

Rapport ARBRISSEAU – modélisation

Marie Gosme, Thomas Gendron, Isabelle Lecomte et Christian Dupraz, Février 2023

Ce rapport correspond aux livrables L2.4: « Bilan hydrique des parcelles expérimentales représentatives des innovations agroforestières étudiées dans les conditions pédoclimatiques actuelles » (partie III.A.2), L2.5 : « Bilan azoté des parcelles expérimentales représentatives des innovations agroforestières étudiées dans les conditions pédoclimatiques actuelles » (partie III.A.3), et L2.7: « Modélisation des flux d'eau sur les pédoclimats du bassin RM non étudiés expérimentalement » (partie III.B), car il nous est apparu peu pertinent de les séparer. En effet, les bilans hydriques et azotés sont fortement liés et doivent donc être interprétés conjointement, et la démarche de modélisation était rigoureusement la même sur les sites agroforestiers étudiés et sur les sites non étudiés expérimentalement. Il correspond également au livrable L2.6 : « Impact du changement climatique sur les bilans hydriques et azotés des parcelles du réseau » (partie III.C). Par contre, le livrable L2.8 : « Modélisation des effets du changement climatique à horizon 2050 sur les flux d'eau dans les parcelles agricoles recevant des pratiques agroforestières » (c'est-à-dire étude de l'impact du changement climatique pour les parcelles « satellites » du réseau) n'a pas pu être produit car les simulations n'ont pas pu être effectuées faute de temps.

Table des matières

I.	Introduction.....	2
II.	Matériel et méthodes.....	6
A.	Construction des scénarios de simulation	6
1.	Choix des sites.....	6
2.	Recueil des données	6
3.	Simplifications	7
B.	Description du modèle Hi-sAfe	9
C.	Simulations.....	12
III.	Résultats.....	12
A.	Vérification du modèle par comparaison avec les données expérimentales.....	12
1.	Rendement des cultures	12
2.	Bilan hydrique	13
3.	Bilan azoté.....	17
4.	Rendement des cultures sur les différents sites du réseau.....	20
B.	Bilan hydrique et azoté (et performance des cultures et des arbres) des autres parcelles ..	21
1.	culture pure.....	21
2.	Agroforesterie	23
3.	Expérimentation virtuelle : design des parcelles.....	26
C.	Impact du changement climatique	28
IV.	Discussion.....	32
V.	Conclusion	32

I. Introduction

L'agroforesterie, l'association d'arbres et de cultures ou d'élevage, est un exemple typique de diversification des systèmes agricoles prônée par l'agroécologie, dont on attend un grand nombre de bénéfices, d'une part grâce à la **complémentarité spatio-temporelle** pour l'utilisation des ressources entre espèces associées et d'autre part grâce à la **contribution de la biodiversité végétale** au fonctionnement écologique et aux **services des agrosystèmes**. Ainsi, des travaux ont montré l'augmentation de la productivité de l'ensemble du système, mesurée par le LER (Mead and Willey 1980), sur des systèmes à base d'arbres à bois en Europe (Graves et al. 2007), ou pour les vergers-maraichers (Paut et al. 2018). Une méta-analyse sur les impacts des différents modes de diversification à l'échelle mondiale a montré un effet positif de l'agroforesterie non seulement sur la biodiversité et sur la qualité des sols, mais aussi, lorsqu'elle est associée à une diversification des cultures, sur le rendement (Beillouin et al. 2019). Par ailleurs, les services écosystémiques produits par l'agroforesterie sont nombreux (Jose 2009), par exemple le stockage du carbone (Kay et al. 2019), les régulations biologiques (Boinot et al. 2019), l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Bai et al. 2016) ou la régulation du microclimat (Gomes et al. 2020). Ces deux derniers points sont particulièrement intéressants dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.

Les arbres modifient le **microclimat** sous leur canopée du fait de l'ombre qu'ils portent pendant la journée, du masque nocturne qui diminue le refroidissement radiatif, de la transpiration des arbres et de la modification de la vitesse du vent (Peng et al. 2015). Les arbres d'ombrage sont souvent utilisés en milieu tropical pour protéger les cultures des excès de lumière et de chaleur, et l'agroforesterie est clairement identifiée comme un moyen d'adaptation de l'agriculture au changement climatique dans ces régions (van Noordwijk et al. 2014) en atténuant les variations de température de l'air et du sol (Lin 2007) et en réduisant l'évaporation du sol (Siriri et al. 2013). En milieu tempéré, l'agroforesterie est moins développée, mais elle attire de plus en plus l'attention en raison des divers services écosystémiques qu'elle peut fournir (Torralba et al. 2016). Il pourrait être intéressant de cultiver des céréales et des arbres fruitiers sous ombrage pour adapter l'agriculture au changement climatique en limitant les variations de température à la fois à l'échelle annuelle et à l'échelle journalière, réduisant ainsi la perte de rendement due aux températures extrêmes (gel, vague de chaleur), et en réduisant l'évaporation du sol par une diminution du rayonnement, de la vitesse du vent, de la température et une augmentation de l'humidité de l'air. Le masque du ciel nocturne par les arbres réduit le refroidissement radiatif la nuit en renvoyant le rayonnement infrarouge émis par le sol et les cultures. Cet effet réduit le risque de dommages dus au gel (Scowcroft et al. 2000). Ceci est important pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique car des températures hivernales plus élevées accéléreront la phénologie des cultures (Zheng et al. 2016), ce qui pourrait rendre la plante plus sensible aux gels tardifs s'ils se produisent au moment où la culture est la plus vulnérable. Au printemps, pendant les nuits claires et froides, les cultures non protégées seront gravement endommagées par le gel, tandis que les cultures sous la canopée des arbres seront exposées à un risque moindre. Pendant la journée, l'ombre des arbres évite que les parties sensibles de la culture soient exposées à la lumière directe du soleil et réduit la température des organes de la culture, ainsi que la température de l'air. Bien que l'ombre soit généralement préjudiciable au rendement des cultures en réduisant la photosynthèse, elle peut également protéger les cultures sensibles contre l'excès de rayonnement (par exemple "coups de soleil" sur les fruits), qui devrait augmenter avec le

changement climatique (Webber et al. 2015). Par exemple, la production de pommes est très sensible à l'excès de chaleur et de lumière, qui provoque un stress photo-oxydatif dans les feuilles, entraînant une diminution des performances de l'arbre, ainsi que des coups de soleil sur les fruits eux-mêmes, les rendant invendables (jusqu'à 10 % des fruits, (Racsko and Schrader 2012)). La solution actuelle à ce problème consiste à utiliser des filets d'ombrage qui modifient à la fois la quantité et la qualité de la lumière incidente, avec des effets variables sur la qualité des pommes, selon le cultivar (Widmer 2001; Dayioglu and Hepaksoy 2016; Treder et al. 2016). Mais ces filets augmentent la température de l'air (jusqu'à +10°C mesurés par le CETA Hérault-Vidourle en 2019 !). Dans une perspective agroécologique, il faudrait remplacer ces protections artificielles par des arbres d'ombrage, d'autant que l'agroforesterie permettrait de bénéficier non seulement d'un effet protecteur, mais aussi des autres services écosystémiques. En milieu tempéré, l'effet microclimatique de l'agroforesterie a été étudié principalement dans les systèmes agroforestiers traditionnels du Sud de l'Europe comme la dehesa (Sánchez et al. 2010), ou dans le cas des haies brise-vent (Nuberg 1998; Quinkenstein et al. 2009) mais, hormis l'étude de Peng et collaborateurs (2015) en Ontario, il n'existe pas d'étude du microclimat dans les systèmes agroforestiers "modernes" (alignements d'arbres dans des grandes cultures) avec des arbres adultes.

Les arbres modifient également le **bilan hydrique** des parcelles agroforestières, par rapport à la culture pure, et ils agissent également indirectement sur la **qualité de l'eau**. La Figure 1 présente les effets directs et indirects dus à la présence de l'arbre lui-même, mais aussi la présence d'une bande non travaillée au pied des arbres (le linéaire sous-arboré, qui héberge généralement une végétation semée ou spontanée), et au fait que la culture est réalisée en allées, avec un terrassement spontané de la parcelle (ligne d'arbre surélevée, dérayure d'un côté de l'interface entre la ligne d'arbres et l'allée cultivée). Ces effets impactent tous les termes du bilan hydrique de la parcelle : la quantité et la distribution spatiale des précipitations (du fait de l'interception par le feuillage et le flux le long du tronc), la réserve utile (par approfondissement de la zone de sol explorée par des racines, et par modification de la teneur en matière organique), le ruissellement (par modification de la capacité d'infiltration), l'évapotranspiration (par effet microclimatiques directs et modifications de la surface foliaire de la culture) et le drainage (par assèchement du sol en profondeur et en été). La qualité de l'eau est améliorée, par réduction de la lixiviation de l'azote, diminution de l'érosion, diminution du risque d'inondation et rétention des embâcles, effet filtrant de l'enherbement du linéaire sous-arboré et réduction éventuelle de l'utilisation de pesticides.

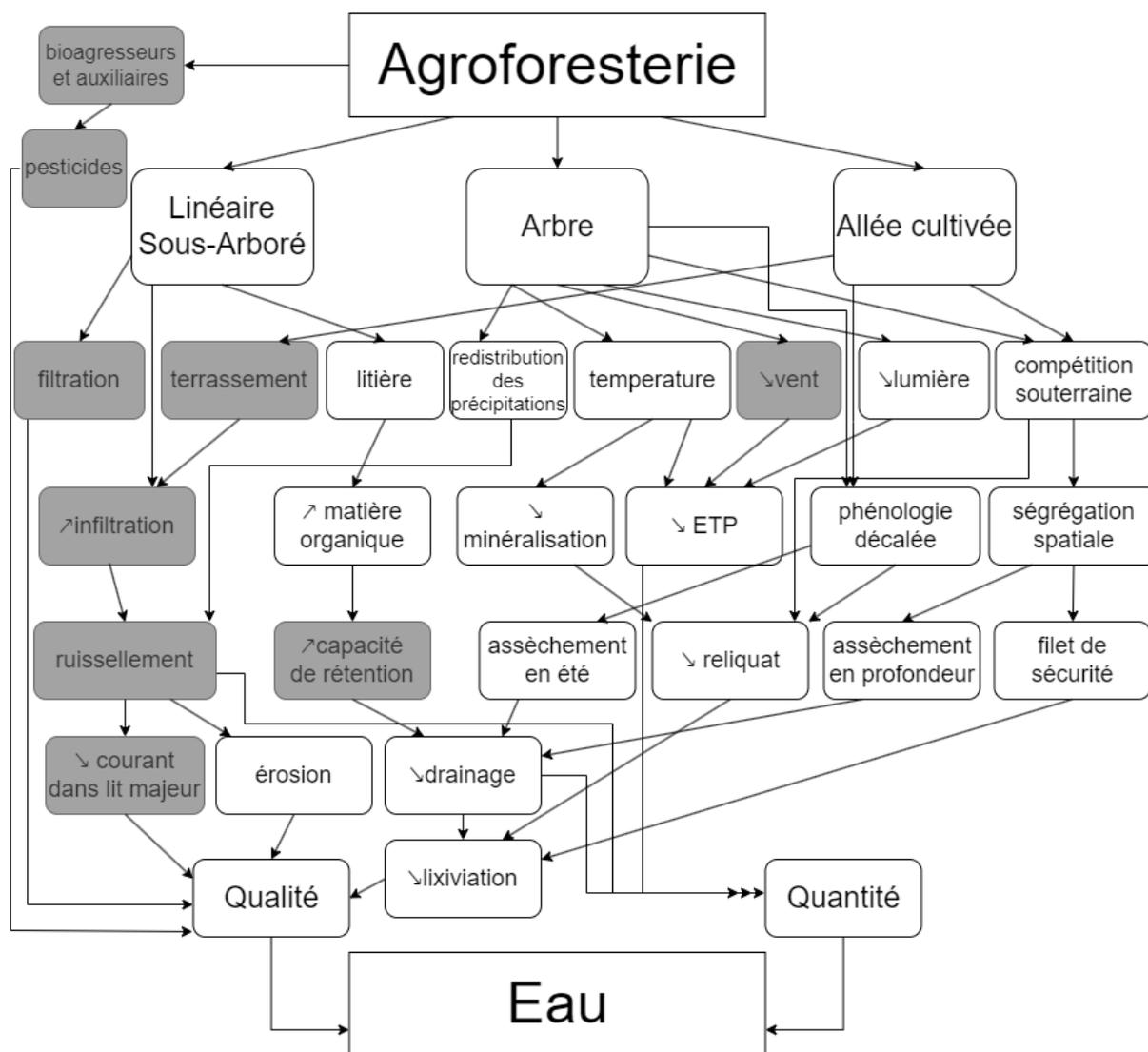


Figure 1 : Modèle conceptuel de l'effet d'agroforesterie sur la quantité et la qualité de l'eau. En gris, les éléments non pris en compte dans le modèle Hi-sAFE

Mais évidemment, ces effets positifs s'accompagnent aussi d'effets négatifs (**compétitions pour l'eau, la lumière et l'azote** entre les différentes espèces). Dans les systèmes agroforestiers tempérés, la complémentarité des arbres à feuilles caduques et des céréales d'hiver pour l'utilisation des ressources a été très bien mise en évidence (Dupraz and Liagre 2011; Dufour et al. 2013). En été, après la récolte de la culture, la lumière profite à la croissance des arbres tandis qu'en hiver, les arbres ayant perdu leurs feuilles, la lumière est captée par la culture d'hiver, de même qu'au cours de toute l'année dans les systèmes agroforestiers jeunes, les petits arbres captant très peu de rayonnement. Cependant, la complémentarité n'est que partielle et pendant une partie de l'année, les arbres et les cultures sont en compétition pour les ressources. Pour les cultures d'été, il n'y a pas de complémentarité temporelle pour l'utilisation des ressources, on peut donc s'attendre à des pertes de rendement plus importantes. L'équilibre entre effets positifs et négatifs dépend également des conditions pédoclimatiques et des pratiques culturales (Kho 2007). En particulier, la profondeur de sol détermine la possibilité d'une complémentarité spatiale entre les systèmes racinaires des arbres et des cultures, et les conditions climatiques, en particulier la pluviométrie, déterminent l'importance, ou non, de cette complémentarité pour l'accès à l'eau.

Il est donc **difficile de prévoir la balance entre les effets positifs et négatifs de l'agroforesterie** du fait des nombreuses interactions à l'œuvre. D'autant que les expérimentations sur ce sujet ne sont pas faciles à réaliser, principalement en raison des échelles spatiales et temporelles impliquées dans l'étude des systèmes agroforestiers. Les sites de cultures en allées avec des arbres assez vieux pour avoir un impact significatif sur les cultures sont très rares.

L'une des solutions à ce problème est le recours à la modélisation. Un modèle est construit pour donner une représentation intelligible et partageable d'un système donné pour mieux le comprendre et l'expliquer. Il existe plusieurs types de modèles : modèles analogiques (par exemple une maquette), modèles conceptuels (par exemple un schéma de fonctionnement, tel que celui de la Figure 1), modèles mathématiques (par exemple système d'équations différentielles couplées). Parmi les modèles mathématiques, on peut encore distinguer les modèles mécanistes, où le fonctionnement du système est représenté à l'aide d'équations décrivant les processus sous-jacents, et les modèles empiriques, qui fonctionnent comme des boîtes noires et sont utilisés pour faire de la prédiction sans chercher à comprendre les processus qui causent les sorties du modèle. La modélisation mathématique, qu'elle soit mécaniste ou empirique, permet de prédire les effets d'interactions multiples, qui ne sont pas triviales et dont la résultante n'est donc pas prévisible par un simple raisonnement à partir d'un modèle conceptuel. Elle permet ainsi **d'extrapoler les résultats** par rapport aux situations testées expérimentalement, soit pour tester des combinaisons de pratiques qui n'ont pas pu être testées, soit pour extrapoler à d'autres conditions pédoclimatiques, soit les deux. Ainsi, les modèles de culture sont des outils puissants pour prédire le rendement et les impacts environnementaux de différents systèmes de culture dans une large gamme de conditions pédoclimatiques, permettant de réaliser une évaluation multicritère ex ante de systèmes de culture innovants sans avoir à mener des expériences de terrain longues et coûteuses. Par exemple, le modèle d'agroforesterie Hi-sAFe (Dupraz et al. 2019), simule en trois dimensions les compétitions entre les arbres et les cultures pour la lumière, l'eau et l'azote. Il est particulièrement utile pour prédire les effets de différents contextes pédoclimatiques sur les **interactions arbres-cultures**, pour étudier la balance entre les effets positifs (microclimat sous les arbres, complémentarité pour l'acquisition des ressources) et négatifs (compétitions) de l'agroforesterie **dans différentes conditions**. Cela diminue le besoin d'expérimentations au champ, qui sont particulièrement longues et gourmandes en terrain dans le cas de l'agroforesterie (Stamps and Linit 1998). Il a par exemple été utilisé pour étudier la compétition pour la lumière en fonction du design de la parcelle (distance et orientation de lignes d'arbres) et de la latitude (Dupraz et al. 2018), ou pour tester l'effet protecteur de l'agroforesterie face au changement climatique dans une association noyers-blé dur (Reyes et al. 2021).

L'objectif du travail de modélisation réalisé dans le cadre du projet ARBRISSEAU était de tester, dans différentes conditions pédo-climatiques représentatives du bassin RMC, l'effet que pourrait avoir l'introduction d'arbres dans les parcelles agricoles, à la fois sur le bilan hydrique de ces parcelles et sur la lixiviation de l'azote, mais aussi sur la productivité des parcelles (pour s'assurer de la durabilité agronomique du système). Pour ce faire, nous avons construit des scénarios de simulation avec les partenaires du projet puis utilisé le modèle Hi-sAFe pour simuler les parcelles avec et sans arbres et réalisé des expérimentations virtuelles pour tester l'effet du design des parcelles sur les éléments du bilan hydrique et la qualité de l'eau, et pour tester l'effet protecteur de l'agroforesterie face au changement climatique dans une association noyers-blé dur.

