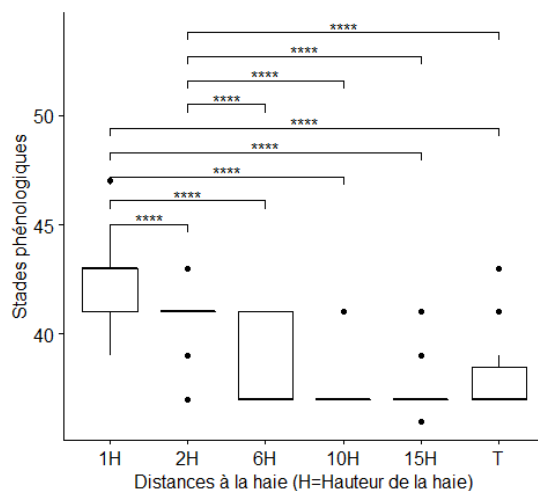
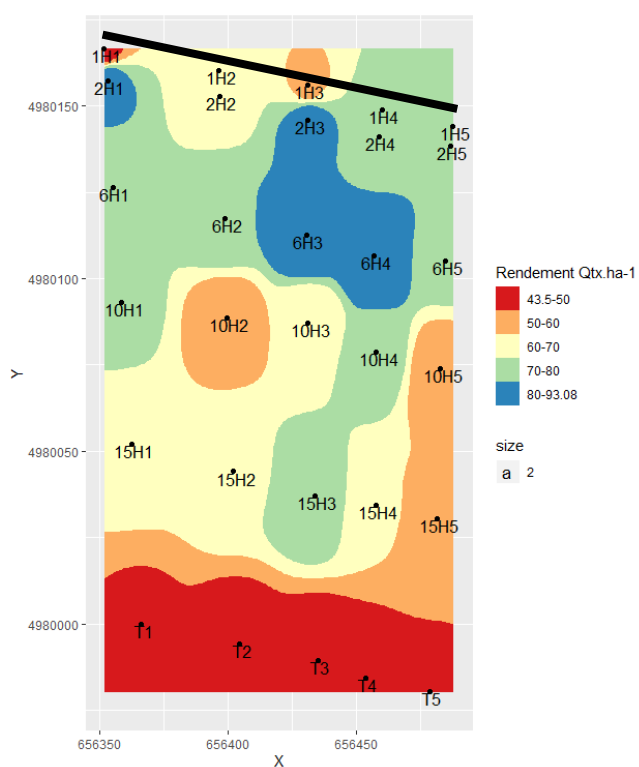
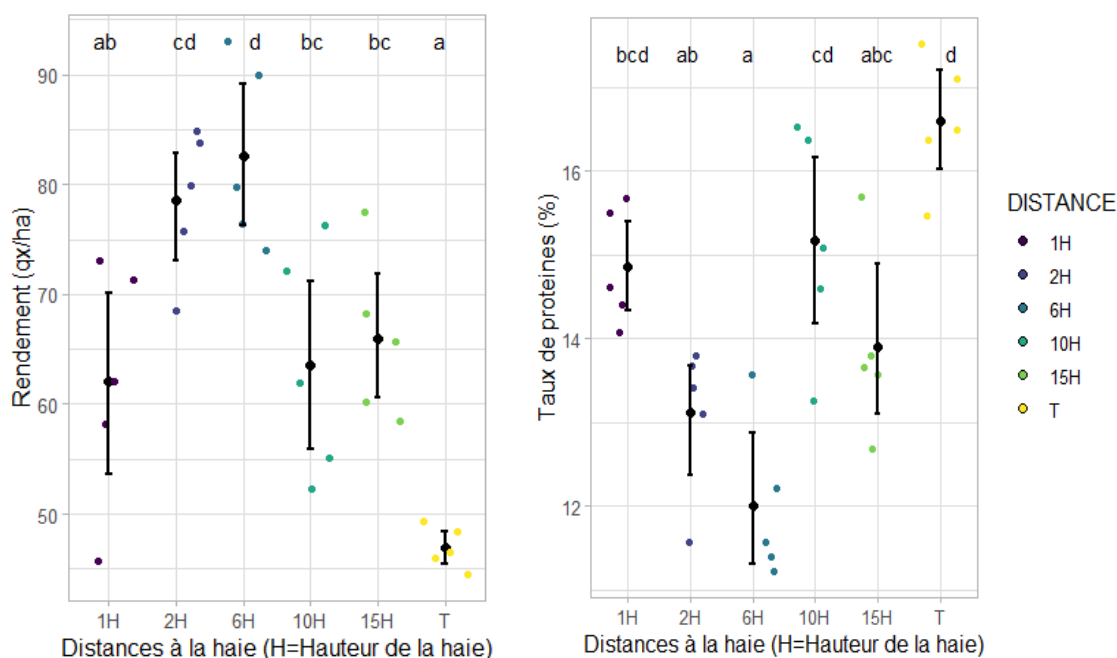


Figure 11. Phénologie du blé en avril en fonction de la distance à la haie (Test de Dunnett)



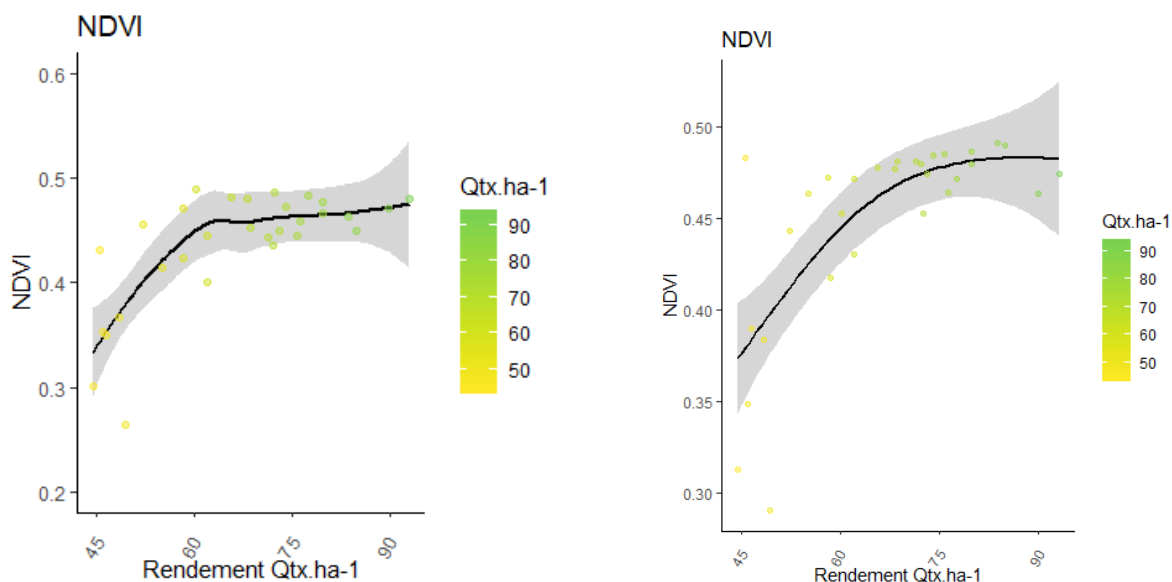


Figure 14. (Gauche) NDVI en fonction du rendement à la floraison (mai 2022).

