

SCA0PEST : performances et limites d'un système grandes cultures agroforestier sans pesticides en sol limitant

Grandgirard D.¹, Oheix S.¹, Simon L.¹, Hervé V.¹, Leclercq C.¹, Liagre F.², Marin A.², Dupraz C.³, Gosme M.³, Mézières D.³, Poulain J.L.⁴, Salitot G.⁴, Wartel R.⁶

Avec la collaboration de : Arnaud Van Boxom (Terres Inovia, Estrées-Mons), Jérôme Pernel (AGT-RT), Sébastien Darras (INRA UE GCIE – Picardie, Estrées-Mons), Vincent Cellier (INRA UE0115 Domaine expérimental d'Epoisses), Aude Alaphilippe (INRA UERI Gothenon, Saint-Marcel-Lès-Valence)

¹ UNILASALLE, Collège Agrosociences, 19 rue P. Wagué BP30313, F-60026 Beauvais cedex

² SCOP AGROOF, 19 rue du Luxembourg, F-30140 Anduze

³ INRA UMR SYSTEM, Campus de la Gaillarde, Place Viala, F-34060 Montpellier cedex 2

⁴ Chambre d'Agriculture de l'Oise, Rue du Frère Gagne, F-60021 Beauvais

⁵ CRA Hauts-de-France, 19 r. Dumas, F-80096 Amiens cedex 3

Correspondance : david.grandgirard@unilasalle.fr

Résumé

En Picardie, zone agricole productive, l'enjeu de diversification et d'autonomie des exploitations de polyculture élevage en sols limitants est central. Souffrant de potentiels de rendement limités et ayant déjà fortement simplifié systèmes de culture et pratiques, les exploitations voient poindre le dilemme de la limitation des molécules phytosanitaires et de leurs usages. Le dispositif SCA0PEST a été le siège d'une expérimentation cherchant à déterminer les performances globales et évaluer la faisabilité d'un système de culture reconçu n'ayant plus recours aux pesticides et comptant sur une matrice agroforestière pour accentuer les bénéfices éventuels de la lutte intégrée. S'il est vrai que SCA0PEST apparaît fortement à très fortement durable quand évalué globalement, il n'en est pas moins faiblement durable d'un point de vue économique. Ceci est la conséquence de rendements observés très faibles et de l'impossibilité de mener à son terme une des cultures de rente phare : le colza. A l'inverse, la séquestration carbonée au sein de la matrice agroforestière progresse comme initialement simulé et la compensation pourrait être de près de 1000 kgeq.CO₂/ha/an permettant d'afficher un bilan carbone net nul des récoltes. Si cela représente un complément de revenu possible, il faudra avant tout parvenir à accroître les rendements réels et optimiser les performances économiques.

Mots-clés : Expérimentation système, Zéro pesticide, Agroforesterie, Sol limitant, Performances, Evaluation multicritère.

Abstract : SCA0PEST : performances et limits of a pesticide-free agroforestry system in limited soil conditions

In Northern France where agriculture is generally productive, crop diversification and feedstuff autonomy are mean challenges for mixed farms located in lowland regions with "poor" soils. Due to limited yields and having already adopted lo-till and direct-seeding technics, farmers fear next pesticides' range and use limitation. In response, the pesticide-free "SCA0PEST" cropping system was set up. It expects integrated pest management benefits from an agroforestry matrix which could

facilitate the whole system. If SCA0PEST appeared as sustainable up to very sustainable when globally assessed, it stayed poorly sustainable in an economic point of view. This is mainly consequence of very low yields for most of the crops and of the impossibility to crop and maintain oilseed rape over years. Conversely, trees growth and carbon sequestration into the agroforestry matrix met predictions and the C compensation could reach as an annual mean, 1000 kgeq.CO₂/ha/year, making possible to farmers to display a null net C balance of their crops. However, if this could be perceived as a supplementary revenue, we would have first to optimize crop yield and the economic performances of SCA0PEST.

Keywords: Cropping system approach, Pesticide-free, Agroforestry, Limited soil potential, Performances, Multicriteria evaluation.

Introduction

Entre Plaine picarde et Pays de Bray, les sols argilo-limoneux à silex (ou argiles à silex) s'intercalent entre limon brun des plateaux et la craie altérée. Souvent localisés en bordure de plateaux, en début de coteaux, leur potentiel est limité (Guide des sols de l'Oise, 1997). Ils présentent en outre un risque élevé à l'infiltration des eaux et nitrates ruisselées et une disponibilité hydrique des nitrates des sols réduite (Scheurer, 2000). En conséquence de quoi, souffrant 6 années sur 10 de stress hydrique précoce, ils sont majoritairement emblavés en cultures d'hiver (céréales, colza), menées de manière simplifiée et peu intensive par souci de réduction des coûts de production, parfois en abaissant les rendements objectifs de sorte de limiter les impacts sur la ressource locale en eau. Là où l'élevage persiste, ils sont alors conservés en prairies pâturées et peuvent accueillir selon le système de culture en place prairies temporaires et luzernières (Ronceux, 2017).

La diminution lors de la décade passée du cours des céréales et la limitation progressive de la gamme comme de l'usage des matières actives (principalement des herbicides) réinterrogent aujourd'hui l'usage régional qui est fait des parcelles à sols limitants. L'occasion est donnée de reconsidérer les systèmes de culture en place et d'envisager d'en accroître les performances et les services rendus (Pernel, 2016). Ainsi, de nouvelles opportunités de valorisation de la biomasse agricole oléagineuse et forestière ont vu le jour (Yu, 2015 ; Holo Ba, 2016) et représenteraient localement une nouvelle source de valeur ajoutée si tant est que les produits biosourcés résultant des nouveaux systèmes de culture atteignent une certaine multiperformance conforme à l'approche d'écologie industrielle retenue au sein du projet régional P.I.V.E.R.T. (Picardie Innovations Végétales, Enseignements et Recherches Technologiques) Genesys.

Au sein du projet Dephy EXPE SCA0PEST, la recherche de la multiperformance a nécessité l'intégration complexe d'alternatives techniques agroécologiques lors de la co-conception du système de culture prototype, de sa mise en place sur le terrain et de son adaptation annuelle par boucles de diagnostic et d'amélioration continue. Cette approche expérimentale dite « système » a été empruntée lors du projet SCA0PEST en ce qu'elle permettait – d'évaluer à l'échelle des parcelles expérimentales les performances du système de culture innovant (SdCi) retenu – d'intégrer aux performances les éléments écologiques non toujours productifs de l'environnement proche de la plateforme SCA0PEST et – de cibler une autonomie fourragère accrue de l'atelier laitier de l'exploitation hôte (Grandgirard, 2013).

Le projet SCA0PEST a donc été établi autour de l'idée de coupler un système de culture s'affranchissant des produits phytopharmaceutiques et reposant sur les principes de la lutte intégrée au potentiel de facilitation prêt aux agroforesteries et plus particulièrement ici à l'agroforesterie intraparcellaire en lignes. La plateforme expérimentale SCA0PEST se compose ainsi d'une matrice arborée plurispécifique en lignes à végétation spontanée qui héberge une rotation prototype reconçue ne faisant pas appel aux produits phytopharmaceutiques mais s'autorisant la fertilisation minérale. Par-

là, SCA0PEST cherche à (i) démontrer la faisabilité agro-technique du système et à en juger les impacts en termes de (ii) durabilité économique, (iii) de bilan GES (Gaz à Effet de Serre) et de bilan carbone et à cerner (iv) le niveau de durabilité globale atteint par le système tout en respectant (v) les conditions de marché et de collecte locales.

Ce document présente une partie des principaux résultats issus de la dynamique mise en place par le consortium SCA0PEST¹. Il fait en outre appel à des résultats méthodologiques ou de création / mobilisation d'outils issus de collaborations connexes telles celles relatives aux projets ADEME REACTIF « PARASOL »² et RMT AgroforesterieS³, qui ont irrigué les travaux SCA0PEST et en ont permis la complétude.