II. Matériel et méthodes

A. Construction des scénarios de simulation

1. Choix des sites

Plutôt que de faire une analyse de sensibilité du modèle en faisant varier systématiquement les conditions de sol, de climat et de pratiques culturales, le choix a été fait de travailler sous forme de scénarios basés sur des cas d'étude réels. Ce choix a été fait non seulement pour des raisons de réduction du temps de calcul (il faut plusieurs heures pour simuler un système agroforestier sur 40 ans, donc il aurait été peu réaliste de tester toutes les combinaisons possibles), mais surtout pour garder la cohérence entre le sol, le climat et les pratiques, et ainsi avoir des simulations réalistes (et potentiellement utiles pour les partenaires du projet qui ont réellement planté ces systèmes ou prévoient de le faire).

Afin de représenter une diversité de systèmes et de conditions pédo-climatiques représentatives du bassin, nous avons identifié avec les partenaires six sites (Tableau 1) présentant des enjeux « eau » importants (et pour lesquels des données étaient disponibles pour caractériser le sol, le climat, la rotation et les itinéraires techniques). Ces sites ne représentent bien entendu pas la totalité de la diversité des systèmes présents sur le bassin, mais ils présentent des caractéristiques suffisamment différentes pour que leurs fonctionnements hydriques et azotés soient très contrastés, ce qui nous permettra de déterminer si les effets de l'agroforesterie observés dans les simulations ont une chance d'être génériques, ou s'ils sont dépendants du contexte.

Tableau 1 : Description des sept sites simulés dans le cadre du projet ARBRISSEAU. Les rotations sont constituées de BD : Blé dur, BT: Blé tendre, C: colza, M: Maïs, ME: Maïs ensilage, OH: orge d'hiver, S: Soja,

Site	Commune	Département	Pluviométrie	Texture	Profondeur	RU		Cailloux	Rotation	Particularité
			mm (sd)		m	mm	mm/m	%		
CHAM	Champlitte	Haute-Saône	912 (163)	Limon argileux	3.0	222	74	60	BT-OH-C	
CHAR	Charcenne	Haute-Saône	996 (175)	Limon argileux	3.0	273	91	50	BT - C	
CHAT	Chatte	Isère	1176 (173)	Limon	2.0	298	149	20	M - S - BT	
DIE	Dienay	Côte d'or	879 (154)	Argile	3.0	227	76	54	OH - C - BT	
PESM	Pesmes	Haute-Saône	950 (161)	Limon Fin	2.0	439	220	0	ME - BT - C	
REST	Restinclières	Hérault	894 (247)	Limon argileux	7.0	1394	199	0	BD - C - OP	Nappe
TAB	Etoile-sur-Rhône	Drôme	918 (177)	Sable Limoneux	3.4	256	75	50	M - S - BT	Irrigués

En complément de ces six sites chez les partenaires du projet ARBRISSEAU, nous avons également réalisé des simulations sur le site de Restinclières, en particulier les simulations concernant le changement climatique, car c'est sur ce site que le modèle a été vérifié le plus finement et pour lequel nous avons le plus confiance en les simulations.

2. Recueil des données

Aucun des jeux de données transmis ne contenait toutes les données nécessaires à l'instanciation du modèle. Les manques les plus importants concernaient en général la description du sol. On pouvait en général avoir une certaine idée de la profondeur totale, voire même une analyse texturale de l'horizon de surface, mais les données étaient absentes pour les couches inférieures, ainsi que pour la profondeur de la nappe. Nous avons donc dû faire des choix arbitraires pour compléter la description du sol (par exemple, nous avons imposé un sol de 3 m de profondeur lorsque la profondeur du sol était inconnue), ou utilisé des règles simples pour générer les données manquantes (par exemple, si la présence d'une nappe était connue, mais pas sa profondeur, nous avons appliqué une fonction sinusoïde pour calculer la hauteur de la nappe en faisant l'hypothèse qu'elle était au plus haut au 1^{er} Janvier, et au plus bas au 1^{er} Juillet).

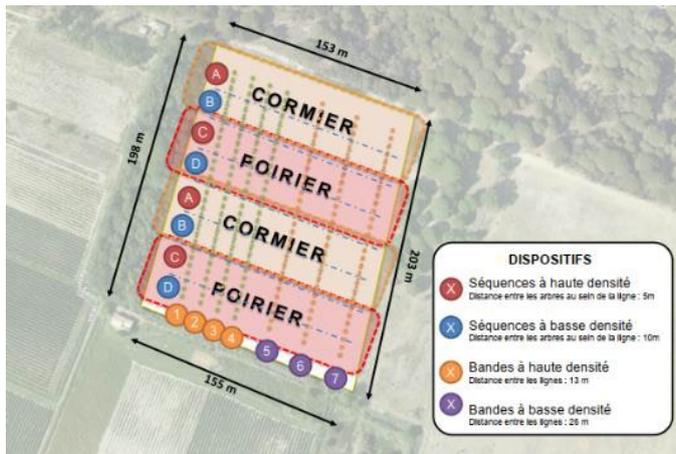
Pour les données météo de la période historique, nous avons extrait les données de la base de données SAFRAN produite par météo France, sur la période 1958-2019. Pour chaque site, nous avons utilisé les 9 mailles situées autour du site (chaque maille fait 8x8 Km). Toutes les simulations de la période actuelle ont été réalisées sur une période de 40 ans (1975 à 2015). Pour les simulations de changement climatique, nous avons utilisé les données météo issues des projections du GIEC (période 2050-2100 pour le scénario Representative Concentration Pathways 8.5 (RCP8.5, Assessment Report 5)). Ce scénario est un scénario "business as usual", avec des émissions de gaz à effet de serre correspondant à une population qui continue à augmenter, pas de modification des écarts entre pays à haut et faible niveau de revenus, et des investissements modestes dans les énergies renouvelables. Ce scénario conduit à un forçage radiatif de 8.5 W/m² à la fin du siècle, ce qui arrivera probablement en l'absence de mesures drastiques de lutte contre le changement climatique.

3. Simplifications

Les systèmes réellement mise en place par les partenaires sont en général trop complexes pour être représentés tels quels par le modèle Hi-sAFé. Il a donc fallu les simplifier pour les rendre compatibles avec la modélisation. Les principales modifications concernaient les espèces simulées. Les partenaires du projet travaillent sur des systèmes très innovants, basés sur des rotations très diversifiées incluant des plantes peu communes et malheureusement pas encore paramétrées dans le modèle (chia, seigle, lentilles...) ou des mélanges d'espèces. Ces espèces ont parfois pu être remplacées par d'autres espèces proches (exemple blé au lieu de seigle, pois au lieu de lentilles), mais parfois elles ont dû être supprimées de la rotation. Pour les arbres, l'écart entre les possibilités du modèle et la réalité était encore plus important : seules quatre espèces d'arbres existent actuellement dans le modèle (noyer, peuplier, merisier, olivier). Nous avons donc décidé de faire toutes les simulations avec des noyers, qui est l'espèce qui est la mieux paramétrée dans le modèle.

D'autres simplifications ont dû être faites, notamment en ce qui concerne les itinéraires techniques : alors que le modèle permet d'avoir un itinéraire technique particulier pour chaque saison culturale, il aurait été bien trop difficile de reconstituer un itinéraire technique pour chaque année de la simulation (les données fournies par les partenaires ne contenaient pas une description exacte de l'itinéraires technique réel des cultures, juste un itinéraire technique type). Nous avons donc appliqué l'itinéraire technique type de chaque culture à toutes les années où cette culture était présente, sans adaptation aux conditions particulières d'une année donnée (par exemple adaptation des dates de semis aux conditions climatiques, ou adaptation des dates de fertilisation à la phénologie précise de la culture). Pour la conduite technique des arbres, comme les arbres ne sont pas les mêmes que ceux réellement plantés dans chaque site, nous avons tout simplement appliqué la même conduite sur tous les sites, soit une irrigation les six premières années de la vie de l'arbre, un élagage des branches basses tous les deux ans jusqu'à ce que la base de la couronne se situe à 4 m du sol.

Enfin, la configuration spatiale des systèmes mis en place répondait parfois à des objectifs d'expérimentation (comparaison de plusieurs modalités sur la même parcelle), alors que le modèle représente une répétition, à l'infini, d'un seul pattern comme si l'ensemble de la parcelle était couvert par le même système agroforestier. Nous avons donc choisi l'une des modalités, que nous avons utilisée comme pattern. Dans ce cas, cette simplification est une bonne chose, puisqu'elle permet d'extrapoler à ce qui se passerait si le système était appliqué à l'échelle commerciale, en s'affranchissant de possibles effets de bords.



Scene: AF_ABR_Lievres_simu_1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117
118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143

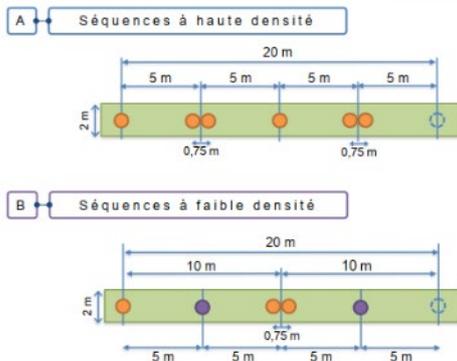
● walnut-hybrid

■ baresoil
■ durum-wheat-restinclieres

13m
Latitude: 45 - North orientation: 0
Cell width: 1m - Soil depth: 2.4m
Slope aspect: 0 - Slope intensity: 0
Toric symmetry: Xp,Xn,Yp,Yn

Plantation Cormier

- Cormier (*Sorbus domestica*)
- Arbuste mellifère



Plantation Poirier

- Poirier (*Pyrus pyrastrer*)
- Arbuste mellifère

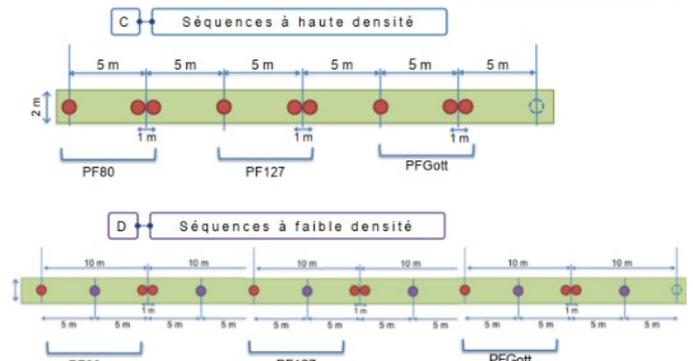


Figure 2 : exemple de simplification de la structure spatiale de la parcelle nécessaire pour la modélisation avec hi-sAFe. a) Plan de plantation de la parcelle. b) scène présentée dans Hi-sAFe, correspondant à des lignes de séquences « haute densité » (1 arbre seul, 2 arbres côte à côte, 1 arbre seul, 2 arbres côte à côte, etc.). Note : la symétrie torique utilisée dans Hi-sAFe permet de répéter ce motif à l'infini. c) et d) détails des 4 types de lignes d'arbres présents dans la parcelle.

B. Description du modèle Hi-sAfe

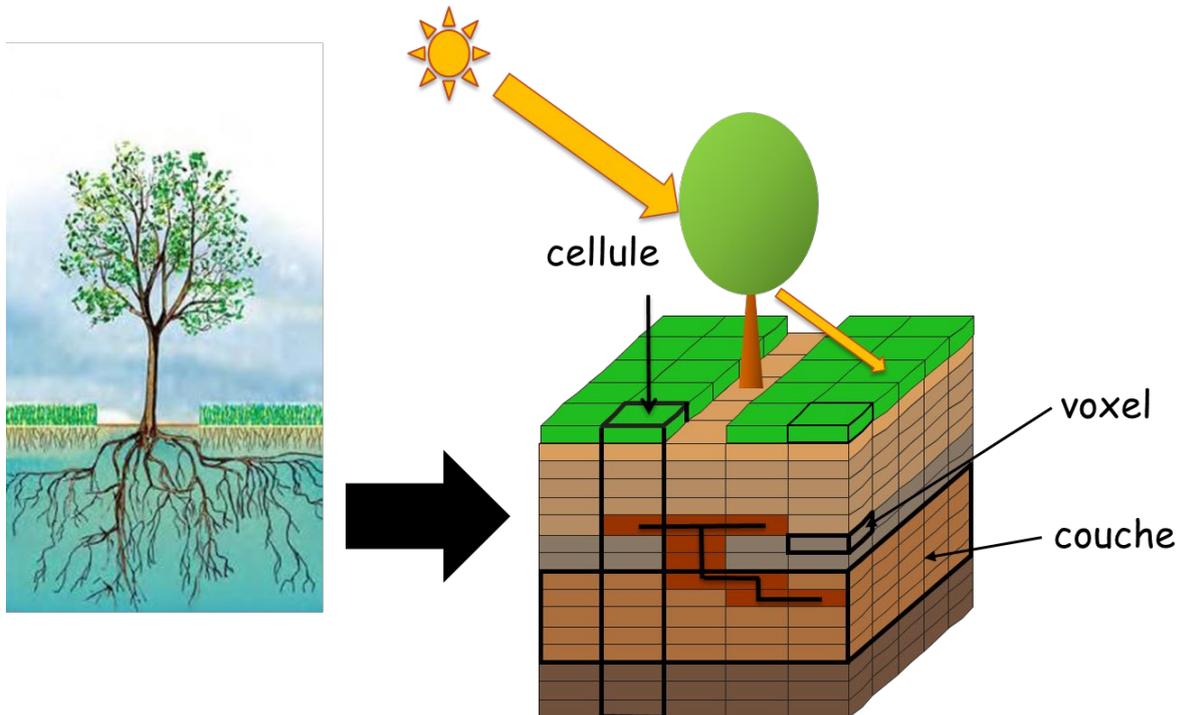


Figure 3 : Représentation simplifiée de l'arbre et des cultures dans Hi-sAfe : la partie aérienne de l'arbre est représentée par des formes simples (tronc conique, canopée ellipsoïdale), les racines de structure sont représentées par une architecture de tubes connectés, les racines fines par une densité homogène dans chaque volume de sol (voxel). Les cultures sont représentées par un couvert homogène dans chaque cellule de la grille de discrétisation de l'espace, et par une densité de racine dans chaque volume de sol. Le sol est représenté par différentes couches de propriétés physico-chimiques homogènes, et les transferts verticaux d'eau et d'azote ont lieu entre mini-couches d'un cm d'épaisseur (non représentées).

Comme tout modèle, le modèle Hi-sAfe représente une simplification de la réalité (Figure 3). Il est basé sur le modèle STICS pour la représentation du sol et des cultures annuelles (multiples instanciations de STICS pour représenter l'hétérogénéité spatiale d'une parcelle agroforestière), et sur un modèle d'arbre développé dans la plateforme de modélisation de peuplements forestiers Capsis (Dufour-Kowalski et al. 2011). Le modèle de culture STICS (Brisson et al. 1998) simule les cycles de l'eau, du carbone et de l'azote à un pas de temps quotidien à l'échelle du système de culture. Sa robustesse et sa précision ont été largement évaluées dans une large gamme de conditions pédoclimatiques (Plaza-Bonilla et al. 2017, 2018; Coucheney et al. 2015). Le modèle Hi-sAfe dans son ensemble est en cours d'évaluation ; une description précise est disponible dans (Dupraz et al. 2019), Nous ne présenterons ici que les éléments nécessaires à la compréhension des résultats et de leurs limites.

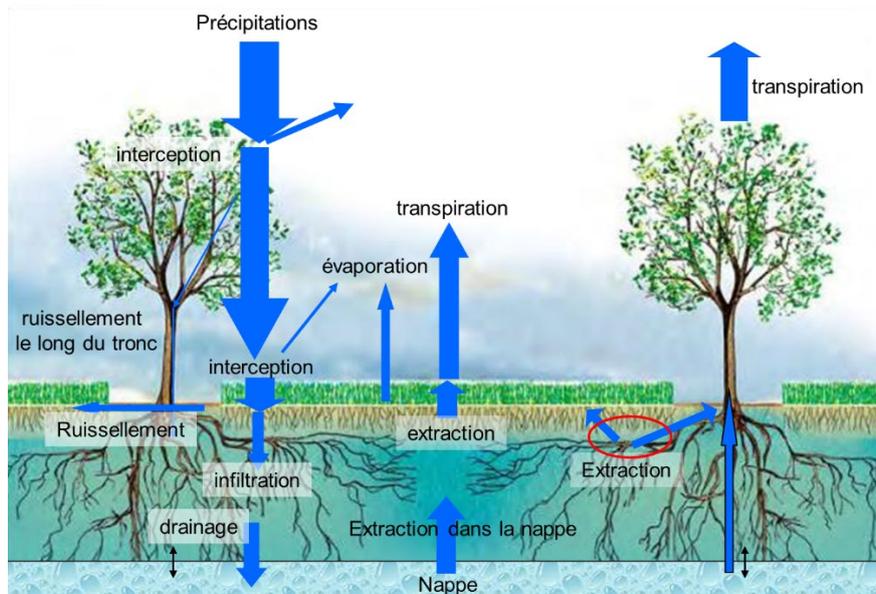


Figure 4 : Le cycle de l'eau dans une parcelle agroforestière

Le cycle de l'eau est bien représenté dans Hi-sAFe (Figure 4) : le modèle représente les éléments classiques du bilan hydrique (précipitation, ruissellement, infiltration, transpiration, évaporation, drainage), mais également l'interception avec évaporation directe sur le feuillage (des arbres et des cultures), le ruissellement le long du tronc qui concentre les précipitations à la base du tronc, les entrées d'eau via la nappe phréatique (dont la hauteur est une variable de forçage), et bien entendu la compétition pour l'eau entre les arbres et les cultures. L'extraction d'eau par chaque plante (arbre ou couvert présent dans une cellule) est calculée par intégration du potentiel de flux matriciel, ce qui permet de prendre en compte l'hétérogénéité de la répartition des racines et de la teneur en eau du sol (de Willigen 1987; de Willigen et al. 2000). Le ruissellement est moins bien représenté : il n'y a pas d'impact de la pente sur le ruissellement (le seul impact de la pente dans le modèle concerne la position de l'ombre projetée (par les arbres et le couvert des cultures des cellules voisines)). De plus, la prise en compte de l'état de surface est assez fruste.