Figure 15.(Droite) Rendement mesuré en fonction de la moyenne du NDVI par point d'échantillonnage entre le 03 mars et le 27 mai 2022, Modèle additif généralisé, p value <0.00001, variance expliquée = 78.1 %.

L'analyse de la relation entre rendement et NDVI moyen et date par date montre une corrélation significative entre les deux variables (GAM, $p < 0.00001$). Cette relation semble devenir nulle aux environs de 70 qtx/ha, l'indice arrivant à saturation (figure15).

L'analyse du NDVI des placettes en fonction de la distance à différentes dates (figure16) montre que le NDVI évolue régulièrement au cours de la saison de culture jusqu'à la moisson. Le NDVI décroît progressivement au mois de mars depuis la haie vers le témoin. En avril et mai, le NDVI est maximal jusqu'à 10H et décroît fortement ensuite jusqu'au témoin. A partir de la mi-mai, le NDVI décroît globalement, et reste maximal à 6H jusqu'à la moisson. En moyenne sur l'ensemble de la période étudiée (7 dates retenues avant moisson), le NDVI est maximum à 2H (0.48) et minimum en témoin (0.34) (figure16).

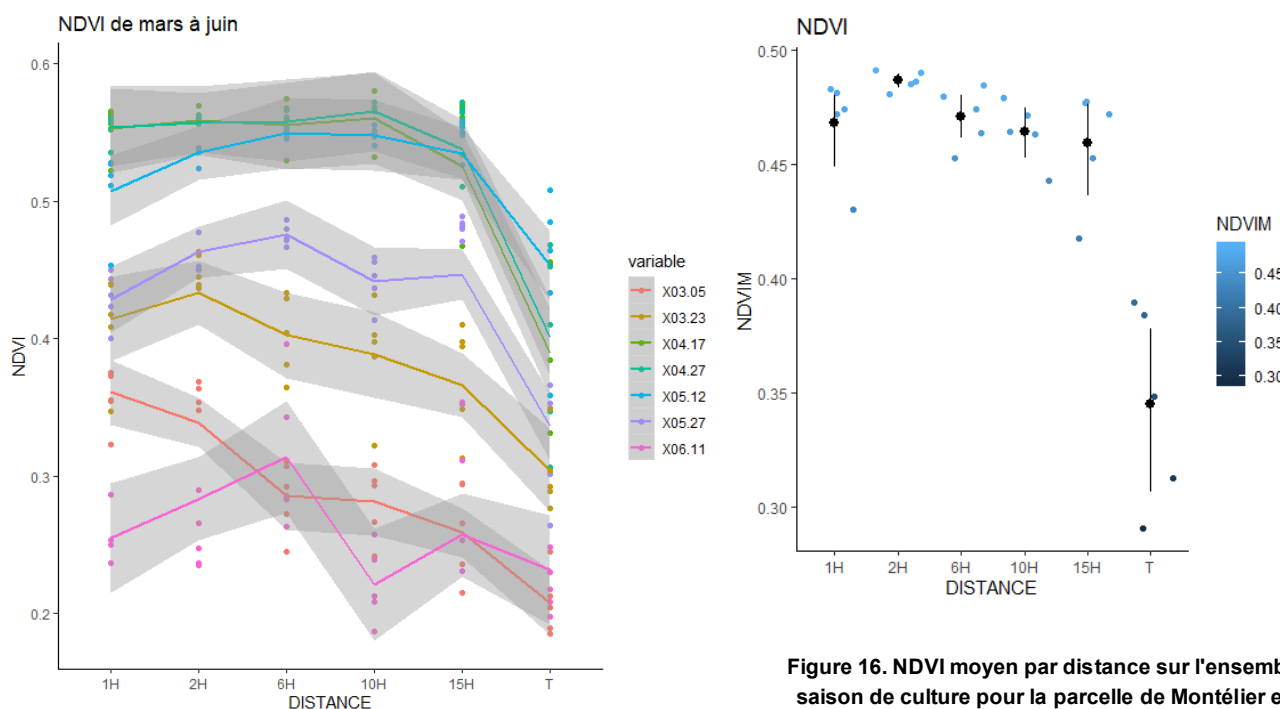


Figure 16. NDVI moyen par distance sur l'ensemble de la saison de culture pour la parcelle de Montélier en 2022

Figure 17. NDVI moyen par distance et date pour la parcelle de Montélier en 2022

Analyse des cartes de rendements

2019 – PARCELLE FE

La carte des rendements en grain de la parcelle FE est représentée figure 18. Le filtrage des données associé à un krigeage par pondération inverse des distances aux points interpolés (fonction 'idw') permet de visualiser les variations intraparcellaires. En particulier, il est possible d'observer le passage des roues dans lesquels les rendements sont inférieurs. Ces passages de roues sont notamment plus rapprochés autour de la haie. On remarque un rendement qui semble pénalisé autour de la haie centrale. Les données de rendements dans les premiers mètres à proximité des haies est et ouest ainsi que pour la partie nord étaient absente du jeu de données. L'extrapolation présentée n'est valide que pour la haie centrale, des données étant manquantes dans la partie ouest et nord de la parcelle.

3 grilles d'échantillonnages ont été définies (figure 4) puis analysées. Les figures 19, 20, 21 suivantes présentent le rendement moyen en fonction de la distance à la haie pour chaque grille (appelé ici « bloc »). La moyenne du rendement sur la parcelle mesurée est de 94,23 qtx/ha en 2019. L'analyse spatiale montre une diminution des rendements dans les 30 premiers mètres à l'est ou l'ouest de la haie, avec une baisse d'environ 15 à 20 qtx/ha aux rendements moyens maximum. La zone de rendement maximale est atteinte au cœur de parcelle, les rendements diminuant à nouveau à l'approche du bord est de la parcelle qui est aussi composé d'une haie âgée. Des rendements importants (>80 Qtx/ha) sont néanmoins constatés à 30 m de la haie centrale, ce qui correspond à environ 2.5H.