1. Matériels et méthodes

L'expérimentation SCA0PEST repose sur une plateforme agroforestière en grandes cultures atypique ; proposant des combinaisons "essences arborées * sols" connues et géolocalisées, elle dispose aussi d'une gamme de témoins agricoles (zones sans arbres mais avec cultures) et sylvicoles (zones sans cultures mais avec arbres à densité forestière) utiles aux suivis expérimentaux longitudinaux. Pour s'assurer d'une méthodologie et d'un cadre d'expérimentation et d'analyse robustes, ses personnels ont mis en place un partenariat privilégié avec le réseau d'expérimentation frère Res0pest⁴ et participent à certains travaux du RMT SdCi⁵. Lors de nombreux ateliers partagés de co-conception, de retours d'expériences et de pilotage, ce partenariat aura permis de décider de protocoles et méthodes communs utiles à la comparaison des systèmes et de leurs performances. C'est pourquoi certains des résultats présentés ci-après pourront en partie être confrontés aux résultats du projet Res0pest (Cellier et al, 2018).

1.1 Le site expérimental

Le système de culture SCA0PEST est hébergé au sein d'une parcelle agroforestière de 34 hectares dite « du Marquis ». La parcelle du Marquis est bordée au nord d'un bois ancien (25 ha). Au sein de cette parcelle, 20 lignes agroforestières de 2 mètres de large, espacées de 30 mètres les unes par rapport aux autres, disposées topographiquement selon un axe quasi nord-sud pour limiter la production d'ombre sur les couverts cultivés tout en s'opposant aux chemins d'eau préférentiels (ruissellement selon un axe est-ouest) et présentant une végétation spontanée composent ce que l'on nomme la matrice agroforestière. Cette matrice agroforestière a été implantée en 2009. En sus des lignes d'arbres, pour des raisons de suivi longitudinal de croissance des arbres et d'évolution des états des sols et des communautés biologiques et de comparaison à des situations agricoles et forestières, 3 témoins agricoles (bandes enherbée seule sans arbres) et 3 témoins forestiers (pas de cultures, une densité d'arbres de type forestier à 700 arbres/ha) faisant chacun 1 ha sont présents (Figure 1).

Au sein du Marquis, sur une zone dédiée qui se superpose à la matrice agroforestière, 4.5 ha sont réservés au système SCA0PEST. Cette zone SCA0PEST est localisée entre la ligne agroforestière n°8 et la ligne n°14 (zone des argiles à silex) ; par construction, la matrice agroforestière au sein de cette zone permet d'isoler 6 parcelles expérimentales SCA0PEST (28*180m) dénommées P1 à P6 (d'est en ouest) bordées chacune de deux lignes agroforestières.

¹ <http://ecophytopic.fr/dephy/dephy-dephy-expe>

² <http://parasol.projet-agroforesterie.net/>

³ <https://rmt-agroforesteries.fr/fr/>

⁴ <http://www.ecophytopic.fr/tr/innovation-en-marche/r%C3%A9seau-dephy/r%C3%A9seau-exp%C3%A9rimental-de-syst%C3%A8mes-de-culture-%C2%AB-z%C3%A9ro-pesticide-%C2%BB>

⁵ <https://www6.inra.fr/systemesdecultureinnovants/Le-RMT-SdCi>

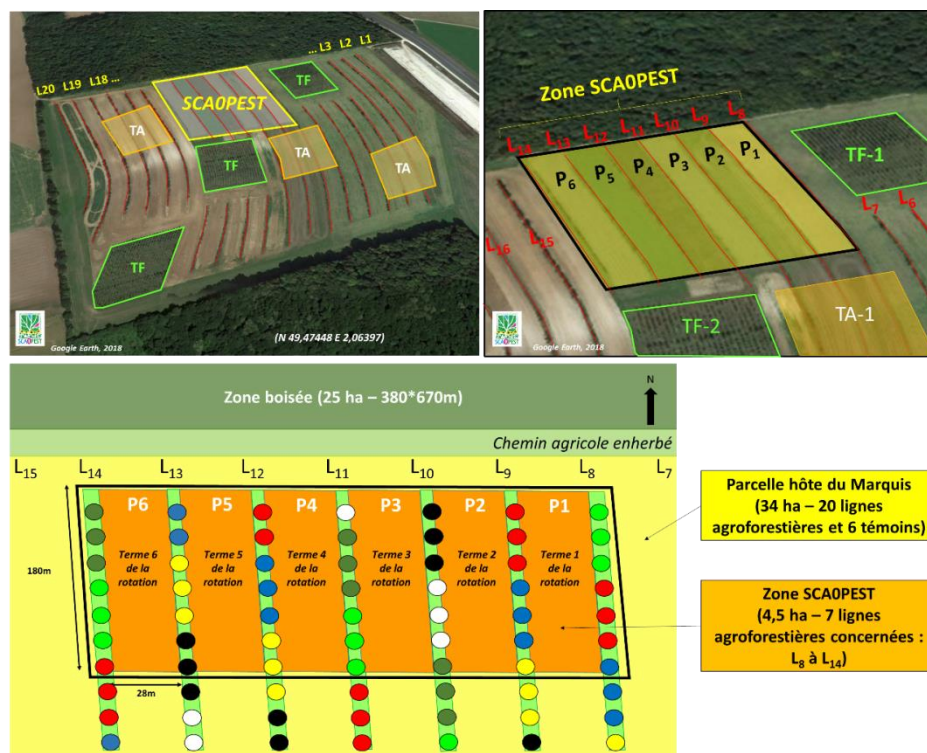


Figure 1 : Localisation et représentations schématiques du dispositif SCA0PEST : (L_x = ligne agroforestière n°x ; P_x = parcelle SCA0PEST n°x ; TA-x = témoin agricole n°x ; TF-x = Témoin forestier n°x ; chaque cercle de couleur au sein du schéma bas représente un arbre ; ils sont espacés de 4m sur la ligne ; ceux-ci vont 3 par trois sur une ligne = implantation en triplet ; les triplets se succèdent selon une séquence définie, répétée et continue sur toute la parcelle)

La parcelle du Marquis est originellement à vocation production de bois d'œuvre ; de fait, la matrice agroforestière accueille 10 essences forestières (Noyers hybride et commun, Erables sycomore et plane, Orme de Lutèce, Alisier torminal, Pommier, Poirier, Cèdre de l'Atlas et Merisier), implantées en triplet (3 arbres d'une essence font suite à 3 arbres d'une autre essence). Elles sont distribuées selon une séquence qui débute en ligne 1 et se termine après répétition à l'infini, en ligne 20. Chaque arbre, quelle que soit l'essence concernée est espacé de 4m de l'arbre suivant. Cette implantation facilite la sélection progressive au fil des années des individus d'avenir (passant d'une densité de 95 arbres/ha à plantation à 30-50 arbres/hectare selon le type de sol au final) et permet de disposer d'une gamme expérimentale "essence forestière * type de sol" d'intérêt (Grandgirard et al., 2014).

Les sols de la parcelle sont hétérogènes : 7 types de sol sont présents, allant de limon de plateau et limon de thalweg à argiles à silex sur craie. Sur la partie réservée à SCA0PEST, la texture de surface est de type argilo-limoneuse et le type de sol un argile à silex sur craie de pH légèrement basique (≈ 7.8), d'une profondeur potentielle d'enracinement allant de faible à moyenne (45-60cm), de piérosité moyenne (15-20%) et de réserve utile limitante (75-90mm). En l'absence de possibilité d'irrigation, le rendement conventionnel de référence de la parcelle, tous types de sol considérés, est de l'ordre de 75 q.ha⁻¹ en céréales d'hiver (blé et orge); la zone "SCA0PEST" présente quant à elle un rendement conventionnel de référence de l'ordre de 65-70% de la valeur précédente, soit 52 q.ha⁻¹ en céréales d'hiver. Cette valeur est issue d'une campagne de mesures de rendements machines (n total=54) conduite sur le Marquis dont la zone SCA0PEST lors des récoltes 2009-10 et 2010-11.