De même, le modèle prend en compte tous les éléments essentiels du cycle de l'azote : apports par la fertilisation azotée, la déposition atmosphérique (sèche et humide) et l'extraction dans la nappe, extraction par les racines des arbres et des cultures, la minéralisation des résidus (litière aérienne (feuilles des arbres), racines fines des arbres, résidus de culture), la remobilisation par les microorganismes du sol, l'export par la récolte, la lixiviation. L'algorithme de compétition pour l'azote prend en compte l'effet de la concentration en azote de chaque voxel, sa teneur en eau (car l'humidité facilite la diffusion) et la densité racinaire.

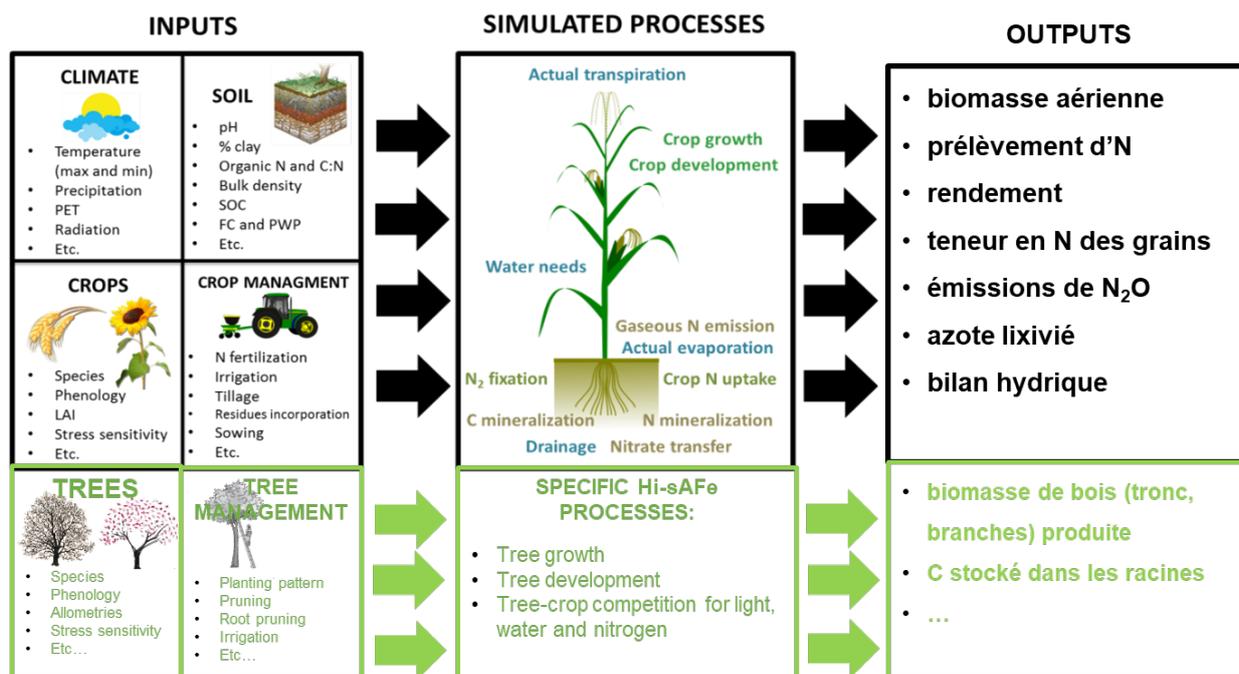


Figure 5 : entrées, sorties et processus pris en compte dans Hi-sAFe (en noir : entrées, sorties et processus de STICS, en vert entrées, sorties et processus de Hi-sAFe)

Le modèle prend en compte les effets de toutes les principales pratiques culturales des cultures (choix de l'espèce bien évidemment et même, pour certaines espèces, de la variété, date et type de travail du sol, date et densité de semis, irrigation, fertilisation) et des arbres (éclaircie, élagage, cernage racinaire, irrigation, fertilisation) à l'exception des pratiques de contrôle des bioagresseurs, qui ne sont pas représentés dans le modèle. Les conditions pédo-climatiques sont représentées par des données journalières de température, humidité de l'air, précipitation, radiation, et par une description très fine du sol, avec, entre autres, son pH, le rapport C/N de l'humus, et pour chaque couche du sol (jusqu'à 5 couches de sol possibles), la texture, la teneur en matière organique, en calcaire actif, la quantité et le type de cailloux, l'infiltrabilité à la base de la couche. Ce grand niveau de détail dans les données d'entrées permet de représenter une grande diversité de systèmes, dans une large gamme de conditions pédo-climatiques.

Le modèle Hi-sAFe est en évolution constante, et le projet ARBRISSEAU a participé au passage de la version 3 à la version 4.2. Cette évolution a concerné d'une part l'adaptation du modèle suite au passage de la version 5 à la version 8 de STICS (permettant, entre autres, une meilleure représentation des apports en azote et de la dynamique de minéralisation des résidus de culture), et d'autre part l'ajout des formalismes pour représenter (i) plusieurs cohortes de feuilles d'arbres afin de pouvoir simuler des arbres à feuilles persistantes, (ii) la fixation d'azote atmosphérique par l'arbre afin de pouvoir simuler des arbres fixateurs, (iii) le compartiment fruit de l'arbre (ainsi qu'une échelle phénologique reproductive, les formalismes déterminant le nombre de fruits et les règles d'allocation du carbone aux fruits) afin de pouvoir simuler des arbres fruitiers, (iv) la sensibilité de la photosynthèse de l'arbre à la température afin de mieux prévoir l'impact du changement climatique, (v) les précipitations sous forme de neige afin de pouvoir tester l'impact d'un climat montagnard ou continental sur la dynamique d'eau et d'azote au moment de la fonte des neiges. Les simulations réalisées dans le cadre du projet ont également été l'occasion de détecter et de corriger des bugs concernant le calcul des stocks d'eau et d'azote dans des situations qui n'avaient pas encore été testées, telles que les cultures pérennes (initialisation, fauche, enchaînement des années), la présence de cailloux (initialisation de la teneur en eau), l'extraction d'azote dans la nappe phréatique, la prise

en compte de l'azote contenu dans la souche de l'arbre, ainsi que des bugs liés aux arrondis lors des calculs d'agrégation/désagrégation lors du passage du formalisme STICS (mini-couches) au formalisme Hi-sAFé (voxels).

C. Simulations

Un premier ensemble de simulations a été réalisé sur la parcelle de Restinclières, Hérault, dans laquelle les arbres (plantés en 1995) sont matures et impactent fortement le bilan hydrique, azoté, et au final le rendement des cultures ; ces simulations ont permis de comparer les sorties du modèle aux données observées expérimentalement.

Ensuite, nous avons réalisé des simulations sur les six sites sélectionnés dans la partie A.1. Ces simulations ont été réalisées en trois étapes :

- simulation de la rotation en agriculture sans arbre, pour comparaison avec les rendements attendus dans la région (ou observés lors des expérimentations menées dans le cadre du projet) afin de vérifier si le modèle se comporte comme attendu en système agricole « classique ».
- simulation de la même rotation en agroforesterie, pour comprendre les mécanismes par lesquels la présence des arbres modifie le bilan hydrique et azoté des parcelles
- expérimentation virtuelle faisant varier systématiquement la densité d'arbre et la distance entre les arbres, pour tenter d'identifier les meilleures configurations pour maximiser les bénéfices de l'agroforesterie tout en maintenant une production agricole acceptable

Enfin, nous avons testé l'effet protecteur de l'agroforesterie face au changement climatique dans une association noyers-blé dur, en prenant comme exemple le site de Restinclières.

III. Résultats

A. Vérification du modèle par comparaison avec les données expérimentales

1. Rendement des cultures

Une vérification importante du modèle est sa capacité à prédire le rendement des cultures, que ce soit dans une parcelle agricole ou dans une parcelle agroforestière. Cette vérification a été faite sur la parcelle de Restinclières, pour laquelle nous disposons de mesures du rendement chaque année depuis la plantation des arbres en 1995. Cette base de données de longue durée est unique. La calibration du modèle a été faite en utilisant uniquement les données de croissance des arbres, et en calibrant les paramètres qui gouvernent cette croissance. Nous pouvons donc légitimement vérifier le modèle en comparant ses prédictions de rendement des cultures aux valeurs observées.

Nous le faisons ici en comparant les rendements observés et simulés du blé dur, principale culture de la rotation à Restinclières (Figure 6). Nous disposons de 8 années d'observation de cette culture de blé dur, en parcelle agricole et en parcelle agroforestière. A l'exception de l'année 2012, pendant laquelle le modèle surestime nettement les rendements, on observe un bon comportement du modèle, qui prédit bien le rendement en culture pure, et la réduction du rendement du blé dur en agroforesterie. Rappelons qu'on ne peut pas attendre une coïncidence parfaite, car le modèle ne tient pas compte des maladies et ravageurs de la culture, ce qui peut expliquer les rendements prédits trop élevés certaines années. Mais l'important est que le modèle est apte à représenter l'impact des arbres sur les cultures, ce qui est une condition essentielle pour l'utiliser.

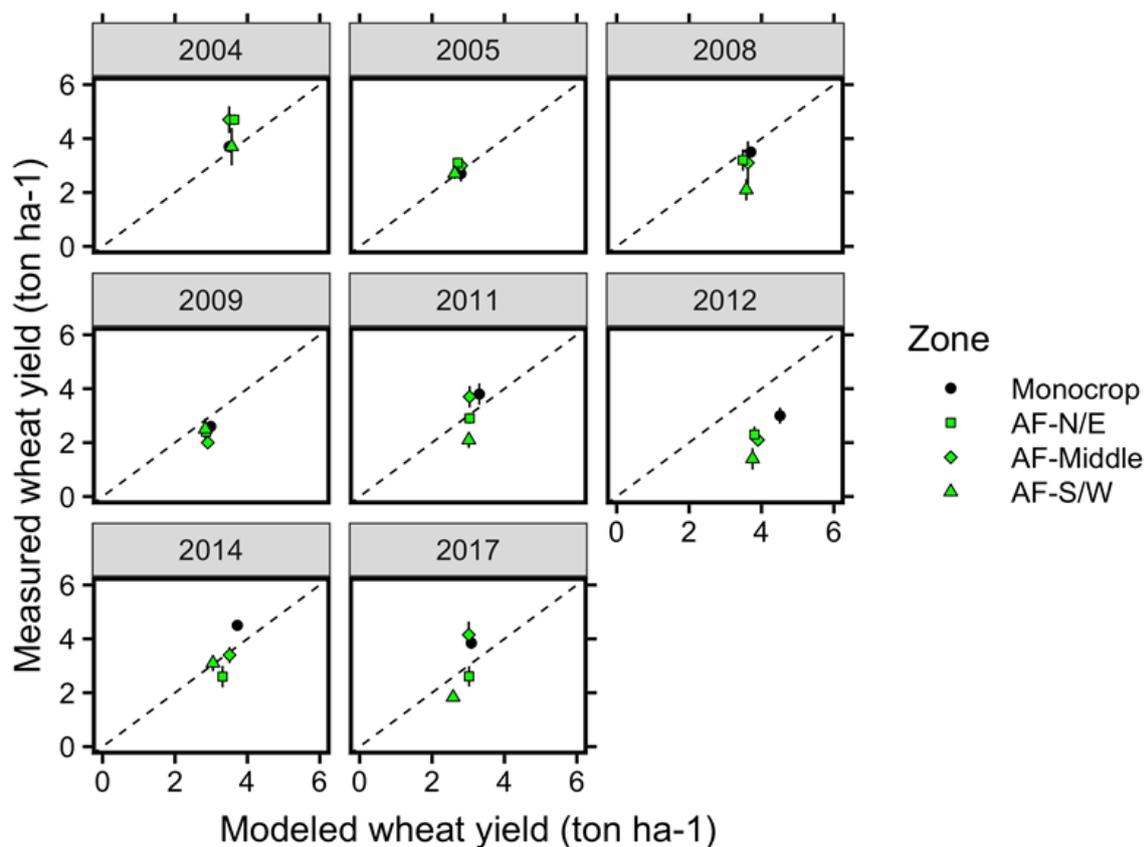


Figure 6 : Comparaison des rendements observés et prédits par le modèle Hi-sAFe pour la culture de blé dur à Restinclières

2. Bilan hydrique

Afin de tester la capacité du modèle à bien rendre compte des relations hydriques entre les arbres et la culture, nous avons réalisé une expérimentation sur une culture de maïs, en modulant la quantité d'eau apportée par l'irrigation, avec trois modalités :

- Modalité « Opt » (irrigation optimale) : déclenchement de l'irrigation dès l'apparition de symptômes de stress hydrique (enroulement des feuilles)
- Modalité « Min » (irrigation minimale) : déclenchement de l'irrigation lorsque plus de 50% des plantes présentaient des symptômes de stress hydrique
- Modalité « Nolr » : pas d'irrigation

Ces trois modalités ont été appliquées dans deux parcelles de Restinclières (A2 et A3) dans lesquelles des noyers hybrides avaient été plantés en 1995. La densité d'arbres actuelle est de 96 arbres/ha (13 m entre les lignes d'arbres, entre 4 et 12 m (8m en moyenne) entre les arbres le long de la ligne). Dans chacune des deux parcelles, une zone sans arbres sert de témoin « Agriculture pure ».

Le facteur « irrigation » (Opt/Min/Nolr) a donc été croisé avec le facteur « système » (AF/AG). Seule la modalité Nolr n'a pas été appliquée dans le témoin agricole de la parcelle A2, car nous avons estimé que les plantes n'y auraient pas survécu. Dix répétitions de la modalité irriguée ont été mises en place dans chaque système de chaque parcelle. Chaque répétition était pairée avec une placette qui recevait soit une irrigation réduite, soit pas d'irrigation, il y avait donc 5 répétitions pour chacune de ces modalités. La Figure 7 montre le dispositif expérimental.

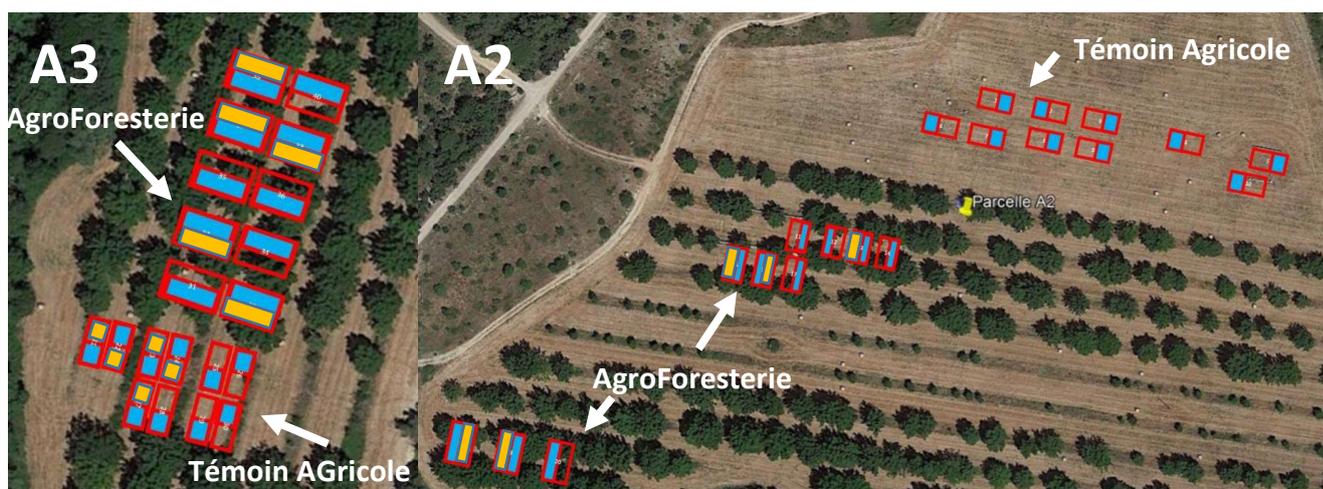


Figure 7 : dispositif expérimental pour le suivi de la culture de maïs sur le Domaine de Restinclières (Hérault) : placettes bleues = maïs irrigué, placettes oranges = irrigation réduite, placettes transparentes = non irrigué. Image de gauche : parcelle A3, image de droite : parcelle A2.

Le maïs a été semé le 6/5/2021 et récolté entre le 21/9/2021 et le 15/10/2021 (en fonction de la maturité, qui variait entre les modalités). De nombreuses observations ont été réalisées tout au long de la saison de croissance du maïs (Figure 8). Les suivis de microclimat et de température de feuilles



Figure 8 : illustration de quelques mesures réalisées lors de l'expérimentation maïs (de gauche à droite et de haut en bas) : photos hémisphériques pour caractériser l'environnement lumineux de chaque placette, taux de levée, microclimat, température des plantes, profondeur racinaire, phénologie, hauteur des plantes, rendement, composantes du rendement.

ont montré une diminution du rayonnement atteignant les plantes allant jusqu'à -70%. La température des feuilles était plus faible (jusqu'à 3 degrés C de moins) en agroforesterie qu'en agriculture pure pendant la journée, et en moyenne un degré plus chaude en agroforesterie pendant la nuit.

Les observations phénologiques ont montré un retard systématique du développement du maïs en agroforesterie par rapport à l'agriculture pure. Les parcelles non irriguées étaient par contre

systématiquement plus avancées dans le cycle. Ainsi, la floraison s'est étendue sur 4 semaines (de mi-juillet pour les plus précoces à début août pour les plus tardifs). La fin de sénescence a commencé dès début septembre pour les parcelles AG NoIrr, et jusqu'à mi-octobre pour les placettes les plus à l'ombre.

