

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.org

Production d'herbe et de feuilles d'arbres en fonction de la densité de plantation et de la gestion des houppiers

F.Liagre¹, A.Marin¹, D.Ori¹, C.Béral¹

L'impact des peuplements d'arbres sur une prairie répond à un double enjeu quant à la production fourragère : maintenir un rendement prairial le plus élevé possible, y compris en jouant sur la qualité, et un complément fourrager issu des feuilles d'arbres. La productivité globale va ainsi dépendre de la densité d'arbres et des interventions régulières sur les houppiers.

RESUME

Mettre en place des arbres en prairie induit généralement un effet de compétition sur la production d'herbe. Si cet effet n'est pas systématique car le microclimat généré peut aussi être positif sur la production, il est suffisamment connu pour freiner l'adoption de cette pratique auprès des éleveurs. Néanmoins, en intégrant la production fourragère aérienne des arbres, y compris avec la possibilité de produire du bois déchiqueté pour la litière, le bilan devient favorable. Tout le savoir-faire consistera alors à optimiser et rationaliser cette production fourragère aérienne, comme n'importe quel atelier fourrager de l'exploitation.

SUMMARY

Grass and tree leaf yields as a function of tree density and crown management.

In general, planting trees in grasslands leads to competition, which negatively affects grass yield. As a result, livestock farmers are hesitant to plant trees. It is less commonly known that such effects are not systematic; indeed, the creation of beneficial microclimates can positively influence grass yield. The advantages are even greater when there is production of tree forage and wood chips; the latter can be transformed into bedding. As with any source of forage used on farms, the key to success is optimising and effectively using tree forage.

Le projet PARASOL (2015-2018) avait pour objectif d'établir une première évaluation de l'impact de l'agroforesterie en prairie, dans différents contextes pédoclimatiques. Pour ce projet, nous avons étudié l'influence des arbres sur la production prairiale, le bien-être des animaux et la possibilité de diversifier l'offre alimentaire grâce au fourrage issu des feuilles d'arbres (Béral et al., 2018). Le projet ARBELE (2014-2018), mené en parallèle de PARASOL, a notamment permis d'étudier l'apport des branches broyées dans les litières des animaux, en remplacement partiel de la paille (Moreau, 2018).

Pour un agriculteur, il est nécessaire de traduire les résultats obtenus dans le cadre de ces deux projets par des décisions de gestion sur l'exploitation. Compte tenu de l'effet compétition progressif des arbres, mais également de la possibilité d'exploiter les arbres comme une ressource fourragère aérienne, l'éleveur est-il gagnant sur la recherche d'autonomie fourragère, d'économie de charges voire d'augmentation de la

production ? La réponse à ces questions est complexe car elle dépend également de la gestion des peuplements qui sera faite : densité plantée et nombre d'arbres éclaircies, intervention sur les houppiers. Dans le cadre de PARASOL, **nous avons réalisé des simulations pour éditer les chronologies de rendements sur un cycle complet des arbres et mieux comprendre l'impact de certaines décisions de gestion.** Ces simulations ont été obtenues par modélisation et réalisées à partir des données de terrain et retours d'enquêtes. Les seuls essais réalisés à ce jour concernent des systèmes forestiers éclaircis par bandes avec des techniques de semis herbacés sur les surfaces défrichés (Etienne & Hubert, 1987). Des travaux de relations arbres/herbe ont fait l'objet de simulation, notamment lors du projet européen ALWAYS, coordonné par Daniel Auclair de l'INRAE et ont fait l'objet de quelques publications (Bergez et al, 1999 ; Coppel & Etienne, 1992). Mais ces travaux portaient surtout sur des parcelles sylvopastorales en zone de parcours ou de boisements forestiers, avec encore peu de références sur des

AUTEURS

1 AGROOF SCOP, 19 rue du Luxembourg 30140 Anduze - liagrel@agroof.net

MOTS-CLES : bilan fourrager, agroforesterie, arbre, houppier

KEY-WORDS : forage estimate, agroforestry, tree, tree crowns

REFERENCES DE L'ARTICLE : Liagre F., Marin A., Ori D. & Béral C. (2020). « Production d'herbe et de feuilles d'arbres en fonction de la densité de plantation et de la gestion des houppiers ». *Fourrages* 242, 87-94

systèmes prairiaux agroforestiers en plantation de type intraparcellaire.