1.2 Le système de culture expérimenté

Le système de culture SCA0PEST a été co-conçu dans un souci de respect des principes de la protection intégrée comme moyen de maîtrise des bioagresseurs ; il fait appel aux principes de facilitation agroécologique que pourrait apporter la matrice agroforestière accueillant le système de

culture, ainsi que les couverts intermédiaires de service (Figure 2). Concernant la matrice agroforestière, les principaux services attendus sont ceux – de la lutte biologique dans un premier temps (prédation des limaces comme réduction du stock semencier adventices par les carabes, régulation des pucerons par les syrphes et autres micro-hyménoptères), - de la pollinisation accrue du tournesol et en moindre mesure du colza grâce à l'accroissement de la diversité et des abondances des pollinisateurs sauvages. A l'échelle du système de culture, du fait de la production de biomasse arborée et de l'enrichissement du pool carboné des sols (Lorenz et Lal, 2014 ; Cardinael et al., 2016), la séquestration carbone devrait être accrue à l'hectare ; elle compenserait les émissions de gaz à effet de serre du système, déjà réduites du fait de sa reconception, permettant alors de réduire drastiquement l'empreinte carbone globale du système. Nous pourrions encore citer les services relatifs à la réduction du risque d'infiltration des intrants azotés vers les masses d'eaux souterraines (spécialement au sein de la zone SCA0PEST qui, sur craie fissurée, est très infiltrante).

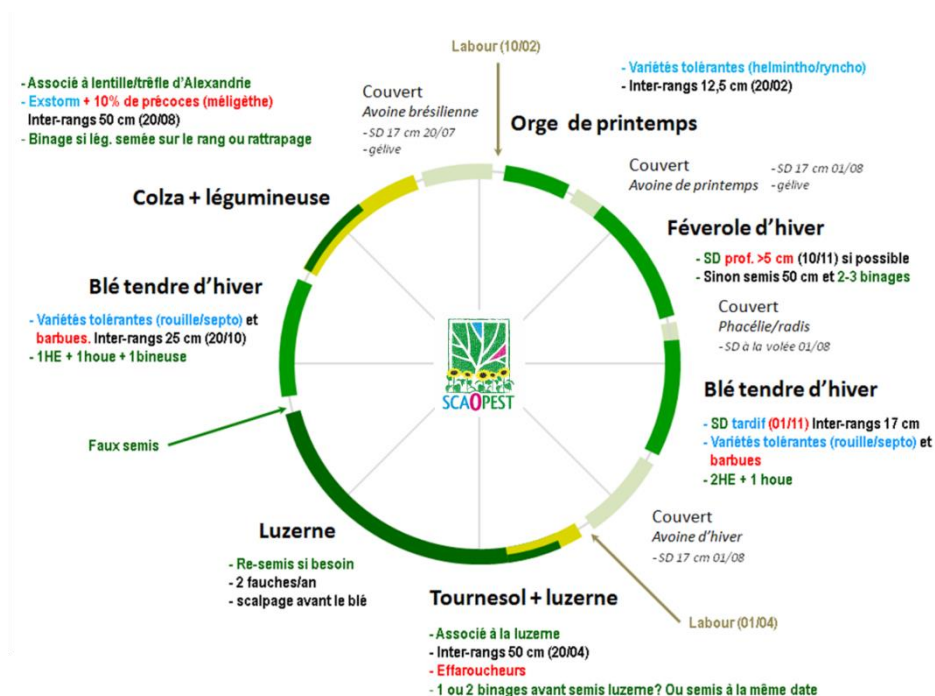


Figure 2 : Système de culture issu des ateliers de co-conception et validé par le comité de pilotage SCA0PEST (SD : Semis Direct) – bleu : leviers variétaux contre les maladies ; rouge : leviers contre les insectes et ravageurs ; vert : leviers contre les adventices

Mis en place, le système testé est confronté à deux types distincts de références : (1) les performances du système de culture de référence "colza d'hiver-blé tendre d'hiver-orge d'hiver i.e. "CBO_ref" mené sur la parcelle du Marquis, sur sol équivalent (céréales d'hiver CBOref 2010-12 =52,0 q/ha), et, (2) les références départementales de l'agriculture biologique en ce qui concerne les rendements annuels moyens (eg. céréales d'hiver ABio Oise 2015-18 =35.5 q/ha ; CA60 – communication personnelle). Cette seconde référence a été retenue du fait que la re-conception SCA0PEST, sans pesticides et avec une fertilisation azotée restreinte pour ne pas risquer de favoriser les adventices, pourrait mener à des rendements locaux réduits, possiblement proches de ceux de l'agriculture biologique, qui pourraient mériter une valorisation autre que conventionnelle pour rendre le système viable économiquement. Prendre en compte ces références biologiques coïnciderait de fait bien avec les premières réflexions entreprises d'une conversion à l'agriculture biologique de tout ou partie de l'exploitation hôte.

Au cours du programme SCA0PEST (2013-18) 5 campagnes culturales successives ont été conduites, de 2013-14 à 2017-18, au sein de 6 parcelles expérimentales. Ce sont donc au final 30 combinaisons « parcelle * culture » qui furent conduites (Tableau 1).

Tableau 1 : Succession culturale prévue et réalisée pour chacune des parcelles expérimentales SCA0PEST.

N° de parcelles SCA0PEST	P ₁ (à l'est – haut)	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆ (à l'ouest – bas)
2013-14	Tournesol + Luzerne	Luzerne 1	Féverole H	Orge P	Blé H 1	Blé H 2
2014-15	Luzerne 1	Luzerne 2	Blé H 2	Féverole H	Colza H	Tournesol + Luzerne
2015-16	Luzerne 2	Blé H 1	Tournesol + Luzerne	Blé H 2	Orge P	Luzerne 1
2016-17	Blé H 1	Colza H (*) Orge P	Luzerne 1	Tournesol + Luzerne	Féverole H	Luzerne 2
2017-18	Colza H (*) Orge P	Féverole H	Luzerne 2	Luzerne 1	Blé H 2	Blé H 1

(*) Du fait de pressions limaces fortes et de densité de peuplement à la levée trop réduite, le terme colza d'hiver a été remplacé par l'orge de printemps lors de la même campagne.

1.3 Leviers mobilisés pour la gestion des ennemis des cultures

Sur l'ensemble du système, divers leviers agronomiques comme techniques faisant appel tant à la substitution qu'à la reconception du système (Hill et MacRae, 1995) ont été mobilisés pour pallier le non recours aux pesticides (Tableau 2) et évaluer les performances du système ainsi testé.

Tableau 2 : Leviers de substitution et de reconception mobilisés pour le contrôle des ennemis des cultures

		Leviers mobilisés														Objectif de réduction d'IFT (%)	Objectif de Rdt (en % des ref)
SCA0PEST : cultures de vente, fourrages, oléagineux et ligno-cellulose		Contrôle cultural								Contrôle Génétique		Contrôle biologique		Contrôle physique			
Site	Système étudiés	Allongement de la rotation	Recours aux cultures étouffantes	Recours aux cultures intermédiaires	Recours aux cultures associées	Labour	Faux semis ≠ stock semencier	Date de semis retardée	Densité de semis accrue	Variété résistante-tolérante	Mélanges variétaux	Gestion abords pour favoriser les auxiliaires	Utilisation produits de lutte biologique	Désherbage mécanique	Effaroucheurs, filets ...		
UniLaSalle Beauvais – Le Marquis	SDC de référence "CBO ref"	3 ans	0	0	0	0	X	0	0	X	0	0	0	X	0	0%	100%
	SDC reconçu : SCA0PEST	8 ans	X (1)	XX	X (2)	X	xxx	X	XX	XX	X (3)	XX	X (4)	xxx	X	100%	75% de CBO_ref (5) 120% de CBO_ref (6)

Détails : (1) Luzerne ; (2) Tournesol + luzerne ; Colza + légumineuses gélives ; (3) Mélanges variétaux de blé d'hiver et colza ; (4) Contans sur colza et tournesol ; (5) pour les cultures annuelles prises seules ; (6) pour l'ensemble cultures + arbres ; (0) = levier non retenu / non appliqué ; X = levier retenu pour moins de 25% des termes de la rotation ; XX = levier retenu pour moins de 55% des termes de la rotation ; XXX = levier retenu pour moins de 75% des termes de la rotation

S'ils ont été mis en place au départ du projet SCA0PEST, certains de ces leviers ont été reconsidérés ou adaptés afin de prendre en compte les changements de conditions culturelles vécus (climatiques pour l'essentiel) et de répondre au mieux aux pressions biotiques rencontrées (limaces et adventices pour l'essentiel).