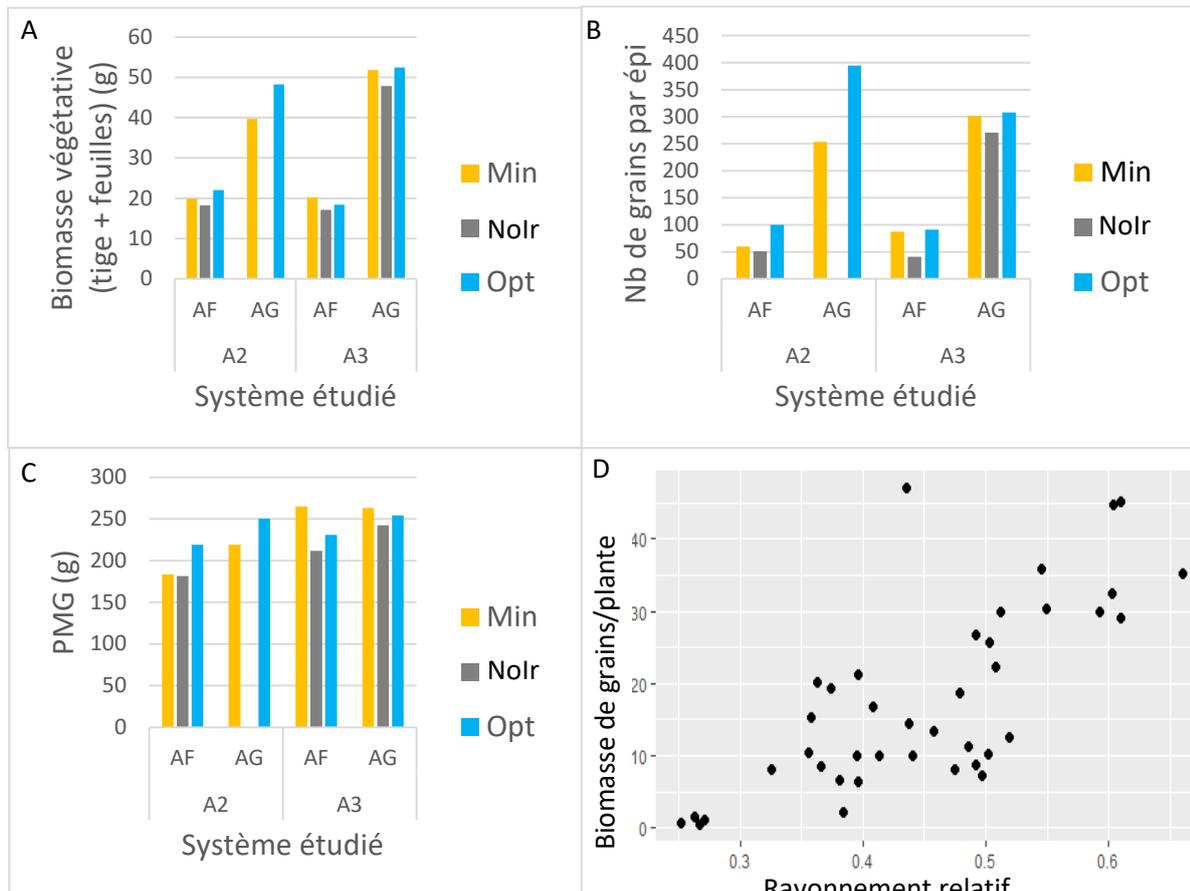


Figure 9 : Biomasse végétative du maïs (A), nombre de grains par épi (B) et poids de mille grains (C) en fonction de la modalité d'irrigation, du système et de la parcelle. Relation entre le rendement et le rayonnement relatif (D)

Les observations de rendement et de composantes de rendement montrent une très forte diminution du rendement en agroforesterie par rapport au témoin agriculture pure, quel que soit le niveau d'irrigation, et cette diminution est due à la fois à la diminution de la biomasse végétative (Figure 9A) et au nombre de grains par épi (Figure 9B), avec un effet plus limité et pas systématique sur le poids de mille grains (Figure 9C). La relation linéaire entre la biomasse de grains et le rayonnement relatif (Figure 9D) semble indiquer que le facteur limitant pour le maïs en agroforesterie a été la disponibilité de la lumière.

Ces rendements très faibles expliquent la très mauvaise efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation observée en agroforesterie (Figure 10). Nos résultats montrent donc que l'agroforesterie permet certes de diminuer les besoins en eau d'irrigation, mais que la compétition pour la lumière est bien trop importante dans ce système avec 100 noyers hybrides de 26 ans par hectare pour que la culture du maïs reste rentable. L'objectif de l'expérimentation n'était d'ailleurs pas de tester un système économiquement viable et transposable chez des agriculteurs, mais d'obtenir des données pour tester la capacité du modèle à simuler les compétitions entre des arbres et une culture d'été, ce qui n'avait encore jamais été fait.

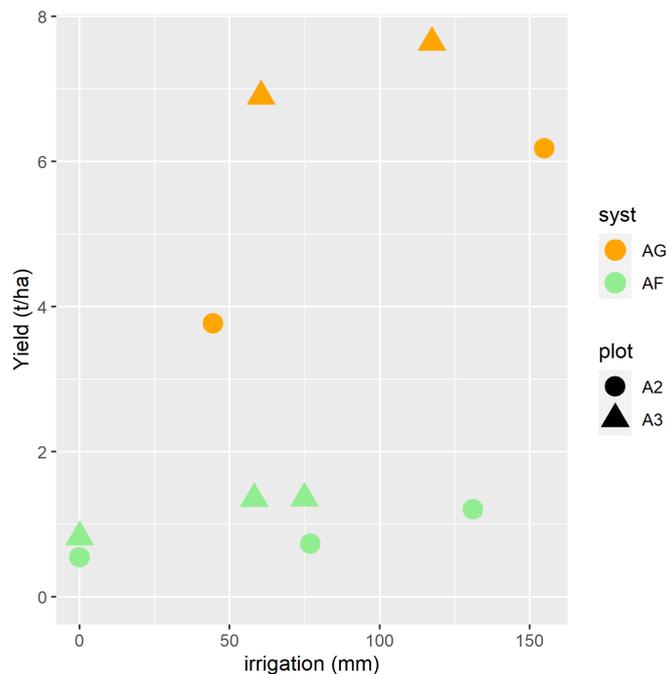


Figure 10 : Rendement en fonction de l'eau d'irrigation apportée en agroforesterie (AF) et en témoin agriculture pure (AG), dans les parcelles A2 et A3 du domaine de Restinclières

Malheureusement, les comparaisons entre les données observées et simulées montrent une mauvaise capacité prédictive du modèle. La variété de maïs utilisée dans l'expérimentation (Distinxxion) n'étant pas paramétrée par défaut dans le modèle STICS, cette comparaison se base sur une démarche de simulation en plusieurs étapes :

- 1) Calibration des paramètres variétaux (en particulier ceux contrôlant la phénologie et le poids maximal des grains) en se basant sur les observations du témoin agriculture pure avec irrigation optimale de la parcelle A3
- 2) Simulation des autres modalités en gardant les mêmes valeurs de paramètres, en faisant varier les caractéristiques de la parcelle (entre les parcelles A2 et A3) et l'irrigation (en mettant les dates et volumes d'irrigation réellement appliqués)
- 3) Comparaison entre données observées et simulées pour les variables mesurées : LAI, biomasse, rendement, profondeur d'enracinement, nombre de grains, poids d'un grain.

La calibration sur la modalité A3 AG Opt permet de très bien reproduire le LAI, la biomasse, le rendement (Figure 11), la profondeur d'enracinement. Elle surestime un peu le nombre de grains et sous estime beaucoup le poids d'un grain. Ces deux erreurs sont liées puisque dans STICS le poids d'un grain est calculé en divisant le rendement par le nombre de grains.

Le modèle ainsi calibré représente plutôt bien la situation en A3 AG Min (qui est en fait très proche de A3 AG Opt). Par contre, il ne reproduit pas la baisse de rendement mesurée dans le traitement non irrigué en A3 AG. Cette baisse est significative sur le LAI, la biomasse et le rendement (moins 30 à 40%) dans les données observées, mais il semble que le modèle ne parvienne pas à prédire ce stress hydrique. Les simulations ne sont pas non plus satisfaisantes pour le système en agriculture pure dans la parcelle A2 : le modèle surestime largement le rendement dans cette parcelle. Ce peut être en partie dû aux fortes infestations d'adventices dans cette parcelle (or le modèle ne représente pas les bioagresseurs), ce que semble confirmer le fait que le rendement était mieux prédit dans les deux placettes dans lesquelles les infestations d'adventices étaient les plus faibles. Mais on observe la même

sous-estimation de l'effet de la sécheresse pour le traitement peu irrigué. Il n'y avait pas de traitement non irrigué en A2 dans l'expérimentation terrain (nous avons jugé que c'était impossible, les plants seraient morts), donc on a pas de valeur de terrain à comparer au modèle, mais le modèle prévoit un rendement similaire à la modalité Min.

Sans surprise étant donnée la faible capacité prédictive du modèle en témoin agriculture pure, le modèle ne prédit pas non plus correctement le comportement du maïs agroforestier. Le modèle surestime tout : le LAI, la biomasse, le rendement. Cela peut venir d'un mauvais calcul de la compétition lumineuse des arbres, d'un mauvais calcul de la compétition souterraine des arbres dû à une mauvaise représentation des racines de l'arbre adulte dans la simulation d'initialisation sur 25 ans, d'un problème dans le formalisme de la conversion lumière/biomasse aux faibles éclaircissements dans STICS. De plus amples analyses seront nécessaires pour identifier la cause de ce problème, et donc de savoir si seul le maïs est mal représenté dans le modèle, ou s'il y a un problème plus fondamental dans les formalismes.

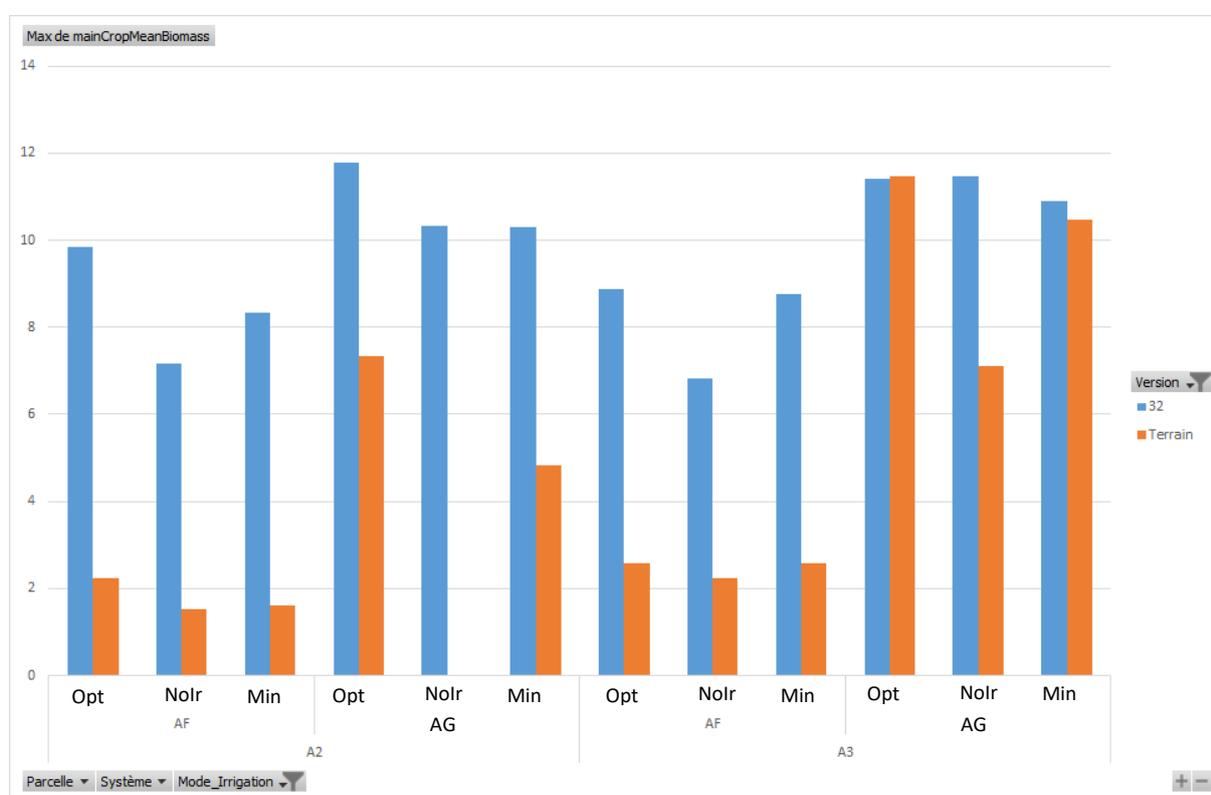


Figure 11 : Comparaison des biomasses de maïs simulées (en bleu) et observées (en orange) en fonction de la parcelle, du système et de la modalité d'irrigation.

3. Bilan azoté

Afin de tester la capacité du modèle à bien rendre compte de la compétition pour les ressources azotées entre les arbres et la culture, nous avons réalisé une expérimentation sur une culture de blé tendre l'année suivante, en profitant du fait que le maïs avait été surfertilisé (car son rendement réel a été très largement inférieur au rendement attendu). Seules les placettes de maïs avaient été implantées et donc fertilisées en 2021, le reste de la parcelle étant resté en jachère, donc sans apport d'azote. Il est donc possible de mesurer l'impact de ce précédent sur le blé, à la fois dans le témoin agricole et dans les parcelles agroforestières.

Un mélange de trois variétés anciennes de blé tendre (Rouge de Bordeaux, Touzelle et Epeautre) a été semé le 23/11/2021 et récolté le 30/06/2022. Le rendement a été globalement faible (14 qx/ha en TA,

7 qx/ha en AF), notamment suite à une pluviométrie très déficitaire, mais aussi à une infestation par les mauvaises herbes de la parcelle. Il s'agissait en effet d'une culture en agriculture biologique (conversion en cours des parcelles de Restinclières), avec des variétés anciennes qualitatives à faible potentiel.

Tableau 2 : Réduction du rendement du blé tendre par la compétition des arbres en agroforesterie (2022) (Ratio Rendement en AF/Rendement en TA)

Parcelle	Précédent	
	Jachère	Maïs
A2	0.68	0.47
A3	0.37	0.46
Moyen	0.59	0.46

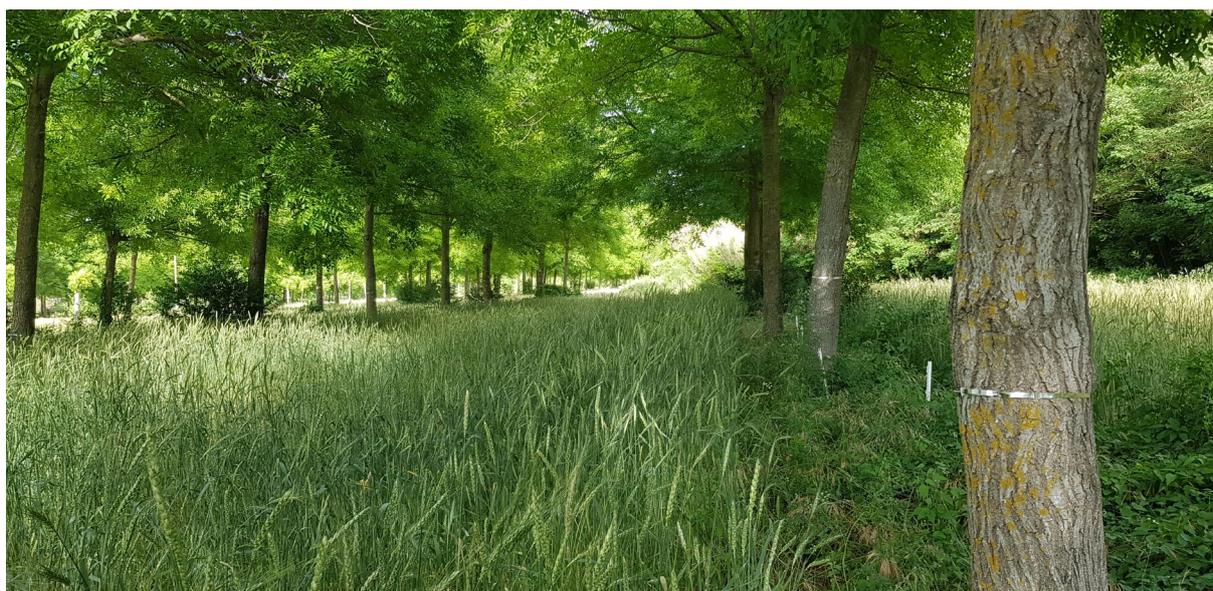


Figure 12 : Fort développement végétatif du blé tendre en agroforesterie derrière le précédent maïs (en haut : 2 avril 2022 ; en bas : 8 juin 2022). L'impact du précédent est variable, suggérant une hétérogénéité forte des reliquats d'azote

Le précédent maïs (que nous assimilons à un effet reliquat d'azote) a bien eu un fort impact sur la croissance végétative et le rendement du blé. L'observation du blé confirme bien qu'il s'agissait d'un puissant effet azote (couleur des feuilles, vigueur). Cet effet azote a été beaucoup plus puissant dans les parcelles agricoles (+74% de rendement) que dans les parcelles agroforestières (+68%), mais on note une forte différence entre les deux parcelles. La parcelle A3 est plus favorable au précédent maïs que la parcelle A2.

Tableau 3 : Effet du précédent maïs sur le rendement du blé tendre en 2022 à Restinclières (ratio précédent maïs/précédent jachère)

Parcelle	AF	TA
A2	1.19	1.72
A3	2.17	1.74
Moyen	1.68	1.73

Cependant, il est évident que les reliquats d'azote étaient fortement variables d'une placette à l'autre, du fait de l'hétérogénéité des rendements observés en 2022 sur le maïs et de l'hétérogénéité de la compétition racinaire des arbres (arbres de tailles variables, distance aux arbres variable). Il est donc difficile de dire si toutes les placettes avec précédent maïs étaient en situation d'absence de stress azoté. Cette comparaison est cependant instructive : les résultats montrent que l'azote était un facteur très limitant dans cette parcelle conduite en bio sans apport d'engrais organique, aussi bien en témoin agricole qu'en situation agroforestière. Il sera donc très intéressant de faire des simulations avec le modèle Hi-sAFe pour évaluer l'aptitude du modèle à prévoir ce comportement. Ces simulations n'ont pas encore été réalisées pour cette expérimentation.

Nous avons néanmoins réalisé une analyse de sensibilité du modèle aux conditions d'initialisation des sols en matière organique (paramètre OrganicNitrogen de Stics). Les résultats montrent qu'il faut une bonne dizaine d'années pour qu'un équilibre s'installe (Figure 13).