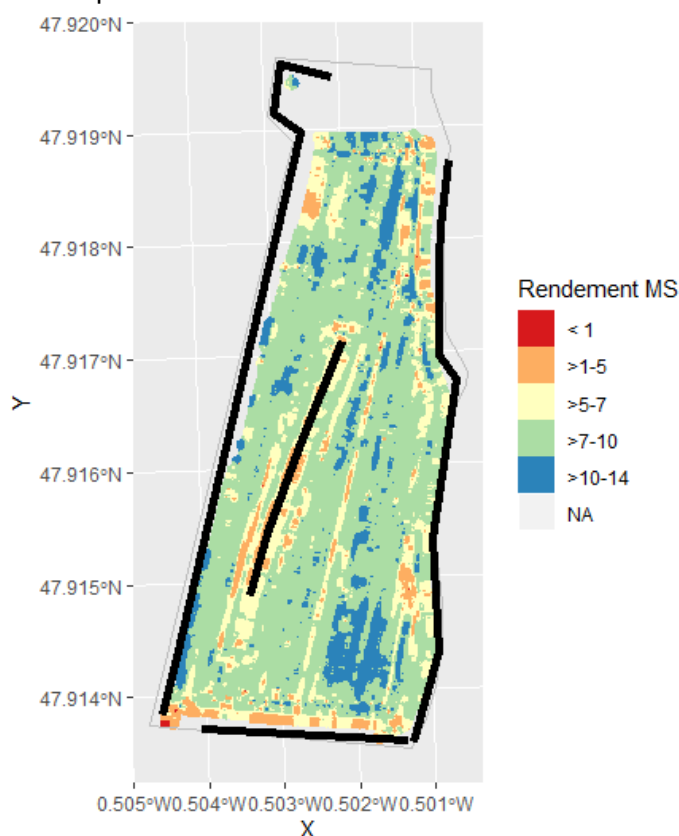


Figure 18. Carte de rendements interpolés à partir des données de rendement de blé tendre de moissonneuse batteuse sur la parcelle FE en 2019.

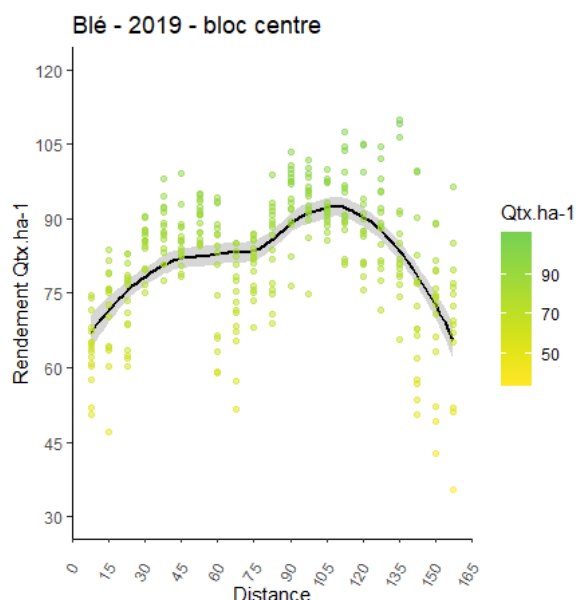


Figure 19. (Gauche) Rendement moyen (courbe noire) et écart-types (gris) en fonction de la distance depuis la haie centrale en direction de l'est

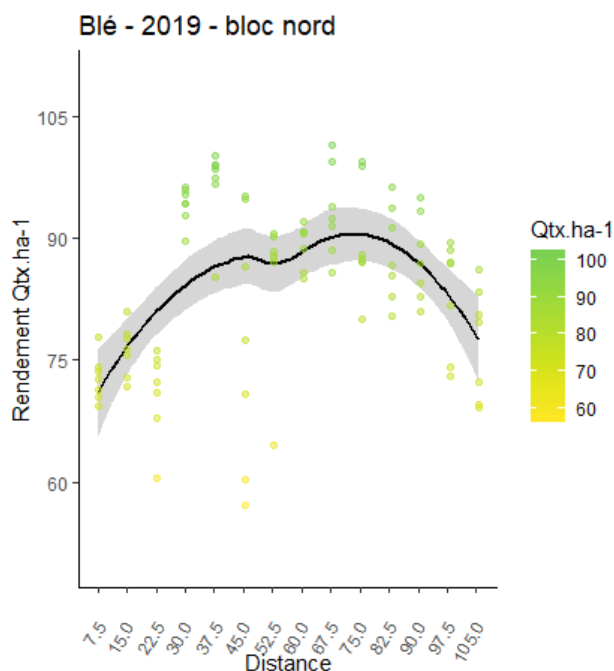


Figure 20. (Droite). Rendement moyen (courbe noire) et écart-types (gris) en fonction de la distance depuis la haie centrale en direction de l'est

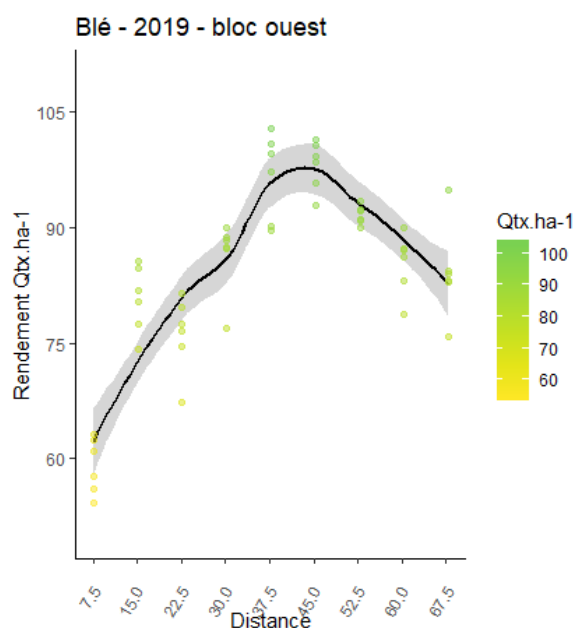


Figure 21. (Droite) Rendement moyen (courbe noire) et écart-types (gris) en fonction de la distance depuis la haie centrale en direction de l'ouest

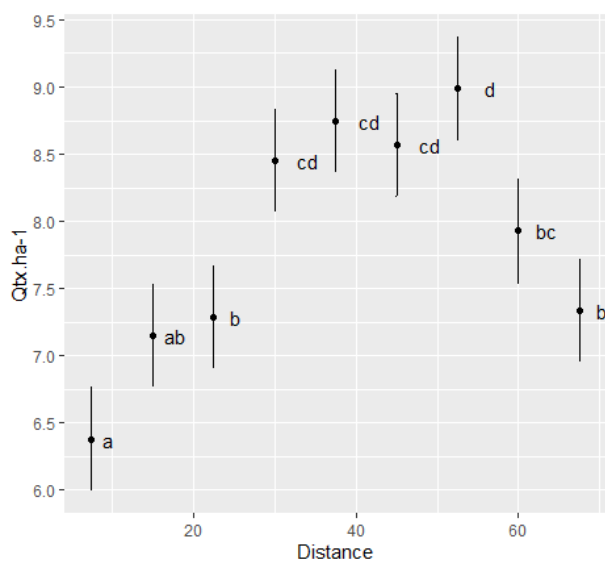


Figure 22. (Gauche) Rendement moyen en fonction de la distance à la haie pour le bloc est. Les lettres indiquent des différences significatives de moyennes (Tukey HSD, $p < 0.05$)

La comparaison des rendements moyens sur les 70 premiers mètres en 2019 sur la haie centrale au moyen d'une ANOVA (figure 22) montre un effet significatif de la distance à la haie ouest sur les rendements. Le rendement moyen sur les 7 premiers mètres depuis la haie est de 63 qtx/ha, contre 89.8 qtx/ha à 52 m et à 15 et 22.5 m, où le rendement est d'environ 72 qtx/ha.