Ainsi, si à l'origine le système SCA0PEST faisait la part belle aux cultures de services, intermédiaires ou associées, l'échec lors des années sèches (ou trop humides) de la mise en place de ces cultures a nécessité de réviser les modes de gestion des adventices automnales et d'opter pour (i) un accroissement du nombre de faux-semis lorsque possible ou (2) le recours à des labours d'automne non initialement prévus. De la même manière, les limites du contrôle par les auxiliaires de cultures de la pression limaces au semis des colzas auront nécessité certaines années d'accroître les travaux du sol, et pour deux années, d'implanter un autre terme après plusieurs échecs de levée consécutifs. A l'inverse, les autres leviers ont été conservés et sont encore déployés sur le système SCA0PEST.

1.4 Suivis réalisés et indicateurs de performances

L'évolution de la pression des bio-agresseurs (ravageurs, adventices et maladies) était enregistrée annuellement. Conformément aux protocoles de suivi Res0pest, fréquence et intensité de pressions étaient estimées et ce, à 4 stades de développement des couverts pour chaque culture, stades qui étaient communs avec Res0pest. Parallèlement, le suivi des populations de certains bioindicateurs auxiliaires tels que les carabes et les lombrics était entrepris respectivement annuellement et tous les 3 ans. Pour d'autres bioindicateurs tels les pollinisateurs, passereaux ou chiroptères des suivis non réguliers ont aussi été mis en œuvre.

Pour chacune des cultures présentes annuellement, un certain nombre d'indicateurs d'état et de fonctionnement des peuplements cultivés ont aussi été mesurés. Composantes du rendement, rendements finaux (biologiques et agricoles) et qualité du rendement (teneur en protéines, acides gras, contamination des graines à la récolte, mycotoxines) étaient mesurés sur 8 zones d'observation (4*4 m ; géolocalisées et permanentes dans le temps) sur chacune des 6 parcelles expérimentales. L'intégralité des interventions, matériels mobilisés et charges/temps de travail était tracée. Au sein de la matrice agroforestière, annuellement, des mesures individuelles de croissance et de développement des arbres ont été conduites. Pour 5 des essences forestières présentes sur la parcelle (noyers hybride et commun, érables sycomore et plane, pommier) et communes avec d'autres programmes de recherche (CasDAR Agroforesterie 2008-11, ADEME PARASOL) pour lesquels nous disposons de parcelles agroforestières expérimentales situées dans d'autres régions, donc d'une gamme plus large de situations expérimentales, des mesures compartimentées des biomasses, densités de bois et surface photosynthétique ont été réalisées après destruction partielle ou totale d'individus arborés. Les jeux de données spécifiques ainsi constitués ont permis la construction de modèles allométriques d'estimation de la biomasse aérienne sur pied puis de son équivalent carbone. On entend par modèle allométrique, des modèles mathématiques permettant d'estimer le volume, la biomasse d'un organe (si l'on dispose de la densité volumique du bois) voire d'un arbre en entier à partir de caractéristiques dimensionnelles i.e. dendrométriques simples d'accès telle sa longueur, son(ses) diamètre(s), sa hauteur d'insertion, etc. (Picard et al., 2012). Outre les comparaisons immédiates possibles, une majeure partie des résultats recueillis au cours des 5 campagnes culturales a permis de simuler le fonctionnement et la productivité biomasse et carbone de la matrice arborée (HisAFé⁶) comme les performances agrotechniques (STEPHY⁷) et globales du système (CRITER+MASC 2.0⁸ et DEXiAF⁹).

⁶ <https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/hi-safe/>

⁷ http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/bin/Setup_Calculateur_Stephy_Version_1-7-

⁸ <https://www6.inra.fr/means/Outils-d-analyse-multicritere/MASC/Presentation-de-CRITER>

⁹ <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01706975/document>

2. Résultats et discussions

Il n'a pas été retenu de présenter l'intégralité des résultats obtenus lors du projet SCA0PEST. Cependant bon nombre d'entre eux sont disponibles pour consultation et sont référencés sur le site officiel du projet. Notre choix s'est porté sur des résultats permettant la comparaison avec les autres projets du programme Dephy EXPE, ou permettant d'en souligner les différences en termes d'acquis.

2.1 Données climatiques et pressions ravageurs rencontrées

Les 5 campagnes culturales (2013-14 à 2017-18) menées auront été contrastées climatiquement (Tableau 3). Climatiquement, la campagne 3 (2015-16) fut la plus productive parce que – présentant une pluviométrie annuelle satisfaisante et habituelle (non comme 2014-15 qui présenta une pluviométrie réduite de près de 30% par rapport à la moyenne locale multiannuelle, i.e. 673 mm/an) et – dont les pluies furent régulières et non trop abondantes permettant la rentrée dans les parcelles et les interventions de désherbage mécaniques prévues (tout à l'inverse de 2013-14). Concernant les deux dernières campagnes, 2016-17 fut une année relativement froide et quand 2017-18 fut froide mais aussi « sèche », présentant des déficits hydriques à des moments clés du cycle de vie des plantes. Côté ravageurs, on soulignera ici le fait que l'absence de pesticides et plus particulièrement de molluscicide ne nous aura pas permis 2 campagnes sur 3 de disposer d'un peuplement de colza d'hiver suffisant pour être maintenu. Côté adventices, on gardera en tête l'omniprésence de vulpin des champs sur toute l'expérimentation SCA0PEST mais surtout les difficultés rencontrées lors des 2 premières campagnes avec un brome stérile hérité du système Colza-Blé-Orge précédent, et l'apparition d'agrostis alors qu'elle n'avait historiquement jamais été signalée comme adventice très présente.

Tableau 3 : Conditions climatiques et bioagresseurs présentant des niveaux de pression annuels élevés

Variables climatiques	P _{annuelle} (mm)	P _{Hiver} (oct-mars) (mm)	P _{été} (avr-août) (mm)	NJ _{gel/an} (T°min ≤ 0°C)	NJ _{chaud/an} (T°max ≥ 27°C)	Pressions bioagresseurs	Pressions maladies
2013-14	814	408	360	24	13	Sitones (luzerne, féverole), pucerons noirs (féverole), limaces (colza)	Pseudopeziza (luzerne), rouille (féverole),
2014-15	474	286	129	47	35	Sitones et phytonomes (luzerne), limace (colza), lièvres (tournesol)	Rouilles jaunes et fusariose de l'épi (blés), alternaria (colza)
2015-16	759	440	290	36	27	Criocères (blés, orge P), campagnols (luzernes), limaces (orge P)	Fusariose de l'épi (blés), ramulariose et rychnosporiose (orge P)
2016-17	732	413	296	56	27	Limaces (colza et tournesol), campagnols (luzernes), sitones et bruches (féverole)	Sclerotinia (tournesol), botrytis (féverole)
2017-18	607	382	207	61	38	Limaces (colza), sitones (féveroles)	Ramulariose et helminthosporiose (orge P), rouille (féverole), septoriose, helminthosporiose et rouille brune (blés)

(P=pluies ; NJ = nombre annuel de jours ; T°min = température journalière minimale ; T°max = température journalière maximale ; couleur orange = conditions défavorables / moyenne pluriannuelle 1998-2013, couleur jaune = conditions neutres / moyenne pluriannuelle 1998-2013, couleur verte = conditions favorables / moyenne pluriannuelle 1998-2013)

2.2 Productivité du système et résultats économiques

Au total, ce sont 5 campagnes culturales (2013-14 à 2017-18) qui ont été menées, c'est-à-dire récoltées, au sein de SCA0PEST. Parmi les cultures constitutives de SCA0PEST, le colza d'hiver n'est pas présenté car très régulièrement (2 années sur 3) abandonné (Tableau 1) pour cause d'infestation limaces et de peuplement insuffisamment dense pour être mené à son terme. Cela malgré le recours consécutif annuel à plusieurs leviers tels le labour, le travail superficiel des sols (faux semis). Considéré comme impossible à mener, le colza a été retiré de la rotation SCA0PEST au moment de l'évaluation des performances du système SCA0PEST alors qu'il était conservé au sein du système de culture de référence CBO-ref pour disposer d'une comparaison représentative de la réalité rencontrée.