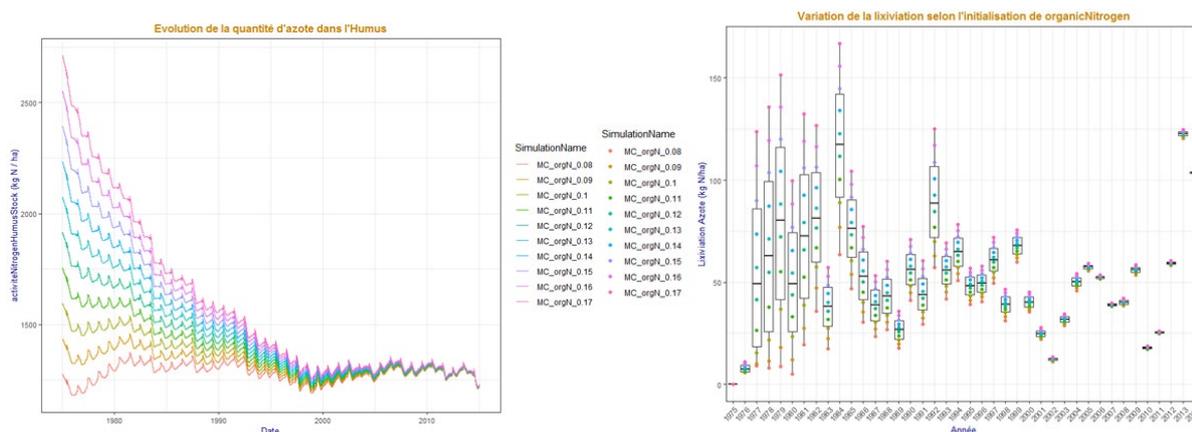


Figure 13 : Impact de l'initialisation du sol en matière organique sur l'évolution du pool d'azote dans l'humus (à gauche) et de la lixiviation (à droite) sur 40 ans (parcelle agricole, site de Restinclières)

4. Rendement des cultures sur les différents sites du réseau

Pour compléter cette vérification des prédictions du modèle, réalisée uniquement sur la parcelle de Restinclières pour l'agroforesterie, nous avons également comparé les rendements simulés en modalité agriculture pure avec les rendements observés dans les autres sites du projet ARBRISSEAU (pour lesquelles les arbres sont encore trop petits pour avoir un effet sur les cultures sur le terrain). La comparaison des rendements des cultures observés vs simulés en témoin culture agricole pure (Tableau 4) montre que le modèle a tendance à sous-estimer le rendement du blé tendre (dans 5 sites sur 6), et à surestimer le rendement du colza (en particulier sur le site de CHAM où le rendement simulé est presque le triple du rendement observé), peut-être en relation avec des fortes attaques d'insectes ravageurs (qui ne sont pas représentés dans le modèle). Le maïs est plutôt bien simulé, mais nous n'avons pas su simuler la récolte du maïs ensilage. Pour l'orge, le pois et le soja, le modèle sous-estime ou surestime le rendement selon les sites. Il est nécessaire de garder en tête cette marge d'erreur dans les simulations, qui sont dues aux incertitudes sur la description du sol de certains sites (qui n'était connu que dans l'horizon de surface), au fait que les variétés réellement utilisées dans les expérimentations diffèrent des variétés paramétrées dans le modèle, que le modèle ne prend pas en compte les pertes de rendement dues aux bioagresseurs, et plus généralement aux incertitudes concernant les paramètres et les formalismes du modèle (mais peut-être aussi aux incertitudes dans les données observées).

Tableau 4 : rendements observés et simulés sur chacun des sites et chacune de cultures, en témoin culture pure. Les données sans années sont issues d'estimations à dire d'expert ou d'expérimentations menées précédemment par le partenaire.

Site	Culture	Année observation	Rendement observé (t/ha)	Rendement simulé (t/ha)	Erreur (%)
CHAM	Blé tendre	2017/2018	5	4.1	-17
CHAM	Colza	2019/2020	1.1	3.2	194
CHAM	Orge Hiver	2018/2019	6.5	8.3	28
CHAR	Blé tendre	2017/2018	7	4.2	-40
CHAR	Colza	2016/2017	3.75	3.9	4
CHAR	Colza	2018/2019	3.3	3.4	4
CHAT	Blé Tendre	XXX	7	7.0	-1
CHAT	Maïs	XXX	9	9.9	10
CHAT	Soja	XXX	2.2	2.8	26
DIE	Blé tendre	2020/2021	6	4.2	-30
DIE	Colza	XXX	4.7	3.4	-27
DIE	Orge Hiver	XXX	6	5.3	-11
DIE	Pois	XXX	3	3.2	6
PESM	Blé Tendre	2017/2018	6.7	5.8	-13
PESM	Colza	2016/2017	4.7	5.3	13
PESM	Maïs Ensilage	2018/2019	15	NA	NA
TAB	Blé tendre	XXX	7.5	5.0	-33
TAB	Maïs	XXX	11	10.9	-1
TAB	Soja	XXX	5.2	4.2	-18

B. Bilan hydrique et azoté (et performance des cultures et des arbres) des autres parcelles

Des rapports détaillés par site ont été produits (cf exemple de TAB en annexe), nous synthétisons ici les résultats de l'analyse globale de tous les sites.

1. culture pure

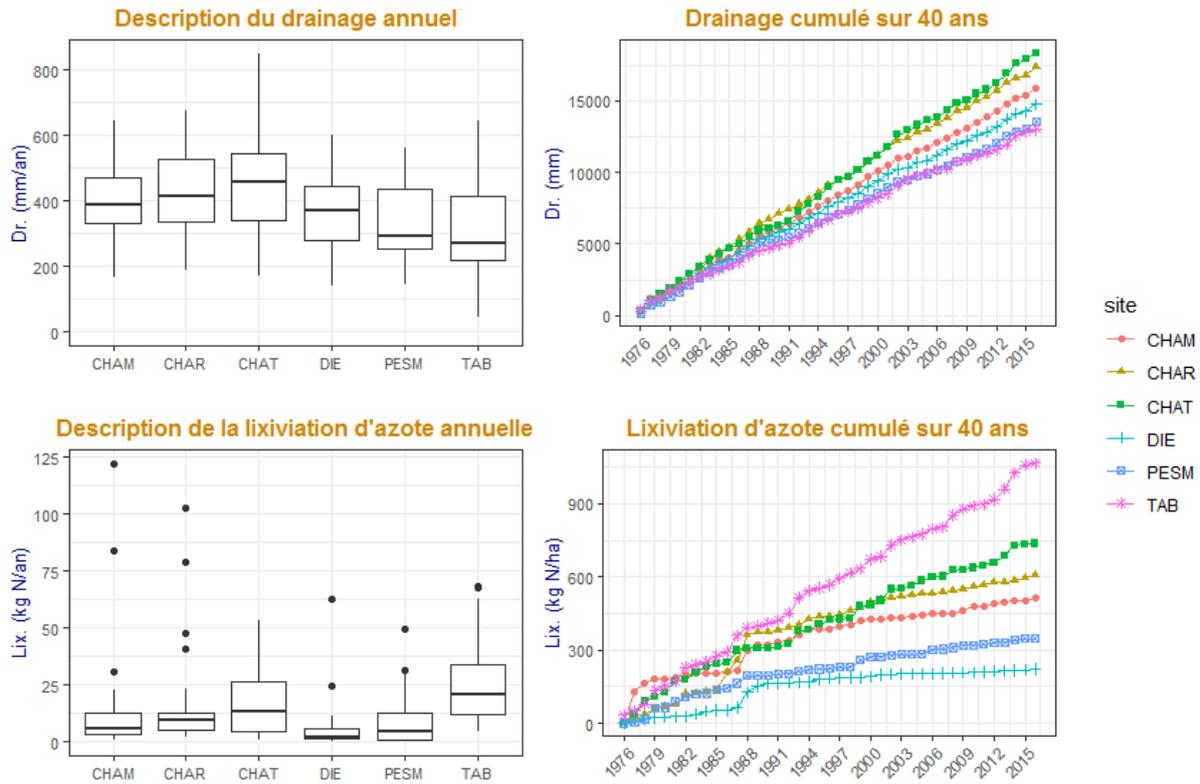


Figure 14 : Drainage et lixiviation d'azote en condition de culture pure sur les 6 sites satellites : variabilité interannuelle et cumul sur toute la période 1975-2015

La comparaison du drainage annuel entre les 6 sites (Figure 14) montre une très forte variabilité interannuelle du drainage (Figure 14a), avec néanmoins des différences notables entre sites. La lixiviation est un peu moins variable, sauf certaines années où l'on observe des pics de lixiviation. Le modèle reproduit bien l'effet de la texture du sol, ainsi la lixiviation très faible ($< 10 \text{ kg N / ha}$) du site de DIE est à mettre en lien avec son sol argileux. On peut noter que le drainage ne suffit pas à expliquer la lixiviation, qui résulte d'interactions complexes entre les pratiques culturales, l'état de la culture, et les conditions météorologiques de l'année donnée. On observe généralement une lixiviation plus forte dans les sites ayant des cultures d'été dans leur rotation (TAB, CHAT) par rapport aux sites n'ayant que des cultures d'hiver (DIE, CHAR, CHAM).

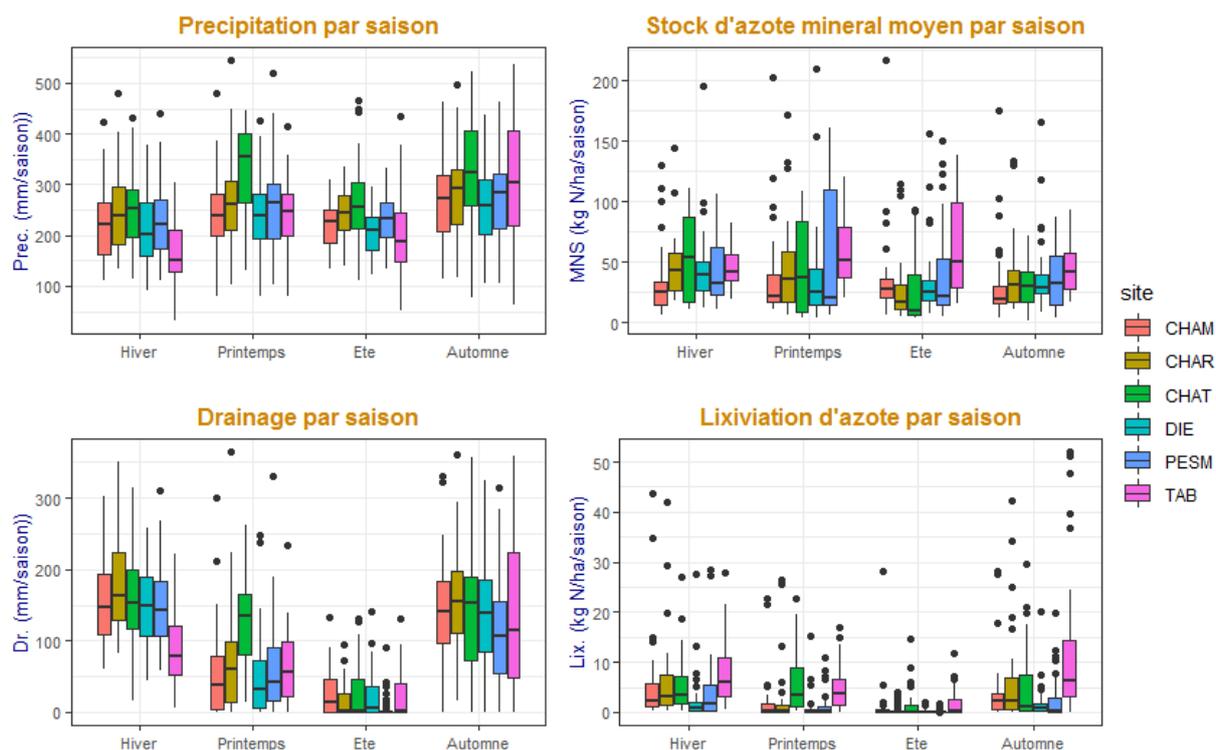


Figure 15 : Variables explicatives de la lixiviation d'azote par saison, dans chacun des 6 sites satellites.

L'un des avantages du modèle Hi-sAFE, c'est qu'il simule le fonctionnement de la parcelle au pas de temps journalier, on peut donc décomposer l'année de façon à mieux discerner les effets climatiques des effets liés à la culture. On voit ainsi dans la Figure 15, que selon les sites la lixiviation s'explique plutôt par une forte pluviométrie et fort drainage (par exemple le site de CHAT au printemps), ou par des stocks d'azote minéral importants (par exemple TAB en automne, hiver, printemps).

2. Agroforesterie

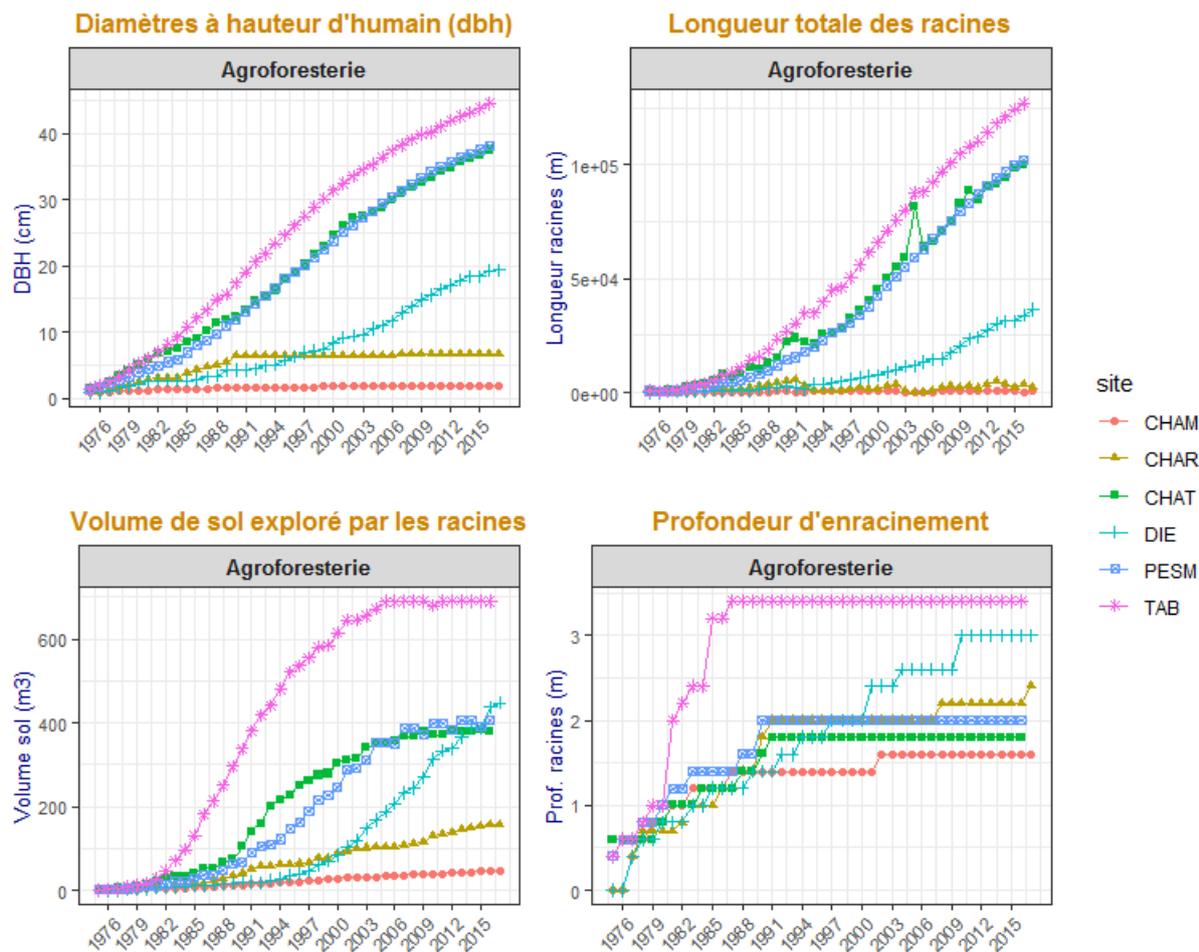


Figure 16 : a) Dynamique du diamètre du tronc des arbres simulés sur les 40 ans de simulation dans chacun des 6 sites satellites. b) longueur cumulée de racines fines par arbre, c) volume de sol exploré et d) profondeur racinaire.

Avant d'analyser en détail l'impact de l'agroforesterie sur le bilan hydrique et azoté des parcelles, il convient de vérifier que les simulations conduisent à un développement raisonnable des arbres. La Figure 16 montre que c'est le cas pour les sites CHAT, DIE, PESM et TAB, mais pas pour les sites CHAM et CHAR : pour ces deux derniers sites, les arbres ont un développement très limité avec un diamètre à hauteur de poitrine (DBH) inférieur à 10 cm. La croissance de l'arbre est fortement contrainte par les caractéristiques du sol du site CHAM : bien que la profondeur totale du sol soit de 3m, la présence d'une couche caillouteuse limite la profondeur racinaire à 1m60 de profondeur. Pour le site de CHAR, nous n'avons pas réussi à déterminer ce qui cause l'arrêt de la croissance des arbres, mais c'est lié à la présence des cultures ; en effet les simulations en témoin forestier (arbres sans culture) montrent une croissance des arbres normale. Quoi qu'il en soit, les arbres simulés sont trop petits sur ces deux sites pour avoir un effet sur le bilan hydrique, et nous ne présenterons dans la suite que les résultats sur les quatre autres sites.

Pour les quatre sites ayant une bonne croissance des arbres, la présence d'arbres matures modifie notablement le bilan hydrique et azoté. Le Tableau 5 indique les différences agroforesterie-culture pure (en % de la culture pure) avec des arbres de 40 ans.

Tableau 5 : Drainage (Dr.), lixiviation (Lix.), ruissellement (Ruis.), évaporation (Evap.), rendement (Rdt.), biomasse (Biom.), transpiration (Tr.), consommation d'azote (N.up), stress azoté (Stress N.), stress hydrique (Stress H.), rayonnement intercepté par la culture (Rayt.) en pourcentage de réduction en agroforesterie par rapport à la culture pure. Les valeurs correspondent à la moyenne annuelle sur les six dernières années de simulation (afin d'avoir deux (trois pour CHAR) itérations de la rotation et ainsi gommer la variabilité climatique et la variabilité entre cultures).