Les graphiques 23 et 24 présentent le rapport entre rendement produit par quantité de fertilisant apportée à la floraison (azote modulé). Dans les zones centrale et ouest on retrouve la meilleure efficacité d'usage de l'azote à 30, 37, 45.5, et à 30 et 37.5 m respectivement.

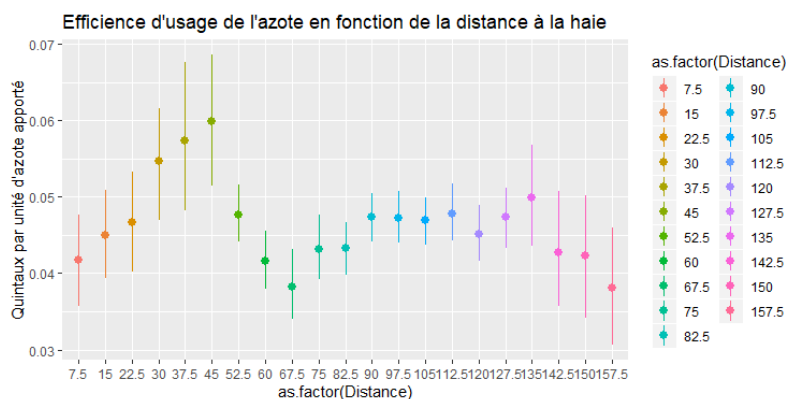


Figure 23. Efficacité d'usage de l'azote en fonction de la distance à la haie pour la haie centrale, bloc est

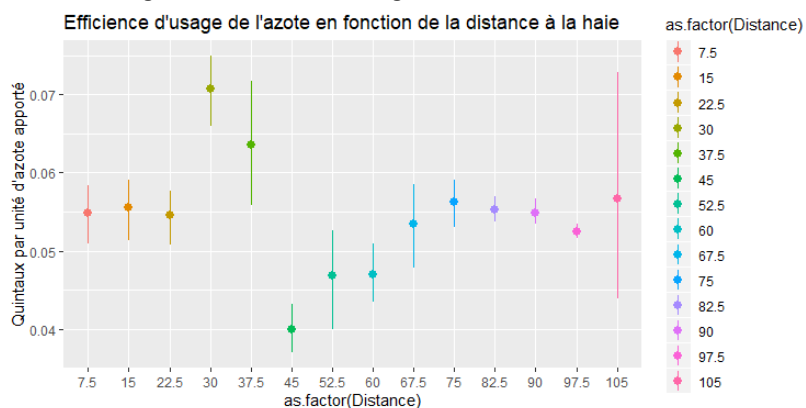


Figure 24. Efficacité d'usage de l'azote en fonction de la distance à la haie pour la haie centrale, bloc ouest

2019 PARCELLE NS

Haie de 12 et 9 m de haut à l'ouest



Figure 25. Photographie aérienne de la parcelle étudiée avec positionnement de la grille d'échantillonnage utilisée

En 2019, la parcelle NS figure 25 est cultivée en blé tendre. L'analyse graphique des rendements figure 26 montre une bonne résolution spatiale après filtrage et lissage des données. L'analyse porte sur un gradient depuis la haie, située à l'Ouest, vers le cœur de parcelle (en direction de l'Est). A noter la présence de la haie au sud (prise en considération dans les analyses), et l'hétérogénéité topographique de la parcelle avec une partie Ouest et Nord-Ouest plus basse que la partie Est proche d'une route. L'analyse des rendements en fonction de la distance conjuguée aux deux haies figure 28 montre une baisse de rendement dans les premiers mètres : 68.2 ± 0.14 qtx/ha à 7.5 m ; 77.5 ± 0.15 qtx/ha à 15 m, 73.1 ± 0.16 qtx/ha à 22.5m, contre en moyenne 84 à 91 qtx/ha à des distances supérieures. Il existe cependant une hétérogénéité forte à l'échelle intra distance. L'analyse statistique montre que les 7.5 premiers mètres sont significativement moins productifs que l'ensemble des autres distances, excepté à 21 m (figure 29).

La carte d'humidité du grain figure 27 montre que cette dernière est plus élevée à proximité des haie ouest, sud-ouest et sud, à l'ouest de la parcelle.

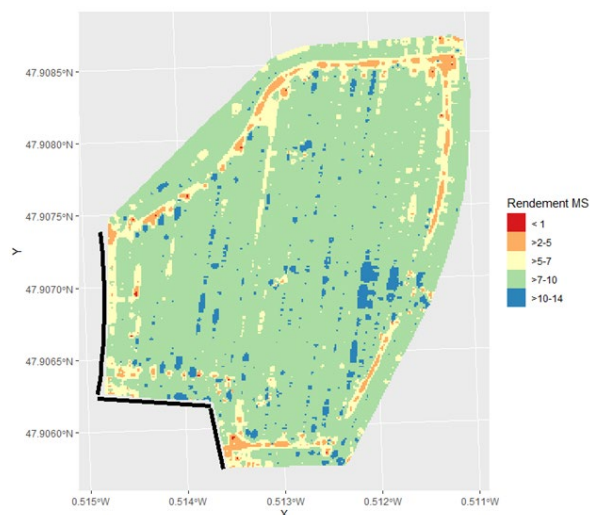


Figure 26. Rendements interpolés de la parcelle NS à partir des données de rendement en blé tendre de moissonneuse batteuse en 2019