L'objectif fixé était d'atteindre en conditions de non recours aux pesticides et de réduction de la fertilisation azotée 75% des rendements de référence de la zone SCA0PEST, obtenus eux par l'emploi de pesticides (Tableau 2) ; soit par exemple pour une céréale d'hiver avec pesticides produites en moyenne à 52 q/ha, $52 * 0.75 = 39$ q/ha. Au sein de la Figure 3-a ci-dessus, nous observons qu'hormis pour la féverole, aucun des termes de la rotation n'atteint les rendements de référence fixés. L'écart pour le blé 1 est par exemple de près de 20% par rapport aux rendements de référence, indiquant des rendements moyens sur 5 années successives de 31 q/ha au lieu des 39 q/ha attendus.

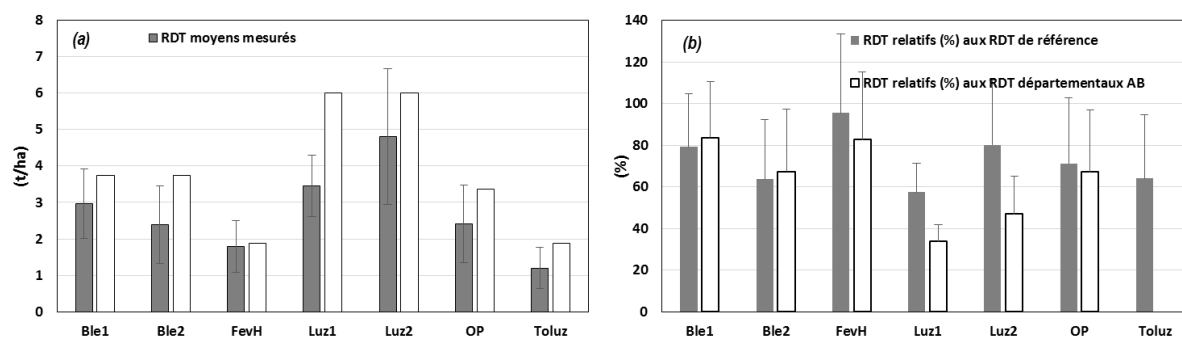


Figure 3 : (a) Rendements pluriannuels moyens (t/ha) des termes de la rotation SCA0PEST (barres grises) et rappel des rendements de référence visés (barres blanches ; soient 75% des rendements historiques conventionnels locaux) ; (b) Rendements pluriannuels moyens (%) exprimés en % des rendements de référence conventionnels (barres grises) et des rendements départementaux moyens issus de l'agriculture biologique (barres blanches ; G. Salitot (CA60) : communication personnelle). Blé 1 = blé d'hiver suivant la luzerne ; Blé 2 = blé d'hiver suivant la féverole d'hiver ; barres d'erreur = écart type standard.

En second lieu, on peut observer au sein de la Figure 3-a que la variabilité des rendements a été forte pour l'ensemble des termes de la rotation, suggérant un effet "année culturale" fort. Et en effet, des climats extrêmes (sécheresse 2015-16 et 2017-18, infestation rouille jaune 2016) ne nous auront pas permis de disposer de conditions "idéales" (telles 2015), année pendant laquelle l'ensemble des termes présents ont atteint des résultats proches des objectifs de rendement : 85-95% pour les blés d'hiver, 92% pour l'orge de printemps, 95% pour la luzerne 2 et 118% pour la féverole. Par contre, la luzerne 1, le tournesol n'ont jamais dépassé les 75% même en conditions climatiques favorables.

De sorte de se rendre compte des performances de productivité de SCA0PEST nous avons aussi comparé nos résultats aux rendements AB départementaux, tous sols confondus (Figure 3-b). Localement, le colza comme le tournesol ne sont pas cultivés en AB et ne disposent pas d'une référence AB locale. Ici, la féverole mais aussi le blé et l'orge talonnent les références biologiques départementales puisqu'elles permettent approximativement 80% de ces dernières. Si cela peut sembler décevant alors que l'on a recours aux fertilisants minéraux, il est bon ici de rappeler que la nature des sols convertis à l'agriculture biologique (limono-argileux, potentiel de rendement ≈ 90 q/ha) est généralement bien plus favorable que ceux de SCA0PEST, expliquant en grande partie cet écart.

A partir des données agrotechniques enregistrées, nous avons pu dans un deuxième temps conduire une analyse des performances économiques de SCA0PEST hors production forestière ; pour ce faire nous avons utilisé la calculatrice STEPHY. Nous avons choisi de comparer les performances relatives à (i) SCA0PEST – valeurs moyennes sur 5 campagnes, (ii) SCA0PEST – valeurs maximales par terme de la rotation (hors colza) et indépendamment de l'année climatique considérée et à (iii) le système CBO de référence sur les 5 mêmes années climatiques.

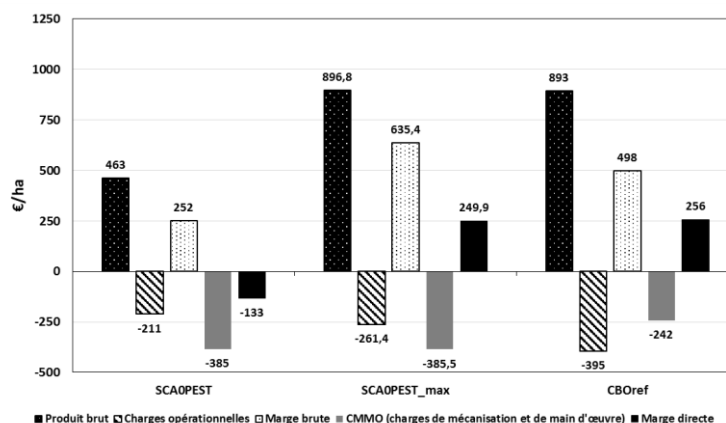


Figure 4 : Performances économiques issues du calculateur STEPHY des systèmes de culture SCA0PEST et CBO de référence, ainsi que du système SCA0PEST en ne retenant que les rendements maximaux obtenus, indépendamment des années culturales (SCA0PEST_max).

Il est clair que les performances économiques du système SCA0PEST du fait de rendements moyens sur 5 campagnes inférieurs aux rendements objectifs assignés, ne sont pas bonnes. Avec une marge directe de -133€/ha comparée aux 256€/ha du système de référence, SCA0PEST n'est pas viable en l'état. Par contre, lorsque l'on prend en compte, par terme de la rotation, les itinéraires techniques des années pour lesquelles le rendement a été maximal, on voit que les coûts tant opérationnels que de mécanisation et de main d'œuvre ne changent quasi pas, et que la marge directe atteint alors les 250€/ha. Pour ces indicateurs-ci, le rendement est bel et bien crucial et sa limitation en valeur moyenne explique plus que tout le résultat décevant obtenu.

Au sein du système SCA0PEST, deux autres sources indirectes de revenu pourraient néanmoins être considérées :

- L'introduction de luzerne enrubannée au sein de la ration alimentaire hivernale des vaches laitières Prim'Holstein représente une économie nette de l'ordre de 3-5€/1000l du fait du remplacement du maïs fourrager par la luzerne et de fait une économie en tourteaux protéiques (IDELE, 2011). A coût médian (4€/1000l), sur les 5 mois d'hiver, l'économie représente 700€ pour une parcelle de 5ha à rendement objectif atteint (8t/ha). Puisque pour la luzerne, nous ne sommes parvenus à produire en moyenne sur 5 années que 51% du rendement objectif fixé, 10ha seraient nécessaires. Pour un revenu net à l'hectare de 70€/ha qui pourraient être considérés comme un revenu supplémentaire.
- D'autre part, la production de bois au sein de la matrice arborée (densité finale = 50 arbres/ha) au sein des sols SCA0PEST, à 60 ans, représente une biomasse de l'ordre de 1 t/arbre dont 65% compris dans la grume (Figure 5). Dès lors, avec une valeur moyenne fixée a priori et selon cours actuels à 85€/m³ (avec 1 m³ = 0.8 tonne), et en tenant compte de la valorisation des résidus des tailles et émondages des arbres têtards, à raison de 25.5 m³/ha de plaquettes à 80€/m³, ce pourraient être près de 90€/ha/an à imaginer intégrer à la marge directe annuelle à l'hectare.