Site	Rdt.	Biom.	Tr.	N.up	Evap.	Ruis.	Dr.	Lix.	Stress N.	Stress H.	Rayt.
CHAT	-24.7	-25.8	-32.8	-18.4	-11.6	-18.4	11.5	-32.2	-15.2	-45.2	-42.2
DIE	-23.3	-16	-11.6	-15.1	0.1	-3.9	-1.5	-2.7	2	25.3	-16.1
PESM	-18.4	-21.3	-23.9	-20.4	-13.2	-22.9	4	-21.4	-4.7	-35.2	-34.7
TAB	-21.9	-25.4	-35.3	-11.4	-13.9	-16.8	1.5	-60.1	-21.7	-23.8	-43.5

On observe qu'à CHAT, PESM et TAB, la présence d'arbres réduit l'évaporation, la transpiration, le ruissellement et la lixiviation. Il n'y a pas de grosse modification du drainage. A DIE, il y a peu d'effet des arbres sur le bilan hydrique/azoté (l'arbre y est 2 fois plus petit). Le rendement des cultures est toujours diminué (de -18 à -25 %), mais la diminution du rendement est moins importante que la diminution du rayonnement sur les sites de CHAT, PESM et TAB, grâce à la réduction du stress des cultures, en particulier le stress hydrique. Il n'y a que sur le site de DIE que le stress hydrique est augmenté, et dans ce cas la perte de rendement est supérieure à la diminution du rayonnement, ce qui indique que, pour ce site, le facteur limitant n'est pas la lumière, mais l'eau.

Mais ces effets se mettent en place progressivement au cours de la croissance des arbres. La Figure 17 présente un diagramme temporel montrant la mise en place progressive des différences entre l'agroforesterie et la culture pure pour le drainage, la lixiviation, les stocks d'eau et d'azote dans le sol, en prenant comme exemple le site de PESM.

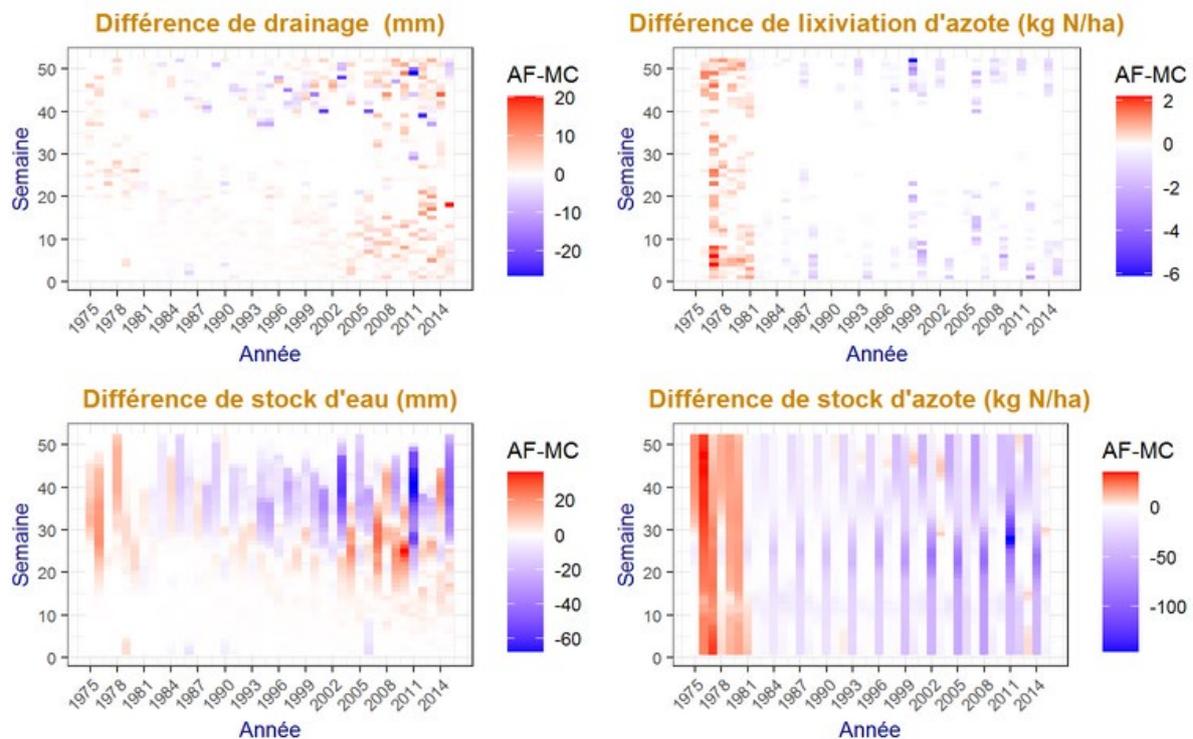


Figure 17 : Diagramme temporel (en abscisse, les années, en ordonnée, les semaines dans l'année) des différences entre agroforesterie et culture pure (en rouge : AF > CP, en bleu AF < CP) pour a) le drainage, b) la lixiviation d'azote, c) le stock d'eau dans le sol et d) le stock d'azote minéral dans le sol, pour le site de PESM (rotation : Maïs ensilage – Blé tendre – Colza)

On voit que lorsque l'arbre est petit (<6 ans) les effets sont dus uniquement à la présence d'une bande non semée (le linéaire sous-arboré), sur laquelle, dans nos simulations le sol est nu pendant les 3 premières années, et donc très sensible à la lixiviation, puis un enherbement permanent est mis en place. Ce diagramme illustre bien l'impact de la rotation des cultures, et en particulier l'importance de la complémentarité temporelle entre les arbres et les cultures : les années où la culture est du maïs (barres bleues dans la Figure 17d), le stock d'azote est très inférieur en agroforesterie par rapport au maïs pur, car les arbres et le maïs sont en forte compétition pour l'azote. La présence des arbres réduit la lixiviation principalement les années où il y a du blé tendre (Figure 17b). L'agroforesterie décale la saison de drainage de l'automne à la fin de l'hiver.

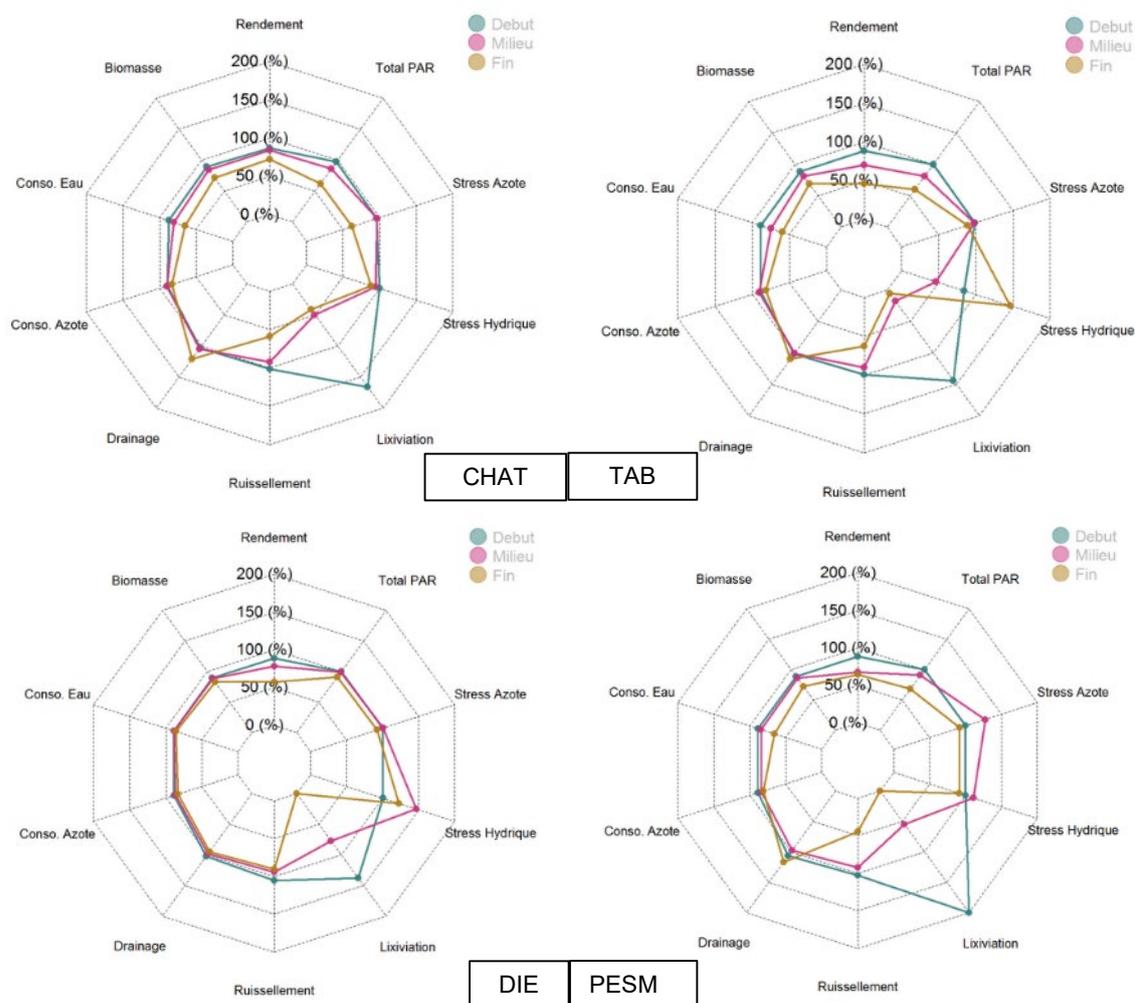


Figure 18 : indicateurs de performance du système agroforestier (en pourcentage par rapport au témoin agriculture pure) pour quatre sites du bassin RMC au début (années 8 à 13), au milieu (années 18 à 23) et à la fin (années 36 à 41) du cycle de croissance des arbres.

Les indicateurs de performance calculés pour chaque site à trois périodes dans le cycle de croissance des arbres (Figure 18) montrent une diminution de la lixiviation et du ruissellement, en moyenne sur l'ensemble du cycle, mais une augmentation transitoire de la lixiviation au début (effet de la bande non cultivée). Le drainage est augmenté dans deux des quatre sites simulés. Malgré la réduction des stress azotés (sauf à PESM) et hydriques (sauf à DIE, et TAB en fin de cycle), on observe une forte réduction de la biomasse et du rendement des cultures.

Les effets positifs de l'agroforesterie en termes de lixiviation et de ruissellement s'accompagnent donc d'un coût en termes agronomiques. Mais on voit qu'il n'y a pas de relation linéaire entre la taille des arbres, la réduction du rayonnement, la réduction du rendement et la réduction de la lixiviation et du ruissellement. Il est donc peut-être possible de trouver des optimums en termes de densité de plantation et/ou de design de la parcelle (largeur des allées, densité d'arbres le long des lignes d'arbres) qui permettraient de maximiser les bénéfices environnementaux de l'agroforesterie tout en maintenant un rendement acceptable.

3. Expérimentation virtuelle : design des parcelles

Nous avons donc réalisé une expérimentation virtuelle pour tester, dans chaque site, quatre modalités de plantation d'arbres, correspondant à trois densités d'arbres (30, 50 et 70 arbres par hectare) et deux distances intra-ligne entre les arbres (5m et 7m), ce qui aboutit à des distances entre lignes d'arbres de 29, 47 ou 65 m :

- 7x47 ~ 30 arbres / ha
- 7x29 ~ 50 arbres / ha
- 5x65 ~ 30 arbres / ha
- 5x29 ~ 70 arbres / ha

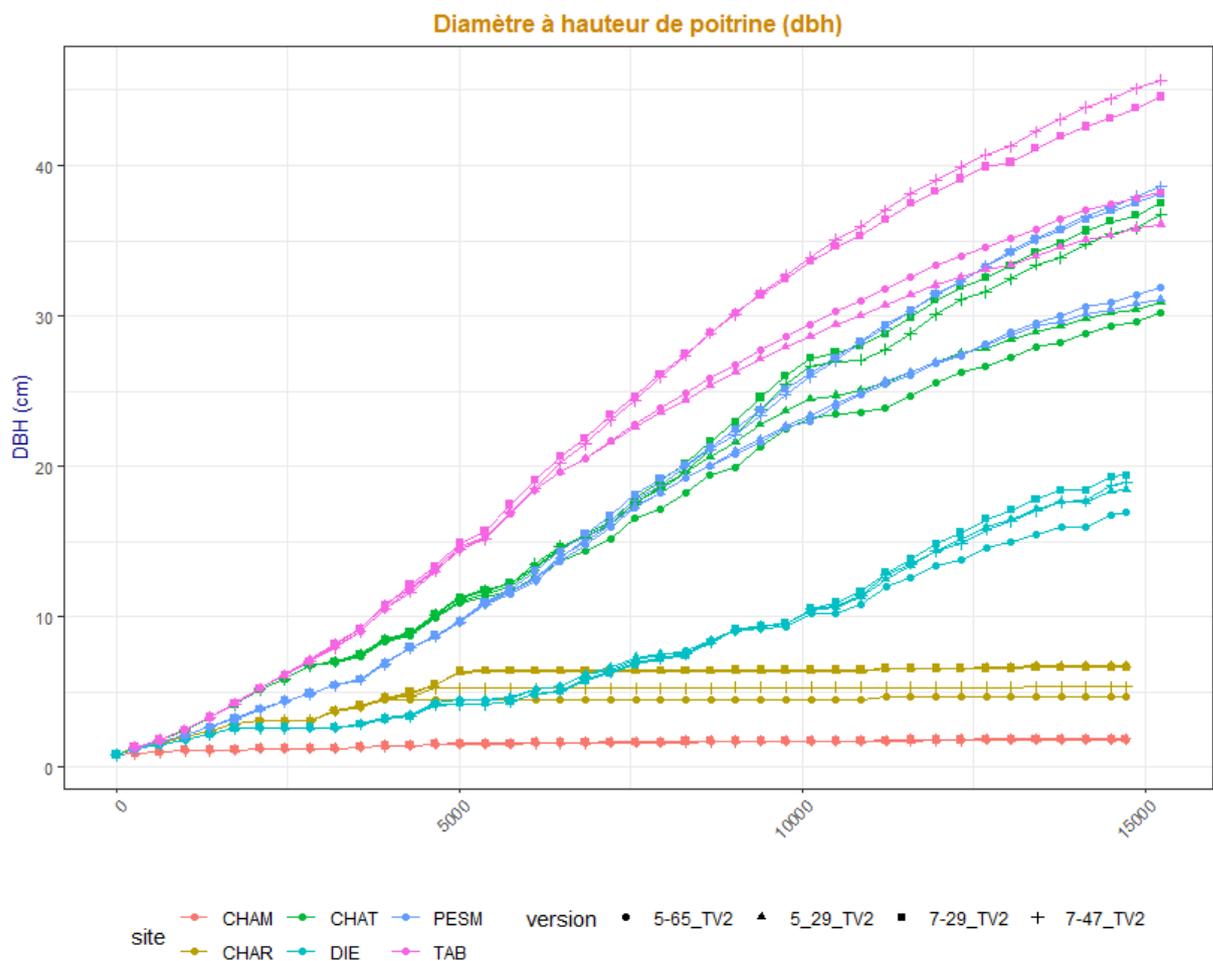


Figure 19 : effet du design spatial de la parcelle sur la croissance des arbres dans les six sites du projet ARBRISSEAU (6 couleurs). Ronds : plantation en 5m entre arbres le long de la ligne x 65m entre lignes (environ 30 arbres/ha), triangles : 5x29 (environ 70 arbres/ha), carrés : 7x29 (env. 50 arbres/ha), croix : 7x47 (env. 30 arbres/ha).

La croissance en diamètre des arbres en fonction du design de plantation (Figure 19) montre un fort effet de la proximité entre arbres d'une même ligne sur la croissance de l'arbre : comparez croix et carrés d'une part (7 m de distance le long de la ligne) et triangles et ronds d'autre part (5 m de distance le long de la ligne). On n'observe par contre pas d'effet systématique de la densité d'arbres : à distance intra-ligne égale, le passage de 30 à 70 arbres/ha (rond à triangle) a un effet négatif sur le site de TAB, aucun effet sur le site de PESM, et même un effet positif sur les sites de DIE et CHAT). Ces résultats montrent que la croissance de l'arbre est fortement limitée par la compétition inter-arbres lorsqu'ils sont trop serrés sur la ligne.

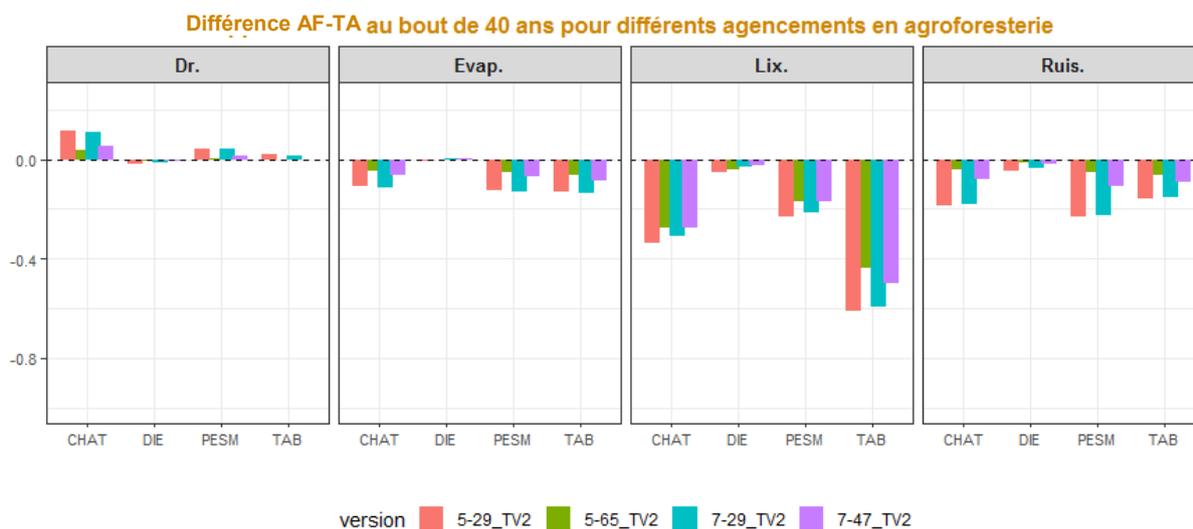


Figure 20 : Différence en termes de variables des bilans hydrique et azoté entre agroforesterie (arbres de 40 ans environ) et témoin agriculture pure pour quatre agencements spatiaux des arbres (distance entre arbres le long de la ligne _ distance entre lignes), dans quatre sites du bassin RMC.