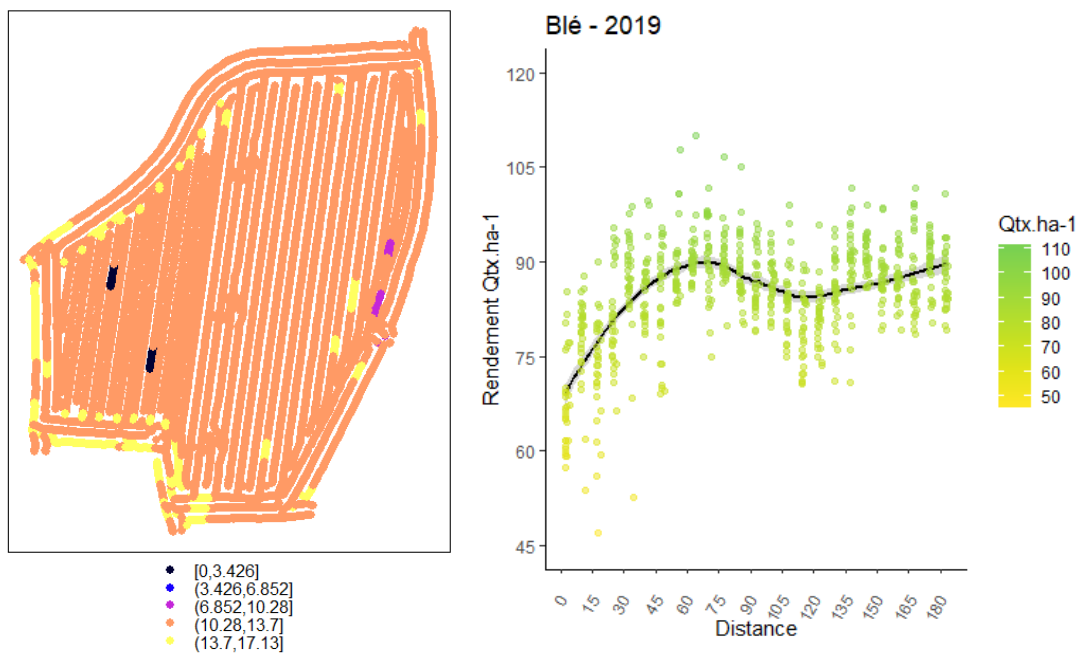


Figure 27. (Gauche) Humidité du blé d'après les données issues du capteurs de rendement de 2019, données brutes
 Figure 28. (Droite) Rendement moyen en blé tendre en 2019(courbe noire) et écart-types (gris) en fonction de la distance depuis la haie ouest, en direction de l'est

Sur cette même parcelle, le rendement moyen du maïs en 2020 est de 102.78 qtx/ha. On constate visuellement des rendements pénalisés à proximité de la haie ouest et sud ouest, ainsi que sur la bordure nord ouest de la parcelle (figure 31). L'analyse de variance montre un effet positif fort de la distance à la haie sur les rendements (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$), figure 32.

A 7.5 m, les rendements sont de 50 Qtx ha, contre 70 à 15m et 85m à 22.5m. Les rendements les plus importants sont atteints sur la partie est de la parcelle. Il existe une forte hétérogénéité de 22.5 à 52.5m de la haie.

L'humidité du grain figure 30 est la plus importante dans la partie nord-ouest, ainsi que sur une bande centrale de la parcelle (de 60 à 75% contre 45 à 60 % dans le reste de la parcelle).

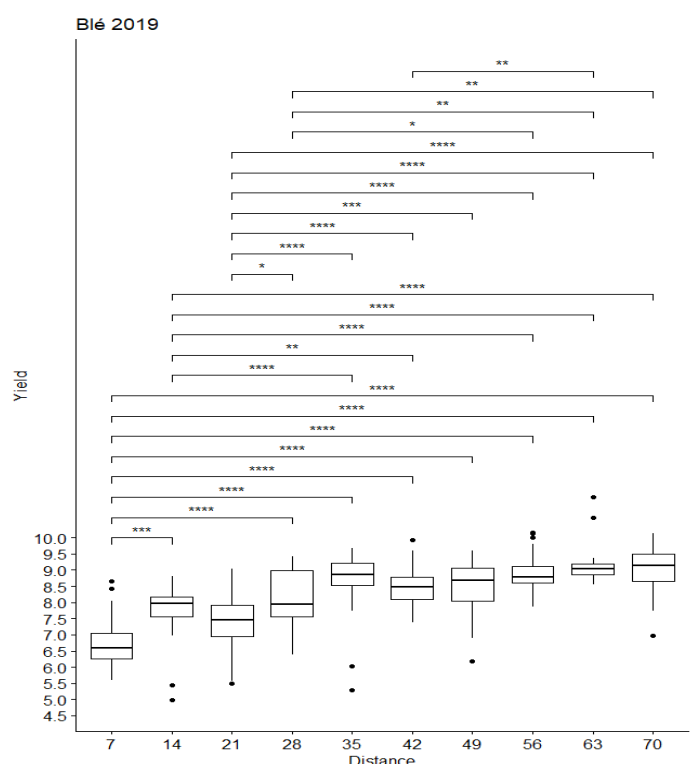
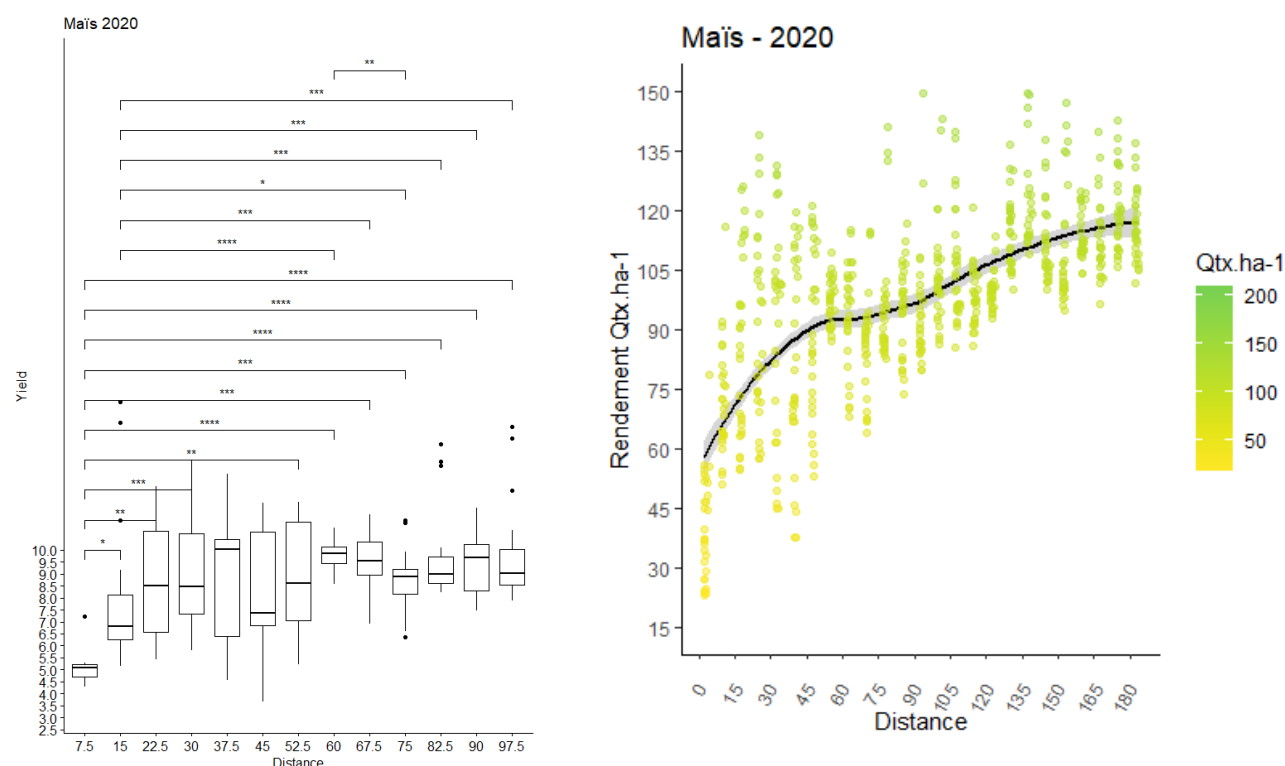
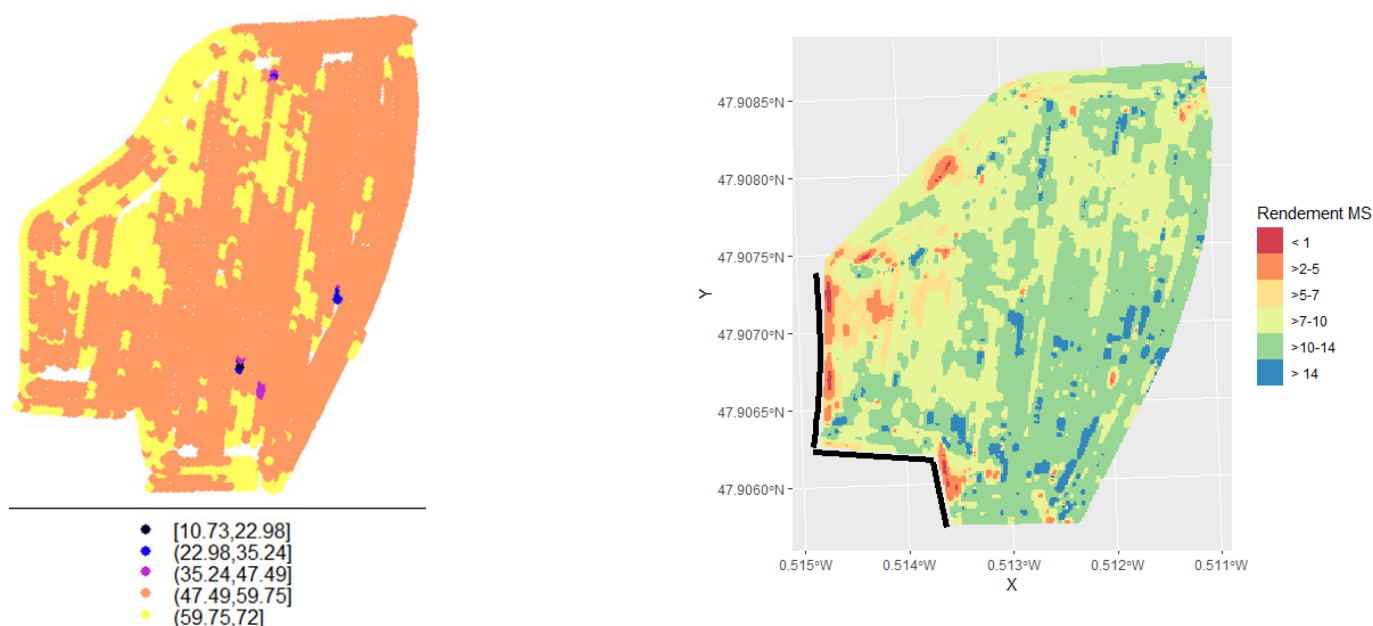