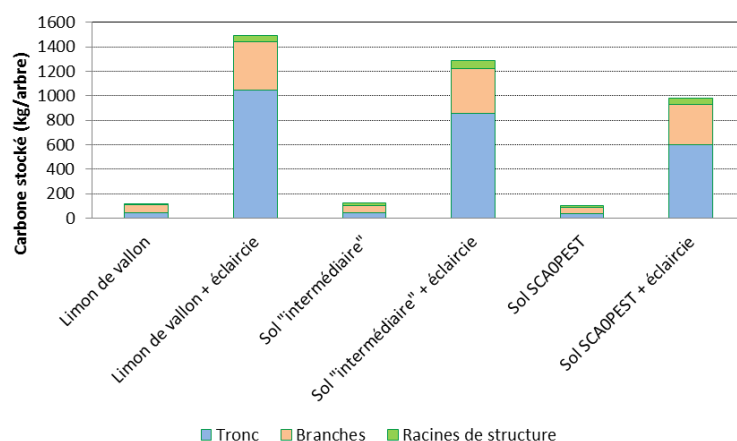


Figure 5 : Biomasses compartimentales simulées à 60 ans de noyers selon un scénario climatique moyen (2003-15), les sols limitants (argile à silex, SCA0PEST), intermédiaires (argile limoneux) et optimaux (Limon de vallon) de la parcelle et en situation de densité actuelle (86 ha⁻¹) et après éclaircie (36 ha⁻¹) (HisAFé ; Boulanger, 2015).

Ce qui au total représenterait 160€/ha/an de revenu net à considérer. Cette valeur pourrait être revue à la hausse d'ici à la valorisation finale des arbres menés en bois d'œuvre du fait d'une demande en plaquettes forestières mais aussi d'une demande en rachat de crédits carbone plus fréquente et aux cours toujours plus élevés. Malgré cela, seule l'atteinte des rendements objectifs, tel qu'imaginé en considérant SCA0PEST_max, plus ces revenus supplémentaires permettraient d'approcher la marge directe atteinte par le système de référence, ici 250€/ha/an.

2.3 Emissions GES moyennes annuelles

Concernant les émissions de gaz à effet de serre (GES), les bilans ont été calculés pour les 5 campagnes, parcelle expérimentale par parcelle expérimentale sur SCA0PEST et pour le reste de la parcelle menée de manière conventionnelle en technique culturale simplifiée. Dans les deux cas, les itinéraires techniques enregistrés en continu et pour chaque type d'intervention auront facilité le travail d'estimation des bilans GES émis.

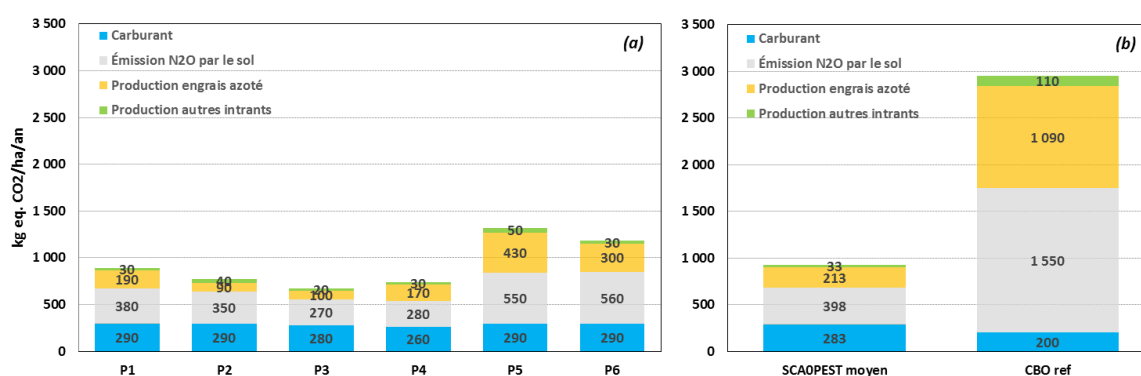


Figure 6 : Bilans GES (kg eq.CO₂/ha/an) obtenus à partir des itinéraires techniques 2013 à 2018, (a) soient 5 campagnes culturales successives, au sein des parcelles expérimentales SCA0PEST (n=6) et (b) à l'échelle du système SCA0PEST et du reste de la parcelle hôte hébergeant le système CBO de référence (EGES®).

Au sein des six parcelles expérimentales, le bilan GES est généralement inférieur à 1000 kg eq.CO₂/ha/an et proche de 700 kg eq.CO₂/ha/an dès lors que les parcelles ont accueilli la luzerne au cours des 5 campagnes (P1 à P4). Dans le cas contraire, comme c'est le cas pour les parcelles P5 et P6, le bilan GES est plus élevé du fait de travaux du sol, faux semis et désherbages

mécaniques plus nombreux sur les 5 campagnes culturales. Il atteint alors près de 1200 kg eq.CO₂/ha/an. En moyenne toutes années et parcelles confondues, SCA0PEST démontre un bilan très satisfaisant puisque de 69% inférieur à celui du système de référence, respectivement 928 et 2950 kg eq.CO₂/ha/an.

Si le bilan GES du poste "carburant" pour SCA0PEST est généralement supérieur de 42% par rapport à CBO-ref, parce que faisant la place belle au désherbage mécanique, aux faux semis et au semis de couverts intermédiaires ou associés, c'est le poste "azote" ("émissions NO₂ des sols" et "production d'azote") qui explique la différence observée. En effet, les apports azotés totaux pour le système CBO de référence, selon la culture considérée et les plans d'épandage annuels, sont généralement compris entre 170 et 230 UN/ha/an alors que le système SCA0PEST (hors colza) a nécessité, par application de la méthode du bilan azoté et après intégration du risque de transfert nitrates par infiltration (Aquaplaine®), des apports azotés moyens de l'ordre de 65 UN/ha/an. Cela se traduit au final par un bilan GES "azote" pour SCA0PEST inférieur de 77% par rapport à CBO-ref.

2.4 Productivité de la matrice arborée

Sur l'intégralité de la parcelle, au sein des lignes d'arbres, la croissance des arbres agroforestiers est suivie annuellement. Des mesures dendrométriques non destructives sont conduites tous les deux ans (hauteurs, diamètres du tronc à différentes hauteurs) quand des mesures allométriques partiellement ou totalement destructives sont conduites tous les ans pour certaines essences (érables, pommier, noyers - nombre de branches d'ordre divers, extinction des diamètres le long des branches et tronc, densité du bois, surface foliaire puis biomasses fraîches et sèches des divers compartiments prélevés). L'ensemble de ces données permettent d'établir diverses relations mathématiques dites allométriques, c'est-à-dire morphométriques reliant la taille avec la biomasse des compartiments composant l'arbre (expl. équation reliant la biomasse sèche d'une branche en fonction de son diamètre basal ; biomasse foliaire d'une branche en fonction de sa longueur ; diamètre d'une branche en fonction de la somme des diamètres des sous-branches la composant...). Puis, parce que les branches d'un arbre sont souvent composés de sous-branches ressemblant à la précédente mais en réduction (fractalité), il devient possible d'intégrer un modèle allométrique spécifique d'organes d'ordre secondaire ou tertiaire (branche de branche par exemple) au sein du modèle allométrique de l'organe d'ordre supérieur (la branche charpentière portant cette branche de branche, et ses équivalentes). Si cette intégration en cascade des modèles allométriques est conduite à bien, on parvient au final à un modèle unique plus ou moins robuste permettant d'estimer la biomasse totale aérienne d'un arbre, modèle valide pour une gamme d'âge donnée, à partir de son seul diamètre à hauteur de poitrine (DBH) et/ou de sa hauteur, et ce, sans avoir besoin de le détruire. Ce travail de modélisation au sein de SCA0PEST a été entrepris sur noyers hybrides et communs (Havas, 2010 ; Grandgirard, 2013), sur pommiers (Cuisinier, 2016) et sur érables sycomores et planes (Béral et al., 2018).

Pour disposer de modèles allométriques de prédiction non destructive de la biomasse arborée aérienne fiables pour une gamme d'âge élargie (3-25 ans), seules 5 des 10 essences forestières présentes sur la parcelle du Marquis (parcelle hébergeant SCA0PEST) ont été étudiées. Elles étaient communes au site expérimental du Marquis à Beauvais (pommier, érables sycomores et planes et noyers communs et hybrides de 3, 5, 7 et 9 ans d'âge), au réseau de sites PARASOL (érables et pommiers de 25-30 ans d'âge) ainsi qu'au réseau PIRAT en ce qui concerne les noyers (18-25 ans d'âge).