A l'inverse, les résultats concernant les termes du bilan hydrique (drainage, évaporation, ruissellement) montrent en général un effet plus important de la largeur de l'allée cultivée. On observe ainsi dans la Figure 20 un effet plus faible de l'agroforesterie en 5x65 (vert) qu'en 7x47 (violet), à densité d'arbres égales, alors que les effets sont similaires entre 7x29 (bleu) et 5x29 (rouge) alors que la densité passe de 50 à 70 arbres/hectares. Cette tendance n'est pas systématiquement présente dans tous les sites ni pour toutes les variables, mais on l'observe pour le ruissellement et l'évaporation à CHAT, PESM et TAB, le drainage à CHAT.

Pour la lixiviation, il n'y a pas de tendance claire qui se dégage : la largeur de l'allée a plus d'effet que la densité sur le site de TAB, mais c'est l'inverse qui se produit pour le site de CHAT et PESM.

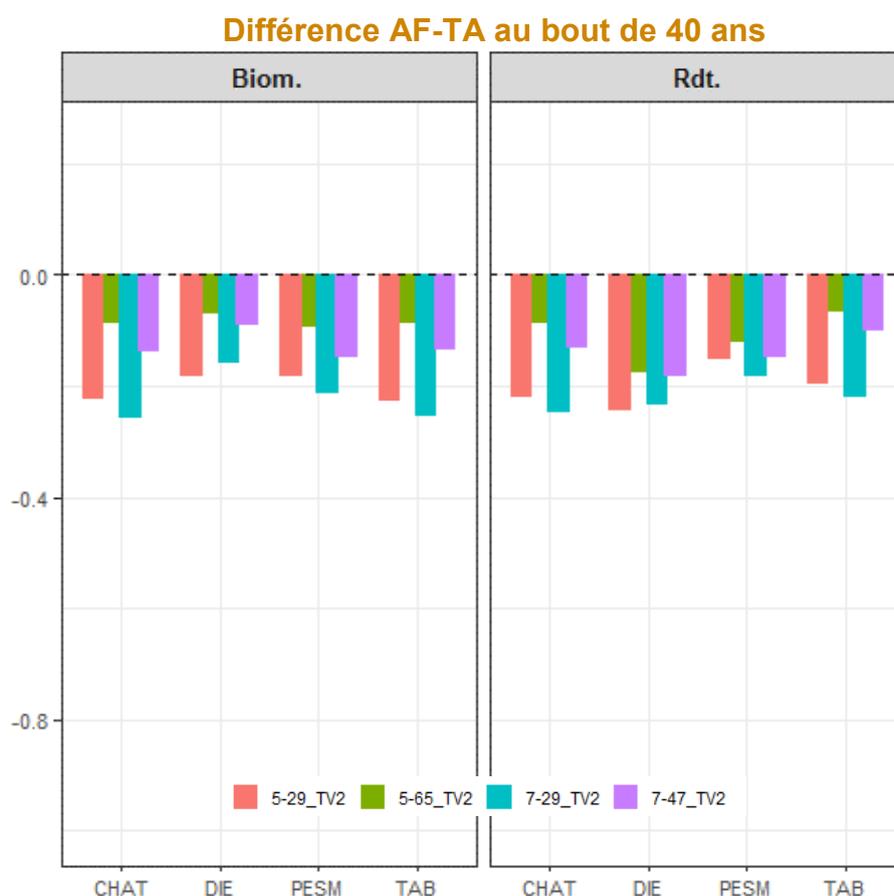


Figure 21 : Différence en termes de performances agronomiques entre agroforesterie (arbres de 40 ans environ) et témoin agriculture pure pour quatre agencements spatiaux des arbres (distance entre arbres le long de la ligne _ distance entre lignes), dans quatre sites du bassin RMC. Vert : plantation en 5mx65 m (30 arbres/ha), violet : 7x47 (30 arbres/ha), rouge : 5x29 (70 arbres/ha), bleu : 7x29 (50 arbres/ha).

L'effet du design de plantation sur les performances des cultures passe à la fois par un effet de la largeur de l'allée cultivée et de la densité d'arbres : pour tous les sites, le classement des agencements est le même, 5x65>7x47>5x29>7x29 (Figure 21).

Ces résultats montrent que l'agencement 5x65 semble un bon compromis car il permet d'avoir une réduction notable de la lixiviation (en tout cas à CHAT, TAB et PESM) tout en ayant un impact faible sur la culture. Mais le choix de l'agencement dépendra des priorités de l'agriculteur (rendement des cultures vs croissance des arbres vs diminution de la lixiviation).

C. Impact du changement climatique

Comme nous l'avons vu dans les parties précédentes, l'effet bénéfiques des arbres sur les termes des bilans hydrique et azoté se met en place progressivement au cours des décennies (après, dans certains cas, une période transitoire où l'impact, par exemple sur la lixiviation, est néfaste). De plus, la valorisation des arbres ne peut se faire, dans le cas d'arbres à bois, qu'après une certaine durée de croissance de l'arbre. De ce fait, on ne plante pas un système agroforestier pour quelques années, mais plutôt pour quelques décennies. Se pose alors le problème du changement climatique : les effets bénéfiques observés sous climat actuel perdureront-ils dans le cadre du changement climatique ? Les compétitions arbres-cultures risquent-elles d'être exacerbées au point de mettre en question la productivité du système ? Pour répondre à ce type de questions, le modèle Hi-sAFe est encore une fois

un allié précieux : en représentant les mécanismes par lesquels le climat impacte un système agroforestier, il permet de simuler le comportement futur du système en changeant simplement les variables climatiques d'entrée.

Nous avons réalisé des simulations du site de Restinclières en climat passé (1951–1990), actuel (1991–2030) et futur (2031–2070), en agroforesterie et en témoin agriculture pure, pour décrire le comportement du système en réponse au changement climatique. Les données climatiques ont été obtenues à partir des simulations du GIECC, sous l'hypothèse du scénario 8.5 du 5^{ème} rapport du GIECC (scénario business-as-usual, sans modification drastique de drivers du changement climatique, qui conduit à un forçage radiatif de 8.5 W/m² en 2100). Le climat à Restinclières devrait sous ce scénario devenir plus chaud, légèrement plus sec et avec plus de rayonnement incident (du fait de la diminution de la nébulosité) ; ainsi, la température devrait augmenter d'environ 3°C entre 1951 et 2070, l'humidité relative devrait diminuer de 2%, et le rayonnement augmenter de 5%. La somme annuelle des précipitations devrait également augmenter, pour passer de 1017 à 1059 mm, mais avec une répartition plus irrégulière des pluies et plus de pluies intenses (>16 mm par jour).

L'impact de ces changements sur les cultures a été caractérisé par différents indices de stress : stress hydrique conduisant à la fermeture des stomates, stress hydrique conduisant à la sénescence accélérée des feuilles, stress thermique (chaud) conduisant à une diminution de l'efficacité de conversion de la lumière et stress thermique conduisant à un ralentissement du remplissage des grains. L'impact sur le rendement des cultures a également été examiné. Enfin, les bilans hydriques et azotés ont été comparés en climat actuel et futur.

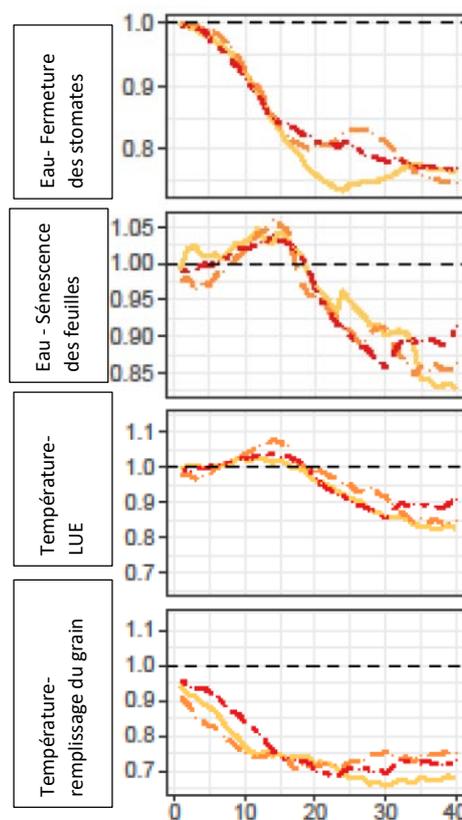


Figure 22 : Effet de l'agroforesterie sur les stress hydriques et thermiques de la culture (rapport du stress en agroforesterie/stress en témoin agriculture pure) pour le stress hydrique déclenchant la fermeture des stomates (A), déclenchant la sénescence des feuilles (B), stress thermique impactant l'efficacité de conversion de la lumière (C) et stress thermique impactant le remplissage du grain (D), en climat passé (orange clair), présent (orange foncé) et futur (rouge)

Les résultats montrent effectivement une réduction des stress hydrique et thermique (après une augmentation transitoire) en agroforesterie par rapport au témoin agriculture pure, quelle que soit la période considérée (Figure 22).

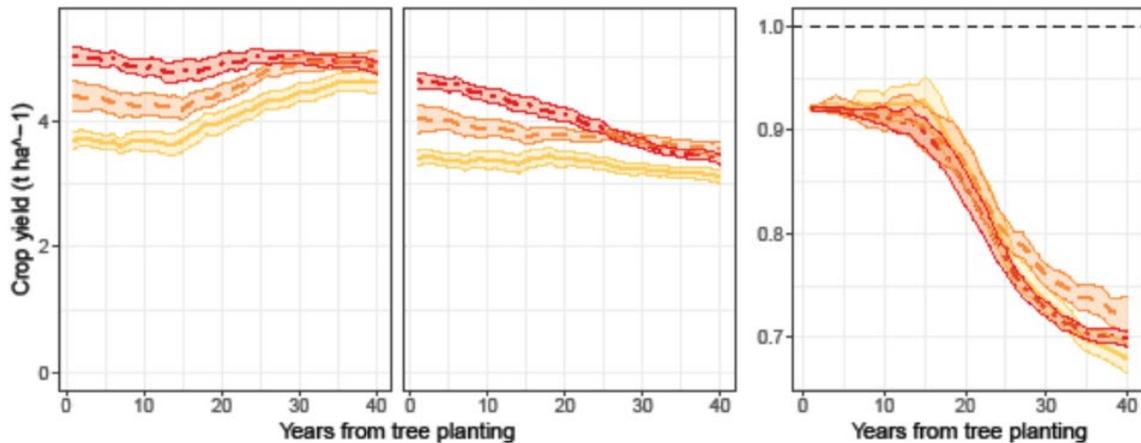


Figure 23 : Rendement du blé dur en fonction de l'année de simulation en témoin Agricole (A), en AgroForesterie (B), et rendement relatif (AF/AG), en climat passé (orange clair), présent (orange foncé) et futur (rouge)

De façon inattendue, la modèle prévoit une augmentation du rendement du blé au cours du temps entre 1951 et 2070 (Figure 23A), qui s'explique par l'augmentation du rayonnement arrivant à la culture. On observe la même chose en agroforesterie au début du cycle de croissance des arbres (lorsque les arbres eux-mêmes n'ont pas d'effet sur la culture, et que la perte de rendement à 'hectare est uniquement due à la surface non semée sur la ligne d'arbres). Le rendement de la culture diminue ensuite drastiquement au fur et à mesure de la croissance des arbres et donc à l'augmentation de la compétition qu'ils exercent sur les cultures (Figure 23B). Le rendement relatif (Figure 23C) indique que les pertes de rendement due à l'agroforesterie seront plus importantes dans le futur que dans la période actuelle.

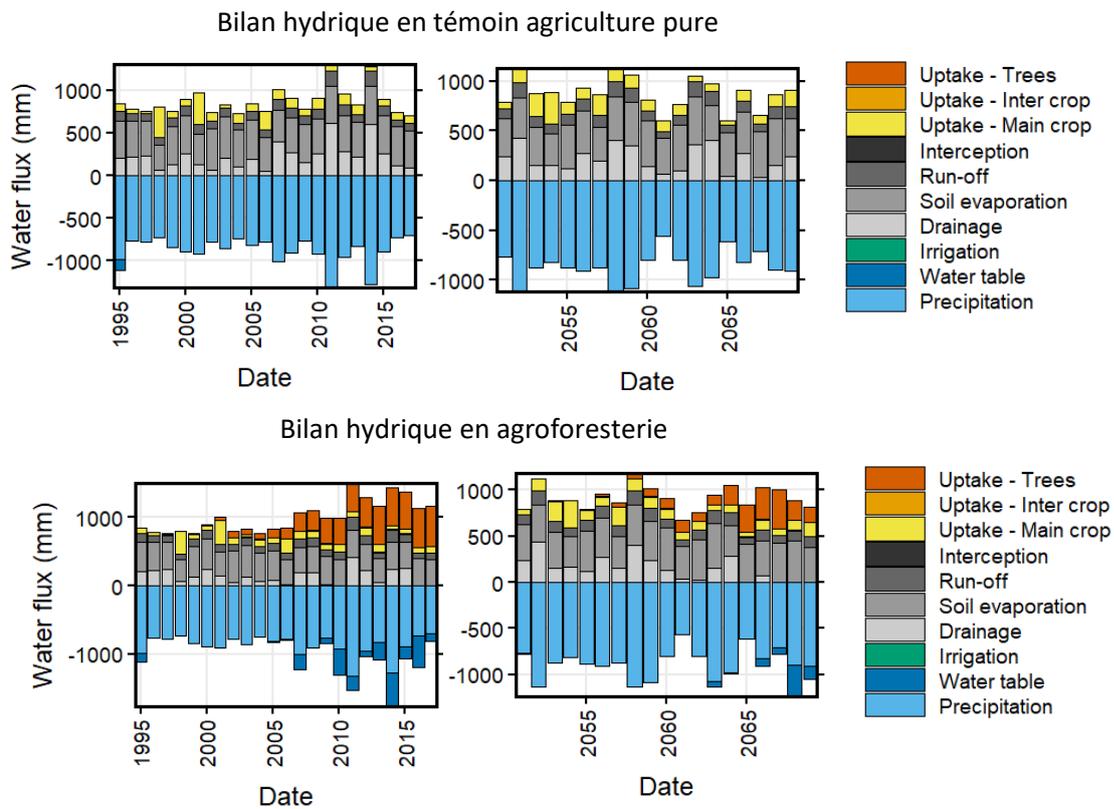


Figure 24 : Evolution du bilan hydrique annuel en témoin agriculture pure (haut) et en agroforesterie (bas), en climat actuel (gauche) et futur (droite)

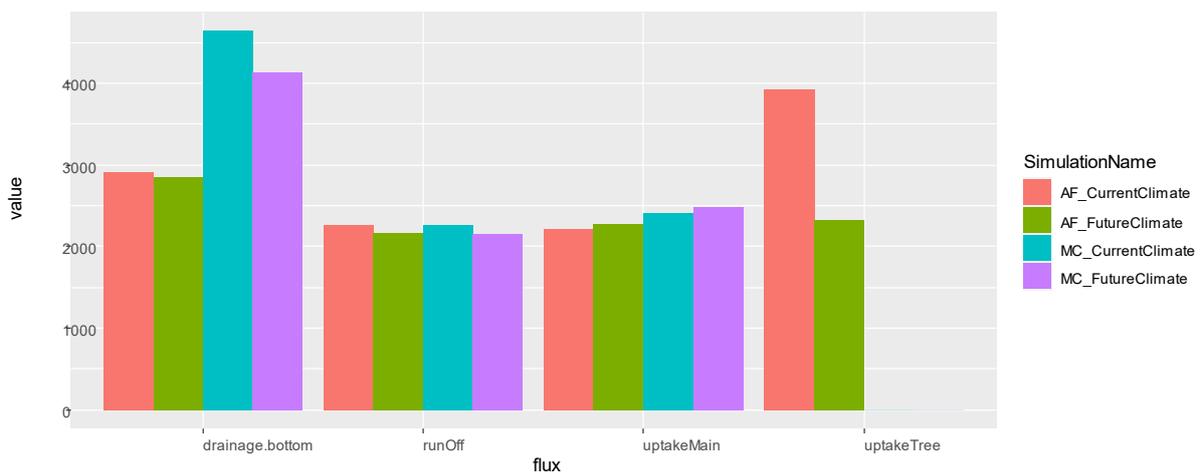


Figure 25 : Drainage, ruissellement, transpiration des cultures et transpiration des arbres en agroforesterie (AF) et en témoin culture pure (MC), en climat actuel et futur, en valeur cumulées sur 20 ans.

Le changement climatique a un impact limité sur le bilan hydrique (Figure 24). En culture pure, on observe une diminution du drainage, alors qu'en agroforesterie, l'effet le plus notable est une forte diminution de la transpiration des arbres (Figure 25).

IV. Discussion

Les résultats des simulations doivent être pris avec toutes les précautions d'usage inhérentes à un exercice de simulation, d'autant que les simulations prévues dans le cadre du projet Arbrisseau ont été particulièrement ardues à réaliser du fait des cultures non paramétrées dans STICS, des rotations complexes, des informations limitées sur les caractéristiques du sol en profondeur et sur la dynamique des nappes dans les sites du réseau, des informations fragmentaires sur les itinéraires techniques réalisés les cultures. La vérification du modèle sur le site de Restinclières a montré une bonne capacité prédictive du modèle sur les cultures d'hiver, mais une mauvaise capacité prédictive du modèle sur une culture de maïs réalisée en condition de compétition extrême (maïs quasi « forestier »). La vérification du modèle dans d'autres conditions est en cours et permettra d'identifier s'il est nécessaire d'améliorer certains formalismes pour représenter des situations de compétition extrêmes (cultures excessivement ombragées). Mais ces situations très ombragées ne sont pas envisagées dans les scénarios étudiés, qui utilisent des densités d'arbres plus faibles. Nous pouvons donc avoir une confiance suffisante dans les prédictions du modèle appliqué aux sites modélisés sur le bassin RMC.