Figure 29. Boîtes à moustache du rendement en tonne/ha du blé tendre en 2019 en fonction de la distance à la haie. Les différences significatives de moyenne sont représentées par des étoiles (Test de Dunn-Sidak, $p < 0.05$).



3.2 – Discussion des résultats

Démarche d'estimation de l'effet des haies

Cette étude a permis de mettre en œuvre différentes méthodologies visant à la caractérisation de l'effet des haies sur les grandes cultures. Cette caractérisation nécessite plusieurs préalables pour être pleinement valable :

- La connaissance des itinéraires techniques, en particulier, la localisation des apports d'intrants (eau, fertilisants).
- L'accès aux données climatiques locales, en particulier de la force et direction du vent à l'échelle mensuel ou journalière, ainsi que la température et pluviométrie.
- La caractérisation microclimatique des parcelles, notamment en matière de force et direction du vent à différentes distances de l'aménagement étudiés, de température, hygrométrie de l'air ainsi que l'humidité du sol à différentes profondeurs.
- La connaissance du sol, en particulier de l'hétérogénéité spatiale potentielle.
- La caractérisation des haies avec en particulier leurs caractéristiques morphologiques incluant la hauteur moyenne de la haie et leur porosité optique.
- Le recueil des données de croissance et de développement, état sanitaire, rendement et qualité des cultures à plusieurs distances de la haie, dans les différentes zones d'influences potentielles.

En l'absence d'une ou plusieurs informations, il reste difficile d'établir avec certitude des liens de cause à effet entre haie et culture, en particulier vis-à-vis de l'effet brise vent. En particulier dans cette étude, la caractérisation correcte des sols des parcelles étudiées n'a pas pu être réalisées. Les résultats suivants sont donc à resituer dans leur contexte respectif.

Effet des haies sur les rendements et la qualité des grandes cultures

Segré en Anjou Bleu

L'orientation de la haie semble jouer fortement sur le comportement des cultures dans une zone d'interaction forte (rayonnement, compétition racinaires, biodiversité, etc.,). On constate premièrement des rendements moins importants à proximité immédiate (1H) de la haie, mais cette baisse semble cependant être modulée par l'orientation de la haie. La zone « E », à l'ouest de la haie, est restée davantage humide à la moisson, et le rendement y est davantage pénalisé que le versant est recevant le soleil le matin (zone « S »). L'analyse des composantes du rendement à 2H montre un PMG supérieur en zone S de 2 points, pour un nombre d'épis, de grain par épis et de poids spécifique similaires, ce qui traduit un moins bon remplissage sur ce versant de la haie. Plusieurs facteurs climatiques liés à la haie ont pu y contribuer :

Des températures échaudantes ont pu davantage avoir lieu sur la zone E, pénalisant ainsi le remplissage du grain, la température augmentant davantage en fin de journée en comparaison de la zone S. De plus, cette zone est privée de rayonnement le matin, lorsque les températures (entre 15 et 25°C) maximisent la photosynthèse.

Des effets de facilitation et compétition au niveau du sol ont pu avoir lieu mais n'ont pas pu être mis en évidence lors de l'étude. Les résultats laissent présager que ces effets sont néanmoins réduits au-delà de 1H, vu les rendements observés à 2H en zone S.

L'effet brise vent de la haie reste difficile à interpréter sur ce site, les vents étant très fluctuant dans cette région au cours de l'année de culture.

Montélier

Sur le site de Montélier, dont la haie est située au nord de la parcelle en alignement est-ouest, l'observation du développement des stades phénologiques et de la croissance du blé à 1H et 2H semble montrer un

développement précoce en comparaison des autres distances, probablement liée à l'augmentation des températures mesurées à proximité de la haie par effet brise vent et d'interception et réémission du rayonnement. Cette avance a ensuite été rattrapée dans les autres distances, entre la montaison et la moisson.

Les rendements grains observés à 2H et 6H sont d'environ 25% supérieurs à ceux observés à 1H, 10H et 15H, mais avec des teneurs en protéines inférieures toutefois compris en moyenne entre 12 et 13%.