En parallèle, et après intégration au sein du modèle HisAFé des caractéristiques physicochimiques de 3 sols types de la parcelle agroforestière (limons de vallon – argilo-limoneux et – argile à silex = celui de SCA0PEST) et d'un scénario climatique provenant des climats observés entre 2000 et 2015 à Beauvais, les courbes simulées d'évolution du diamètre à hauteur de poitrine (DBH, cm), et de la productivité totale de biomasse sèche ont été obtenues par simulation (Figure 7) selon 6 combinaisons :

3 types de sol * 2 densités d'arbres (densité initiale - 95 arbres/ha et densité finale 40 arbres/ha). Est aussi simulée, l'impact d'une éclaircie à 40 arbres/ha. Les valeurs simulées avec éclaircie nous servant de courbe d'évolution de la biomasse aérienne de référence.

En ce qui concerne SCA0PEST, après éclaircie et à 60 ans d'âge (trait vert plein), pour un climat stable, le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) des noyers devrait atteindre 65cm. A 8 ans d'âge, c'est-à-dire en 2018 et toujours d'après simulation, ce même DBH devait faire 4.59cm (± 0.54) (Figure 7). Ces valeurs 2018 estimées ont alors été confrontées aux valeurs réelles mesurées. En sol argileux à silex (SCA0PEST), le diamètre moyen des noyers, érables et pommiers étaient respectivement de 6.16cm (± 2.33), 8,26cm ($\pm 2,26$) et 8,73cm ($\pm 1,75$) en 2018. De fait dès 2018, le DBH observé était supérieur à celui modélisé et par conservatisme, nous considérons à ce jour que la courbe de référence pour les argiles à silex en situation d'éclaircie à 40 arbres/ha sera respectée. Toutes choses égales par ailleurs, nous pourrions de fait atteindre une séquestration carbone moyenne annuelle au sein de la biomasse totale (souterraine comprise) de 1000.8 kgCO₂/ha/an, c'est-à-dire, équivalente voire supérieure aux émissions moyenne actuelles du système SCA0PEST (928 kgCO₂/ha/an émis ; voir Figure 6).

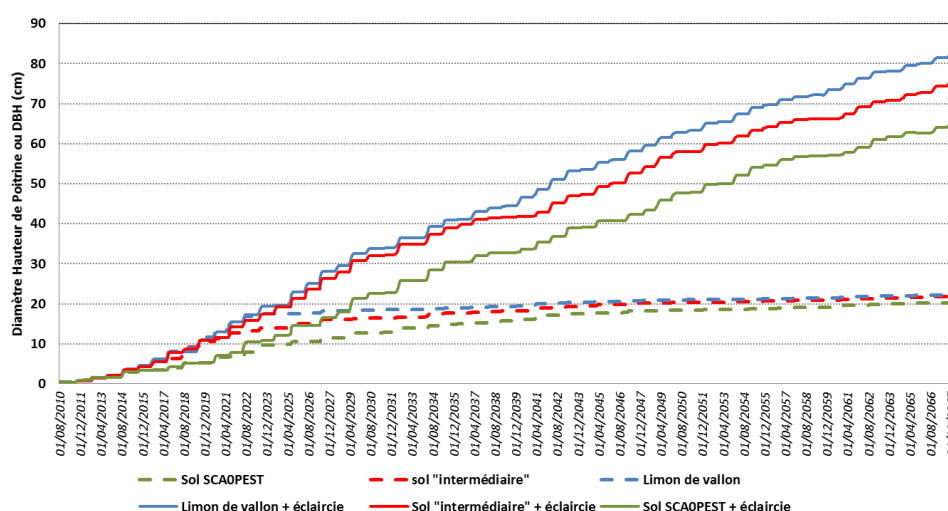


Figure 7 : Simulations HisAF de l'évolution du diamètre à hauteur de poitrine (DBH, cm) pour les noyers, selon 3 types de sols représentatifs de la parcelle (dont celui de SCA0PEST) et deux modes de gestion de la densité d'arbres à l'hectare (90 arbres/ha ou 40 arbres/ha).

2.5 Performances globales du système SCA0PEST

Ce dernier résultat, celui de la compensation carbone par les arbres agroforestiers démontre l'intérêt du système SCA0PEST pour certaines dimensions de sa durabilité. De fait il est temps de considérer la durabilité dans sa globalité. Cela a été entrepris selon deux méthodes différentes : la première *ex ante* (selon ITK prévisionnels et rendements de référence arrêtés) puis *ex post* (selon ITK réels et rendements atteints) en ayant recours à CRITER+MASC2.0, la seconde en utilisant l'outil DEXiAF récemment développé entre les consortiums DEPHY EXPE SCA0PEST, EXPE Vertical et EXPE ALTO. Les résultats étant au final très proches, bien que DEXiAF ne soit que qualitatif pour l'heure, seuls les résultats *ex post* CRITER+MASC2.0 vous sont ici présentés (Dourdan, 2018).

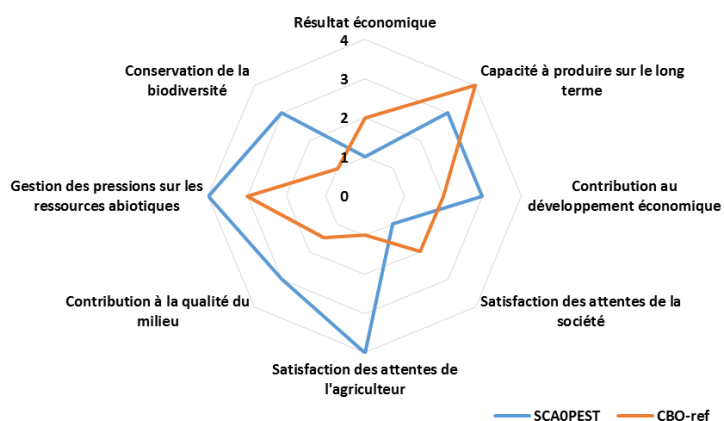


Figure 8 : Résultats des évaluations ex post des systèmes SCA0PEST et CBO-ref / CRITER+MASC2.0

Une fois encore le système SCA0PEST du fait de ses rendements très faibles n'est pas durable économiquement (note de 2/4) alors qu'il ressort durable (note de 3/4) et fortement durable (note de 4/4) pour les dimensions sociales et environnementales respectivement. Ces derniers résultats sont principalement la conséquence d'une pression très limitée exercée sur les ressources tant biotiques qu'abiotiques. En sus, on observe que SCA0PEST est très peu durable du fait qu'il ne satisfait que trop peu les attentes de la société ; cette sous-dimension est le pendant de l'économique car est considérée ici la capacité du système à approvisionner des filières en matières premières alimentaires. On notera en outre que la contribution à la qualité du milieu ressort déjà fortement durable alors que CRITER+MASC2.0 ne peut prendre en compte la présence de la matrice agroforestière et ses impacts sur les cultures intercalées.

A l'opposé, le système CBO-ref est quant à lui faible économiquement (note de 2/4) et très faible (note de 1/4) pour les dimensions sociales et environnementales et ce malgré les rendements obtenus en employant de manière raisonnée certes, mais conventionnelle des pesticides.

Conclusions

Nous avons au travers des résultats présentés pris connaissance des performances du système SCA0PEST. Système agroforestier de grandes cultures s'interdisant le recours aux pesticides et cherchant à accroître l'autonomie protéique de l'atelier bovin lait et à disposer d'une possibilité de différenciation de ses productions sur le marché, il a à ce jour atteint une partie de ses objectifs.

Les rendements moyens obtenus par culture ne sont pas à la hauteur de ce qui était attendu ; nous n'atteignons que 60-80% des rendements attendus. Et fait très surprenant, la luzerne comme le tournesol, deux cultures décrites comme appréciant des sols calcaires hydriquement limitants comme le sont les sols SCA0PEST, sont parmi les cultures pour lesquelles ces résultats sont les plus mauvais. Ce résultat est important parce que, couplé au fait qu'il nous a été impossible de produire du colza 2 années sur 5 du fait d'une pression "limaces" impossible à contrôler, ce sont deux des résultats escomptés, une autonomie protéique accrue à l'échelle de l'exploitation et des productions de rente à prix élevés (colza, tournesol) que nous n'avons pas été en capacité de verser au bilan financier.