Une autre limite importante de ce travail est qu'une seule espèce d'arbre (le noyer hybride) a été testée. La simulation de noyers hybrides sur tous les sites ne signifie pas qu'il s'agit de l'essence adaptée localement. Le noyer hybride est en effet un arbre exigeant, qui a besoin de sols profonds, frais, et sans hydromorphie. Notre objectif était de simuler l'impact d'arbres introduits dans les systèmes de culture, et l'important est que ces arbres poussent, quelle que soit leur espèce. Leur impact sur les bilans hydriques dépend surtout de leur surface foliaire et de leur phénologie, et leur impact sur les bilans azotés dépend surtout de leur biomasse, et de la décomposition de leurs litières. De ce point de vue, le noyer hybride est un arbre intéressant, avec une phénologie tardive bien décalée par rapport au cycle des cultures d'hiver, et pleinement synchrone avec celui des cultures d'été. Il faut souligner que des arbres fixateurs d'azote auraient des impacts différents sur les bilans d'azote. Nous n'avons pas traité ce cas dans ce rapport, car il existe très peu d'arbres fixateurs d'azote cultivés dans les systèmes agroforestiers en France. On peut citer le robinier, qui est par exemple utilisé dans les parcelles agroforestières du projet Diams de l'UMR Eco&Sols à Montpellier, mais cet arbre exotique est envahissant et n'est pas recommandé dans les systèmes de culture. Les arbres fixateurs d'azote indigènes (aulnes, arbre de judée, etc..) sont très peu utilisés en agroforesterie pour l'instant.

Pour la prédiction de la lixiviation d'azote, nous avons mis en évidence une forte sensibilité du modèle aux conditions d'initialisation des sols en matière organique. Il est donc important de bien caractériser l'état initial des sols, pour que les valeurs de lixiviation prédites les premières années ne soient pas le résultat d'une erreur d'initialisation. Or cette information était mal caractérisée dans les données terrain. Cet effet s'atténue par la suite, et devient négligeable lorsque les arbres deviennent grands. Cela ne remet donc pas en cause les prédictions de l'impact des arbres adultes sur les lixiviations.

Nous mettons dans ce travail en évidence un double résultat qui peut paraître paradoxal : les systèmes agroforestiers contrôlent la lixiviation sans réduire la recharge en eau des aquifères souterrains. D'autres travaux ont déjà évoqué cette réduction de la lixiviation d'azote grâce aux arbres (Bergeron et al. 2011; Dupraz et al. 2012; Andrianarisoa et al. 2016; Lawson et al. 2020), mais aucune publication n'avait pu démontrer que cela était possible sans réduction de la lame d'eau drainée. L'utilisation d'un modèle mécaniste qui décrit le couplage eau-azote à la fois dans les processus d'extraction par les plantes, et dans les processus de mouvement de masse dans le sol est une nouveauté.

V. Conclusion

L'impact des formations boisées sur le cycle de l'eau est complexe, et a fait l'objet de nombreuses controverses. Il n'est par exemple pas facile de prouver que les massifs boisés favorisent les

précipitations, mais ce thème est récurrent dans les hypothèses souvent émises. Par contre, les formations boisées modifient profondément le cycle de l'eau, en favorisant l'infiltration, en ayant une évapotranspiration élevée (surtout pour les espèces à feuilles persistantes), en réduisant les variations de température du sol, en favorisant une accumulation de carbone dans le sol qui permet une meilleure rétention d'eau. Mais globalement, il est admis que les forêts réduisent les écoulements vers les nappes et les rivières par suite de leur évapotranspiration plus élevée que celle des cultures (Saugier 2002). Cette conclusion est-elle transposable aux systèmes agroforestiers ? Nous apportons des éléments de réponse à cette question dans ce travail, grâce à une approche originale de modélisation sur des sites cultivés représentatifs d'une partie du bassin versant du Rhône.

Nous avons tenté de caractériser l'impact d'une généralisation de pratiques agroforestières sur les cycles de l'eau dans un bassin versant tel que celui du Rhône. Nos travaux mettent en évidence une conclusion majeure : la généralisation des systèmes agroforestiers ne met pas en danger l'alimentation des aquifères souterrains. Le drainage sous les parcelles agroforestières est maintenu, même s'il est parfois décalé dans le temps par rapport au drainage sous des parcelles non arborées. De ce point de vue, nos conclusions sont prudentes, car notre modèle ne permet pas de prendre en compte un mécanisme majeur qui pourrait encore améliorer ces prédictions : l'infiltration du ruissellement généré par les surfaces cultivées lorsque ce ruissellement traverse ou longe les linéaires arborés des parcelles agroforestières. Cet impact pourrait être introduit sous une forme assez simple dans le modèle de simulation HisAFé, en tenant compte de l'angle de la pente du terrain et des alignements d'arbres. La prédiction du ruissellement par le modèle Stics est certes assez simpliste : il est difficile de prédire le ruissellement sur la base de données journalières de pluviométrie qui ne renseignent pas sur les intensités des pluies, et donc sur leur capacité à générer du ruissellement hortonien. Mais cette prédiction est probablement suffisante pour une évaluation globale sur de longues durées de la lame d'eau infiltrée qui alimente les plantes et les hydrosystèmes. Nos résultats sont donc utiles sur ce point.

Nos simulations mettent aussi en évidence une forte réduction de la lixiviation des nitrates par les systèmes agroforestiers adultes, avec des arbres suffisamment développés. Cet impact semble général, et s'explique surtout par l'assèchement des horizons profonds du sol par les arbres en été. Cet assèchement ralentit les flux verticaux d'eau en automne et hiver, et laisse donc du temps aux arbres pour capturer avec leurs racines profondes les nitrates qui échappent à la zone racinaire des cultures. On peut espérer que ce ralentissement peut aussi s'appliquer à d'autres composés toxiques qui sont entraînés par les eaux de drainage (et notamment certains composés phosphorés ou certains résidus de pesticides). Des expérimentations spécifiques sur l'impact des systèmes agroforestiers sur ces mouvements seraient très intéressantes.

L'impact des systèmes agroforestiers est évidemment limité tant que les arbres sont petits. L'impact des arbres sur les écoulements est directement corrélé à leur ampleur. Durant les premières années, cet impact est négligeable. Il devient significatif quand les arbres dépassent 5 m de hauteur, et s'amplifie très fortement ensuite. Cela est vrai aussi bien sur le cycle de l'eau que sur celui du carbone.

Nos résultats soulignent également le rôle important joué par la bande enherbée au pied des arbres. Si cette zone est maintenue en sol nu par des pratiques de désherbage ou de travail du sol, ce qui est souvent le cas dans les jeunes plantations, elle peut générer des pertes d'azote par lixiviation assez importantes, surtout si l'épandage d'engrais pour la culture déborde sur cette zone (épandeurs rotatifs). Un autre aspect important est le rôle des végétations spontanées intercalaires entre les cultures dans les rotations. Dans nos simulations sur le site de Restinclières, la prise en compte de ces végétations spontanées modifie légèrement le bilan hydrique et azoté calculé par le modèle. Il est donc préférable de toujours inclure les végétations spontanées intercultures dans les simulations, ce qui les rend plus complexes, mais plus fiables.

Une des spécificités de notre travail est de montrer la compatibilité entre ces externalités positives de l'agroforesterie et la production agricole (qui est néanmoins diminuée). Dans toutes les synthèses sur l'impact des arbres agroforestiers sur la réduction de la pollution diffuse d'origine agricole (Pavlidis and Tsihrintzis 2018), la dimension productive est ignorée, faute d'outils de modélisation adaptés. Nous avons réussi à évaluer cette interaction grâce au modèle Hi-sAFe, qui est capable de prévoir à la fois les productions attendues et les cycles de l'eau et de l'azote. Nos résultats montrent qu'on peut maintenir une production agricole tout en bénéficiant d'une certaine protection contre les pollutions diffuses grâce aux arbres. Nous montrons que même avec des espacements très larges entre les lignes d'arbres (65 m), un effet de réduction significatif est obtenu, ce qui est encourageant. Ce résultat dépend fortement de la capacité des systèmes racinaires des arbres à s'étaler sous la culture dans l'allée cultivée, et il est probable que toutes les espèces d'arbres ne sont pas équivalentes de ce point de vue. Le modèle Hi-sAFe prédit que les racines des arbres isolés vont beaucoup plus loin que la projection verticale des houppiers des arbres, ce qui a pu être confirmé par plusieurs expériences de terrain (Moreno et al. 2005; Mulia and Dupraz 2006; Cardinael et al. 2015). Le modèle Hi-sAFe permet d'ailleurs plus : il quantifie les compromis entre production et certains services écosystémiques (alimentation des nappes souterraine, réduction de la lixiviation), ce qui pourrait, si on le souhaite, permettre de donner un coût (ou un prix) à ces services écosystémiques. Peut-être un jour ces services seront-ils rémunérés pour les producteurs agricoles ? Grâce à ces simulations, nous pourrions alors proposer des bases objectives pour fixer cette rémunération.

La décision de généraliser les pratiques agroforestières dépend bien entendu d'autres critères de faisabilité, et d'autres règles de décision qui prennent en compte d'autres services écosystémiques (biodiversité, paysage, protection contre le vent, contre le bruit, contre les odeurs, etc...) mais il était important d'évaluer si production et protection des hydrosystèmes étaient compatibles. C'est ce que démontre cette étude pour la première fois.

VI. Références

- Andrianarisoa KS, Dufour L, Bienaimé S, et al (2016) The introduction of hybrid walnut trees (*Juglans nigra* × *regia* cv. NG23) into cropland reduces soil mineral N content in autumn in southern France. *Agroforest Syst* 90:193–205. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9845-3>
- Bai W, Sun Z, Zheng J, et al (2016) Mixing trees and crops increases land and water use efficiencies in a semi-arid area. *Agricultural Water Management* 178:281–290. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.007>
- Beillouin D, Ben-Ari T, Makowski D (2019) Evidence map of crop diversification strategies at the global scale. *Environ Res Lett* 14:123001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4449>
- Bergeron M, Lacombe S, Bradley RL, et al (2011) Reduced soil nutrient leaching following the establishment of tree-based intercropping systems in eastern Canada. *Agroforest Syst* 83:321–330. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9402-7>
- Boinot S, Poulmarc'h J, Mézière D, et al (2019) Distribution of overwintering invertebrates in temperate agroforestry systems: Implications for biodiversity conservation and biological control of crop pests. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 285:106630. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106630>
- Brisson N, Mary B, Ripoche D, et al (1998) STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18:311–346. <https://doi.org/10.1051/agro:19980501>
- Cardinael R, Mao Z, Prieto I, et al (2015) Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system. *Plant and Soil* 391:219–235. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2422-8>
- Coucheney E, Buis S, Launay M, et al (2015) Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil–crop model for plant, water and nitrogen outputs: Evaluation over a wide range of agro-

- environmental conditions in France. *Environmental Modelling & Software* 64:177–190. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.024>
- Dayioglu A, Hepaksoy S (2016) Effects of shading nets on sunburn and quality of “Granny Smith” apple fruits. In: Milatovic D, Milivojevic J, Nikolic D (eds) *lii Balkan Symposium on Fruit Growing*. Int Soc Horticultural Science, Leuven 1, pp 523–528
- de Willigen P (1987) Uptake potential of non-regularly distributed roots. *J of Plant Nutrition* 10:1273–1280. <https://doi.org/10.1080/01904168709363656>
- de Willigen P, Nielsen NE, Claassen N, Castrignanò AM (2000) Modelling Water and Nutrient Uptake. In: Smit AL, Bengough AG, Engels C, et al. (eds) *Root Methods*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 509–543
- Dufour L, Metay A, Talbot G, Dupraz C (2013) Assessing Light Competition for Cereal Production in Temperate Agroforestry Systems using Experimentation and Crop Modelling. *J Agron Crop Sci* 199:217–227. <https://doi.org/10.1111/jac.12008>
- Dufour-Kowalski S, Courbaud B, Dreyfus P, et al (2011) Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. *Annals of Forest Science* 69:221–233. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0140-9>
- Dupraz C, Blitz-Frayret C, Lecomte I, et al (2018) Influence of latitude on the light availability for intercrops in an agroforestry alley-cropping system. *Agroforestry Systems* 92:1019–1033. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0214-x>
- Dupraz C, Liagre F (2011) *AGROFORESTERIE 2E, Édition : 2e édition*. France Agricole, Paris
- Dupraz C, Liagre F, Querné A, et al (2012) L’agroforesterie peut-elle permettre de réduire les pollutions diffuses azotées d’origine agricole ?
- Dupraz C, Wolz KJ, Lecomte I, et al (2019) Hi-sAFe: A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. *Sustainability* 11:2293. <https://doi.org/10.3390/su11082293>
- Gomes LC, Bianchi FJJA, Cardoso IM, et al (2020) Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 294:106858. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858>
- Graves AR, Burgess PJ, Palma JHN, et al (2007) Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering* 29:434–449. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.018>
- Jose S (2009) Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor Syst* 76:1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Kay S, Rega C, Moreno G, et al (2019) Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy* 83:581–593. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025>
- Kho R (2007) Approaches to Tree–Environment–Crop Interactions. In: Rani Batish D, Kumar Kohli R, Jose S, Pal Singh H (eds) *Ecological Basis of Agroforestry*. CRC Press, pp 51–72
- Lawson G, Bealey WJ, Dupraz C, Skiba UM (2020) Agroforestry and Opportunities for Improved Nitrogen Management. In: Sutton MA, Mason KE, Bleeker A, et al. (eds) *Just Enough Nitrogen*. Springer International Publishing, Cham, pp 393–417
- Lin BB (2007) Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 144:85–94. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009>
- Mead R, Willey RW (1980) The Concept of a ‘Land Equivalent Ratio’ and Advantages in Yields from Intercropping. *Ex Agric* 16:217–228. <https://doi.org/10.1017/S0014479700010978>
- Moreno G, Obrador JJ, Cubera E, Dupraz C (2005) Fine Root Distribution in Dehesas of Central-Western Spain. *Plant Soil* 277:153–162. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-6805-0>
- Mulia R, Dupraz C (2006) Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in southern france: What consequences for modelling of tree root dynamics? *Plant Soil* 281:71–85. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3770-6>
- Nuberg IK (1998) Effect of shelter on temperate crops: a review to define research for Australian conditions. *Agroforestry Systems* 41:3–34. <https://doi.org/10.1023/A:1006071821948>

- Paut R, Sabatier R, Tchamitchian M (2018) Horticulture agroforestry systems: a modelling framework to combine diversification and association effects. European Agroforestry Federation
- Pavlidis G, Tsihrintzis VA (2018) Environmental Benefits and Control of Pollution to Surface Water and Groundwater by Agroforestry Systems: a Review. *Water Resources Management* 32:1–29. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1805-4>
- Peng X, Thevathasan NV, Gordon AM, et al (2015) Photosynthetic Response of Soybean to Microclimate in 26-Year-Old Tree-Based Intercropping Systems in Southern Ontario, Canada. *PLOS ONE* 10:e0129467. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129467>
- Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Bareche J, et al (2018) No-tillage reduces long-term yield-scaled soil nitrous oxide emissions in rainfed Mediterranean agroecosystems: A field and modelling approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 262:36–47. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.04.007>
- Plaza-Bonilla D, Léonard J, Peyrard C, et al (2017) Precipitation gradient and crop management affect N₂O emissions: Simulation of mitigation strategies in rainfed Mediterranean conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 238:89–103. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.003>
- Quinkenstein A, Wöllecke J, Böhm C, et al (2009) Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental Science & Policy* 12:1112–1121. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.08.008>
- Racsko J, Schrader LE (2012) Sunburn of Apple Fruit: Historical Background, Recent Advances and Future Perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences* 31:455–504. <https://doi.org/10.1080/07352689.2012.696453>
- Reyes F, Gosme M, Wolz KJ, et al (2021) Alley Cropping Mitigates the Impacts of Climate Change on a Wheat Crop in a Mediterranean Environment: A Biophysical Model-Based Assessment. *Agriculture* 11:356. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040356>
- Sánchez IA, Lassaletta L, McCollin D, Bunce RGH (2010) The effect of hedgerow loss on microclimate in the Mediterranean region: an investigation in Central Spain. *Agroforestry Systems* 78:13–25. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9224-z>
- Saugier B (2002) Comment les forêts contrôlent-elles le cycle de l'eau ? *La Houille Blanche* 88:13–17. <https://doi.org/10.1051/lhb/2002036>
- Scowcroft PG, Meinzer FC, Goldstein G, et al (2000) Moderating Night Radiative Cooling Reduces Frost Damage to *Metrosideros polymorpha* Seedlings Used for Forest Restoration in Hawaii. *Restoration Ecology* 8:161–169. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80023.x>
- Siriri D, Wilson J, Coe R, et al (2013) Trees improve water storage and reduce soil evaporation in agroforestry systems on bench terraces in SW Uganda. *Agroforestry Systems* 87:45–58. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9520-x>
- Stamps WT, Linit MJ (1998) The problem of experimental design in temperate agroforestry. *Agroforestry Systems* 44:187–196. <https://doi.org/10.1023/A:1006215130892>
- Torralba M, Fagerholm N, Burgess PJ, et al (2016) Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 230:150–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
- Treder W, Mika A, Buler Z, Klamkowski K (2016) Effects of Hail Nets on Orchard Light Microclimate, Apple Tree Growth, Fruiting and Fruit Quality. *Acta Sci Pol-Hortorum Cultus* 15:17–27
- van Noordwijk M, Bayala J, Hairiah K, et al (2014) Agroforestry Solutions for Buffering Climate Variability and Adapting to Change. *Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems* 5:216–232
- Webber H, Zhao G, Wolf J, et al (2015) Climate change impacts on European crop yields: Do we need to consider nitrogen limitation? *European Journal of Agronomy* 71:123–134. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.09.002>
- Widmer A (2001) Light intensity and fruit quality under hail protection nets. In: Palmer JW, Wunsche JN (eds) *Proceedings of the Seventh International Symposium on Orchard and Plantation Systems*. International Society Horticultural Science, Leuven 1, pp 421–426

Zheng B, Chenu K, Chapman SC (2016) Velocity of temperature and flowering time in wheat - assisting breeders to keep pace with climate change. *Global Change Biology* 22:921–933. <https://doi.org/10.1111/gcb.13118>