Vu les données de vents fort de la région (données vents), et la porosité estimée de la haie, il est très probable que cette dernière ait joué un effet brise vent important sur une distance d'environ 10H. Les données microclimatiques montrent également un effet potentiel de la haie jusqu'à au moins 6H. La température journalière moyenne sur la période est d'environ 2.5°C supérieure à 1H, et 1°C supplémentaire à 6H. L'humidité relative de l'air est également supérieure à 6H en comparaison de 1H et du témoin. Ces différences se mettent en place principalement à partir du mois d'avril, et ont pu contribuer à des conditions de croissances plus favorables sur la période de montaison et remplissage du grain. Les rendements les plus forts sont aussi fortement associés à un nombre d'épis supérieurs, indiquant possiblement un tallage plus important sur ces placettes, liés aux cumuls de température pendant la période de tallage.

Il est également possible que les rendements en 10H et 15H aient été en partie pénalisés par une levée et un développement moins important dus à des conditions de sols moins favorables.

En conclusion, un gradient d'augmentation des rendements est observé jusqu'à au moins 6H dans l'ensemble des sites mais l'absence de données climatiques et pédologiques précises empêche ici de conclure sur la part du rôle brise-vent de la haie dans cette augmentation.

L'ensemble des données acquises dans cette étude montrent une diminution du rendement en blé tendre et maïs à proximité immédiate (1H) de la haie, de -22 à -30 % en comparaison des zones les plus productives. A 2H l'effet est parfois négatif, de l'ordre de 10 % en comparaison de la valeur moyenne pour la parcelle (parcelle NS, FE, Segré zone S) ou positif (Segré zone E, Montélier), avec des valeurs de rendements maximales à cette distance (jusqu'à 20% de plus en comparaisons des autres distances en moyenne).

Qualité

La qualité du blé tendre et dur en fonction de la distance à la haie a été évalué uniquement sur la base du taux de protéines pour les parcelles de Segré et de Montélier.

A Segré, le taux de protéines est significativement plus élevé à 1H et 2H en Zone E et 1h à 6H en zone S comparativement aux autres distances (jusqu'à 3 %). On observe à Montélier une tendance inverse, à savoir des taux de protéines les plus faibles à 2H et 6H en comparaison des autres distances. Le témoin montre le taux de protéine le plus fort (17%). Il existe une relation négative entre rendement et taux de protéines, qui est normal pour le blé. L'observation de rendement faible et de forte teneur en protéines peut être causée par exemple par des températures échaudantes ou des stress hydriques. A contrario, les zones présentant de forts rendements et des taux de protéines correctes sont celles qui présentent des conditions optimales de développement pour le blé.

Compte tenu des données microclimatiques de Montélier, il est probable que le blé à 2H et 6H ait bénéficié d'une température supérieure en journée, et potentiellement d'une meilleure efficacité d'usage de l'eau disponible (apporté par irrigation). Il existe une forte variabilité intra distance, potentiellement lié à des variations du sol, qui limitent cependant les interprétations possibles.

Analyses SIG

L'analyse du NDVI sur la parcelle de Montélier semble bien corrélée aux données issues du terrain. Le NDVI moyen ou date par date avant épiaison semble fortement corrélé aux rendements observés, avec une saturation observée à partir d'un rendement de 70 qtx ha⁻¹. L'analyse du cumul du NDVI sur la période de développement du blé (mars-juin) semble permettre d'augmenter le seuil de saturation, tout en conservant une bonne corrélation entre les deux variables.

L'analyse sur 7 dates de mars à mai semble permettre d'observer un indice de végétation négativement corrélé à un gradient d'éloignement à la haie vers le témoin en mars, puis un pic dans les distances de 2 à 15H. La zone témoin semble bien discriminée à chaque date, avec les valeurs de NDVI les plus faibles. Il est probable que le cumul du NDVI à chaque date par zone permette de mieux prendre en compte les effets cumulés de la haie sur le développement de la culture en fonction de la zone d'influence concernée. Il serait intéressant de modéliser le rendement en fonction du NDVI observé à différents stades de développement pour approcher l'effet brise vent.

Les satellites Sentinel-2 fournissent 1 image tous les 5 jours (pour chacun des deux satellites), ce qui permet de collecter des vues multiples des parcelles d'intérêt au cours d'une saison de culture. Les images doivent être exemptes de nuages, et atmosphériquement corrigées.

3.3 – Liste et descriptif des livrables

Livable : L 2.3. Protocole d'étude d'impact de la haie sur les principaux paramètres du rendement des cultures. Illustration à partir de parcelles expérimentales.

Le livable de la sous-action est constitué du présent rapport, édité sans les sous-parties 3.3 et 4.

PARTIE 4 – PERSPECTIVES

4.1 – Suites envisagées

L'action engagée dans RESP'HAIES a permis l'initiation d'un projet portant sur la continuité de l'action 2.3. Ce projet réuni au moment de la rédaction 5 acteurs (AGROOF, ADAF, ARVALIS, CA26, DYNAFOR) autour de l'étude de l'effet des haies sur les grandes cultures, et sa modélisation. Le financement de ce projet a été acquis via l'appel à projet Agroforesteries de la Fondation de France de 2023 à 2026.

La finalité de recherche du projet est d'étudier l'effet des haies brise-vent sur le comportement des grandes cultures, afin d'améliorer sa compréhension, améliorer les pratiques de conception et gestion des haies et cultures associées, et ainsi faciliter leur développement et maintien.

Plusieurs objectifs sont poursuivis :

- Évaluer et spatialiser, via des mesures au champ et l'emploi d'outils de télédétection, les effets des haies brise-vent sur le microclimat des parcelles, en lien avec l'état hydrique des sols et leur activité biologique (**Action 1**).
- Évaluer et spatialiser, via des mesures au champ et l'emploi d'outils de télédétection, les effets des haies brise-vent sur la croissance, le développement, l'état sanitaire, et les composantes du rendement de différents types de grandes cultures (**Action 2**).
- Mettre en place un observatoire de l'effet des haies brise vent sur les rendements des grandes cultures de manière à appréhender ces effets dans une diversité de situations (**Action 3**).
- Diffuser et échanger sur les références acquises auprès des conseillers/techniciens et agriculteurs (**Action 4**).

4.2 – Éléments évaluatifs

4.2.1 – Difficultés rencontrées

La validation et l'interprétation des données de terrain en absence de caractérisation microclimatique à été compliqué, en particulier en 2021 pour le terrain d'étude de la Loire. De même, l'absence de moyens permettant de caractériser les sols des parcelles d'études à fortement limité les possibilités d'interprétation.

L'absence de matériel permettant de traiter les échantillons de céréales a du être comblé grâce à la mise à disposition d'ARVALIS de son matériel d'étude (micro batteuse, compteurs de grains, balances de précisions, étuves, etc.).