Heureusement d'autres résultats et références sont de bon augure. D'une part, lors d'année climatique favorable (2015) les rendements des cultures parviennent à atteindre 85-118% des rendements de référence attendus ; ce qui tend à démontrer qu'en situation de réserve hydrique plus élevée pour un type de sol équivalent, nous aurions pu peut-être nous rapprocher des marges directes attendues pour la plus part des cultures. Secundo, nous avons pu constater que la croissance arborée de la matrice agroforestière avait jusque-là une croissance annuelle supérieure à celle attendue, nous permettant d'envisager une compensation carbone quasiment équivalente aux émissions CO₂ actuelles du

système zéro pesticide. Ceci indique que pour les cultures les plus productives en sols limitants (céréales, féveroles à ce jour), ces productions pourraient à terme être commercialisées avec un bilan Carbone net potentiellement nul. Ceci présageant de revenus supplémentaires que nous n'avons cependant pas envisagé ici.

Malgré les revenus indirects actuellement chiffrés (vente de bois, de plaquettes forestière et économie en concentrés protéiques, approx. 160€/ha/an) il est clair que sans un niveau de rendement plus élevé, ce qui passerait par une réserve utile plus grande puis par le choix de cultures de rente possiblement autres, le système n'est pas économiquement viable. Trop fragile en ce qui concerne les oléagineux, il nécessite de réfléchir la possibilité de recourir à minima à certains pesticides en première place desquels, les molluscicides. Ceci pourrait être envisagé au sein de parcelles expérimentales à sol plus "fertile", à réserve utile plus importante. C'est ce que nous avons décidé de mettre en place au sein d'un dispositif agroforestier de limons de plateau (RU de 175 mm, 125-150cm de profondeur) où 6 nouvelles parcelles se verront être implantées et menées comme SCA0PEST. Le système SCA0PEST en sols d'argiles à silex quant à lui devrait perdurer et nous chercherons à l'adapter en révisant certes l'opportunité d'y déployer du colza, mais aussi en cherchant à y adjoindre d'autres cultures telle le chanvre et/ou la caméline, de nouvelles cultures fourragères (trèfle+avoine+raygrass).

Bien entendu, l'éventualité de bénéficier d'une valorisation économique accrue des productions d'ores-et-déjà possibles (blés, féverole, orge), possiblement via la conversion à l'agriculture biologique voire de bonification des prix d'achat du fait de l'empreinte carbone quasi nulle seront considérées. Elles nécessiteront cependant une petite révolution idéologique et stratégique tant au sein de l'exploitation agricole d'UniLaSalle que des filières locales. Mais cela ne relève pas pour l'heure des résultats du programme DEPHY Ecophyto EXPE SCA0PEST.

Remerciements : Nous tenons à remercier ici toutes les personnes qui ont contribué aux réflexions, travaux et à la conduite de SCA0PEST au cours de ces 6 années. La conduite du dispositif SCA0PEST a été permise par l'implication de nombreux collègues de la Ferme du Bois, en particulier P. Chantepie et B. Lepers. Les travaux d'allométrie ont partiellement été entrepris avec le concours des étudiants du master ASET promotions 151 à 157 ; nous tenons à les remercier de leur pleine participation. Nous tenons aussi à remercier les nombreuses personnes ayant donné de leur temps et participé aux ateliers, visites et tours de plaines au cours de ces 6 années : J.L. Ortegat, A.S. Colart et B. Réal, H. Péru et O. Scheurer, C. Leclercq et J.D. Clément, Y. Pivain. Un grand merci aux nombreux stagiaires qui se succédèrent sur le dispositif et constituèrent des *task forces* plus qu'agréables ! Vous êtes trop nombreux pour que nous puissions tous vous rendre hommage. Enfin nous tenons à remercier les membres et financeurs du réseau DEPHY Ecophyto EXPE (action pilotée par le ministère chargé de l'agriculture, avec l'appui financier de l'Agence Française de la Biodiversité, par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du plan Ecophyto 2018).

Références bibliographiques

- Béral C., Andueza D., Ginane C., Bernard M., Liagre F., Girardin N., Emile J-C., Novak S., Grandgirard D., Deiss V., Bizeray D., Thiery M., Rocher A., 2018. Agroforesterie en système d'élevage ovin : étude de son potentiel dans le cadre de l'adaptation au changement climatique. 158p
- Boulanger O., 2015. Etude du potentiel de séquestration de carbone d'une parcelle agroforestière à faible utilisation d'intrants à l'aide du modèle de fonctionnement des systèmes agroforestiers tempérés Hi-sAFé. Rapport de Master 3A, 1^{ère} année. SupAgro Montpellier, 34p
- Cardinael R., Chevallier T., Cambou A., Béral C., Bathès B.G., Dupraz C., Kouakoua E., Chenu C., 2016. Increase of soil organic carbon stock under agroforestry : a survey of different sites in France. 3rd European Agroforestry Conference. Montpellier, 23-25th may 2016, Agroforestry and climate change oral session

Cellier V., Berthier A., Colnenne-David C., Darras S., Deytieux V., Savoie A., Aubertot J.N., 2018. Evaluation multicritère de systèmes de culture zéro-pesticides en grande culture et polyculture-élevage (Réseau RésOPEst). *Innovations Agronomiques* 70, 273-289

Cuisinier V., 2016. Détermination allométrique des biomasses arborées aériennes de systèmes sylvopastoraux. ADEME PARASOL (2015-18) ; Rapport de stage d'Ingénieur en agriculture, Institut Polytechnique Lasalle Beauvais, 61p

Dourdan, 2018. Evaluation des performances vers l'amélioration d'un système de culture agroforestier sans pesticides - Quel est le niveau de performance global actuel du dispositif SCAOPEST ? Rapport de stage Master 1, Mention Biologie-Agrosciences, Parcours APVV, Université Rennes 1, 53p

Grandgirard D., 2013. SCAOPEST : N°X2IN60GP - Inventaire structuré de l'état des connaissances et des résultats. Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, 38 p

Grandgirard D., Oheix S., Leclercq C., Lançon L., Liagre F., Dupraz C., Mézière D., Poulain J.L., Wartelle R., 2014. SCAOPEST, a pesticide-free agroforestry cropping system: ex-ante performances evaluation. In *Proceedings of the 11th EURAF European Agroforestry Conference*, 4-6th June 2014, Cottbus, Germany

Guide des sols de l'Oise, 1997. Fiche Oise des Argiles à silex - ISAB, CA 60. 4p

Havas M., 2010. Wood production in walnut agroforestry systems in France. Master thesis, Forest Ecology and Management, Wageningen university, 46p

Hill S.B., MacRae R.J., 1995. Conceptual frameworks for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 7, 81-87

Holo Ba B., 2016. Modélisation et optimisation de chaînes d'approvisionnement en biomasses pour des bioraffineries. Thèse de doctorat en Optimisation et Sécurité des Systèmes, UTT, Troyes, France

IDELE, 2011. Introduction de luzerne dans le système fourrager – Optimisation des résultats économiques en élevage laitier. Réseaux d'élevage pour le conseil et la prospective. Collection Résultats Annuels. 6p

Lorenz K., Lal R., 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry system. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34: 443-454

Pernel J., 2016. Vers des Systèmes de Culture Intégrés avec encore moins d'herbicides. AGT-RT : Agrotransfert Ressources et Territoires, 20p

Picard N., Saint-André L., Henry M., 2012. Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres: de la mesure de terrain à la prédiction. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, et Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 220p

Ronceux A., 2017. Performances pour la gestion des adventices et de l'azote en agriculture biologique – Résultats sur le GAEC Ortegat. Agri-bio : de la connaissance à la performance. 8p

Scheurer O., 2000. Atlas Agriculture-Environnement de l'Oise – Relations spatiales entre sensibilité des sols et activité agricole. ISAB, Chaire de l'Environnement. 42p

Yu X., 2015. Valorisation de la biomasse lignocellulosique humide par la mise en place de procédés d'extraction et de séparation des polyphénols et des protéines : cas des tiges de colza. Thèse de doctorat en Génie des Procédés Industriels, UTC, Compiègne, France

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



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

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