Enfin, comme aucune acquisition de données météo n'était initialement prévu, des données locales ont été recherchées auprès de partenaires externes aux projets ou par la consultation de données libres, notamment du réseau SYNOP (MétéoFrance).

4.2.2 – Analyse d'impact du projet sur les différents publics cibles

Le projet a permis de rassembler plusieurs types de documentation à destination des partenaires techniques du projet :

- Sources bibliographiques de l'effet brise vent des haies en contexte tempéré
- Rapport d'étude et démarche de mise en place de suivis de l'effet brise-vent des haies dans différents contextes et selon différents types de données issues du terrain et de photographies satellites.

Il a également permis la mise en place d'un projet de recherche complémentaire fédérant des partenaires techniques et scientifiques pour produire des données localisées et intégrer la modélisation de l'effet des haies dans un logiciel libre d'accès « HedgeTools » porté par DYNAFOR.

4.2.3 – Indicateurs de suivis

- (1) Choix des sites de suivi.
- (2) Sélection des critères à prendre en compte pour la réalisation des prises de vues.
- (3) Création du cahier des charges pour la base de données.

4.2.4 – Indicateurs de résultats

Livrable : L 2.3. Protocole d'étude d'impact de la haie sur les principaux paramètres du rendement des cultures. Illustration à partir de parcelles expérimentales.

PARTIE 5 – ANNEXES

Bibliographie

- Beauvais, F., Cantat, O., Madeline, P., Le Gouée, P., Brunel-Muguet, S., Medjkane, M., 2019. Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100 ? : Étude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat. *Climatologie* 16, 129–160. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1414>
- Bellia, S., 2003. Les impacts du réchauffement climatique sur la production de blé en Beauce. *medit* 100, 103–108. <https://doi.org/10.3406/medit.2003.3294>
- Böhm, C., Kanzler, M., Freese, D., 2014. Wind speed reductions as influenced by woody hedgerows grown for biomass in short rotation alley cropping systems in Germany. *Agroforest Syst* 88, 579–591. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9700-y>
- Brandle, J.R., Hodges, L., Zhou, X.H., 2004. Windbreaks in North American Agricultural Systems 15.
- Cleugh, H.A., 1998. Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems* 56–84.
- Duan, T., Chapman, S.C., Guo, Y., Zheng, B., 2017. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research* 210, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.025>
- Freeman, K.W., Gima, K., Arnall, D.B., Mullen, R.W., Martin, K.L., Teal, R.K., Raun, W.R., 2007. By-Plant Prediction of Corn Forage Biomass and Nitrogen Uptake at Various Growth Stages Using Remote Sensing and Plant Height. *Agron. J.* 99, 530–536. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0135>
- Hunt, M.L., Blackburn, G.A., Carrasco, L., Redhead, J.W., Rowland, C.S., 2019. High resolution wheat yield mapping using Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment* 233, 111410. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111410>
- Leroux, C., Jones, H., Clenet, A., Tisseyre, B., 2019. Knowledge discovery and unsupervised detection of within-field yield defective observations. *Computers and Electronics in Agriculture* 156, 645–659. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.024>
- Matcham, E.G., Matias, F., Luck, B.D., Conley, S.P., 2022. Filtering, editing, and cropping yield maps in a R environment with the package cleanRfield. *Agronomy Journal* 114, 1672–1679. <https://doi.org/10.1002/agj2.21055>
- Nuberg, I.K., 1998. Effect of shelter on temperate crops: a review to define research for Australian conditions 32.
- Osorio, R.J., Barden, C.J., Ciampitti, I.A., 2019. GIS approach to estimate windbreak crop yield effects in Kansas–Nebraska. *Agroforest Syst* 93, 1567–1576. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0270-2>
- Segarra, J., Araus, J.L., Kefauver, S.C., 2022. Farming and Earth Observation: Sentinel-2 data to estimate within-field wheat grain yield. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 107, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102697>
- Toscano, P., Castrignanò, A., Di Gennaro, S.F., Vonella, A.V., Ventrella, D., Matese, A., 2019. A Precision Agriculture Approach for Durum Wheat Yield Assessment Using Remote Sensing Data and Yield Mapping. *Agronomy* 9, 437. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080437>
- Van Vooren, L., Bert, R., Steven, B., Pieter, D.F., Victoria, N., Paul, P., Kris, V., 2017. Ecosystem service delivery of agri-environment measures: A synthesis for hedgerows and grass strips on arable land. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 244, 32–51. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.04.015>

Résumé :

Cette étude a eu pour but de produire une méthode d'étude de l'effet des haies sur les grandes cultures, notamment à travers l'usage de technologies d'imageries aériennes.

Après une étude bibliographique et des entretiens avec des spécialistes, il a été décidé de réaliser des analyses d'indices de végétation obtenus via l'analyse d'images Sentinel-2, et de carte de rendements.

Deux départements ont été choisis pour réaliser des suivis *in situ* du développement, de la qualité et des rendements en blé tendre en Mayenne (2021) et en blé dur dans la Drôme (2022).

En Mayenne, la haie étudiée a diminué le rendement à 1H et 2H sur son versant ouest, et uniquement à 1H sur son versant est. Les rendements étaient les plus forts à 6H sur la partie ouest et à 2H et 6H sur la partie est. Les cartes de rendements analysées pour ce département montrent une diminution des rendements à proximité des haies étudiées, qui disparaît après des distances comprises entre 2 et 3 fois la hauteur maximale de la haie. Les rendements les plus forts sont observés à des distances comprises entre 5 à 10 fois la hauteur maximale des haies, sans que ces effets puissent être attribués à ces dernières en absence de caractérisation du sol notamment.

Dans la Drôme en présence d'un vent dominant nord marqué, les rendements maximums sont observés à 2H et 6H. Ces données sont cohérentes avec l'analyse du NDVI des images Sentinel-2 pour l'ensemble de la période de culture, et aux mesures microclimatiques réalisées.

Pour citer ce rapport :

MARTIN-CHAVE, Ambroise ; Béral, Camille. Mise au point d'une méthodologie d'étude de l'effet brise vent des haies sur les grandes cultures, Rapport du projet RESP'HAIES, 2023, 39 pages

En savoir plus sur Resp'haies :

Le projet de recherche et développement RESP'HAIES (RESilience et Performances des exploitations agricoles liées aux HAIES) s'est déroulé de 2019-2022, avec la participation de onze organismes de la recherche, du développement et de l'enseignement dans l'objectif est de renforcer les connaissances sur la thématique des haies autour de quatre axes :

- **Action 1** - productivité et cubage des haies et apports de la géographie pour caractériser les haies,
- **Action 2** - services écosystémiques liés aux haies : biodiversité, ruissellement, carbone,
- **Action 3** - performances technico-économiques des exploitations agricoles liées aux haies,
- **Action 4** - conceptions et tests de séquences pédagogique sur les haies.

Retrouvez tous les résultats du projet sur <https://afac-agroforesteries.fr/resphaies/>

Projet soutenu par :

Le projet bénéficie également du soutien de :



Partenaires du projet :