1. Matériels et méthodes

1.1. Sites d'expérimentation

Une des difficultés rencontrées dans le cadre des projets PARASOL ET ARBELE a été de bénéficier de parcelles expérimentales types, avec témoins forestiers et agricoles de référence. En effet, le réseau historique des parcelles expérimentales du réseau IRSTEA (mis en place à la fin des années 1980) ne comporte que très peu de sites avec des dispositifs permettant de comparer les performances du système agroforestier avec celles de témoins représentatifs, soit en prairie pure, soit en boisement pur. La seconde difficulté a été que l'ensemble des dispositifs avait été implanté sur des prairies permanentes, caractérisées par des différences importantes concernant les caractéristiques de sol et de topographie.

Nous nous sommes donc restreints à deux sites situés dans le Massif Central et appartenant à l'INRA de Theix, afin de capitaliser les références acquises :

- Parcelle de La Vigérale : 1 densité (100 frênes/ha) avec deux modalités de gestion des houppiers : frêne « haut jet » et frêne « têtard ».
- Parcelle de Lamartine : 2 densités d'arbre (60 et 150 arbres/ha) + un témoin prairie pure. A noter qu'à 150 arbres/ha adultes, nous sommes quasiment en situation forestière.

1.2. Dispositif retenu

Pour chaque parcelle, nous avons simulé la chronologie de rendement en se basant sur les résultats réels obtenus sur ces parcelles depuis la plantation jusqu'à la période du projet PARASOL (soit sur les 28 premières années), puis sur les résultats issus du modèle LER-SAFE pour la période suivante jusqu'à la coupe finale des arbres envisagée à 2040. Nous avons ainsi estimé l'évolution de la production herbacée sur un cycle de 50 ans (durée de vie moyenne d'un arbre agroforestier).

Concernant les densités, nous avons opté pour deux densités de plantation théoriques, 50 et 100 arbres/ha, avec respectivement deux modalités de gestion des houppiers (simple élagage pour former des arbres de haut jet et étêtage régulier des arbres en vue de créer des arbres têtards productifs). Le choix de 50 arbres a été motivé par le fait que de 2006 à 2010, la totalité des projets agroforestiers ont été plantés à cette densité pour des raisons réglementaires (éligibilité des projets pour moins de 50 arbres). Aujourd'hui encore, c'est un seuil fréquent pour les projets intraparcellaires, pour des questions d'optimisation de l'ensoleillement, notamment en grandes cultures. Une règle de décision courante propose un écartement entre les lignes

d'arbres égal à deux fois la hauteur des arbres adultes pour éviter une trop forte emprise de l'ombrage des arbres sur la culture (Dupraz, 2015).

1.3. Calcul de la production de feuilles

En parallèle de la production fourragère herbacée, dans le projet PARASOL, nous avons également estimé la production annuelle des feuilles d'arbres mobilisable pour l'alimentation des animaux. Nous nous sommes basés sur la production réelle mesurée par différentes équipes INRA (Theix, Montpellier et Toulouse ; voir article de Liagre, 2020 de ce numéro) ainsi que par Agroof sur différentes parcelles de frênes, comparée avec les quelques références issues de bibliographie. Une tendance générale de ces essais serait la productivité foliaire plus importante en agroforesterie. Nous avons pu également nous baser sur les références sylvicoles, notamment grâce au travail remarquable de l'Institut Fédéral de Suisse sur la production de 27 essences d'arbres forestiers (Forrester et al, 2017). Ces références nous ont ainsi aidé à calibrer nos estimations dans les calculs de chronologie de rendement feuilles des arbres sur cette même période de 50 ans.

1.4. Le modèle LER-SAFE

Ce modèle réalisé conjointement par l'INRA UMR SYSTEM et AGROOF lors du projet européen SAFE (2001-2005) permet de générer des chronologies de rendement de la culture intercalaire (ou prairie) en fonction du degré d'interaction entre l'arbre et la culture, représenté par le critère du Land Equivalent Ratio (LER) ou Coefficient de Rendement Equivalent (CRE) (Borrel et al., 2005).

Le CRE est utilisé pour comparer la performance de l'association à celle des mêmes espèces cultivées séparément, défini comme la surface relative nécessaire en cultures pures pour avoir la même production que l'association. Un CRE supérieur à 1 traduit une meilleure performance de l'association que de l'assolement de cultures pures. Le CRE correspond ainsi à la surface de cultures pures nécessaire pour obtenir le même rendement qu'en association (Willey, 1979). Ce Coefficient de Rendement Equivalent se définit comme la somme des Rendements Relatifs (**RR**) des cultures associées (Vandermeer, 1989). Le Rendement Relatif d'un compartiment du système (dans notre cas, les arbres ou les prairies) est calculé comme le ratio des rendements atteints en association et en culture pure, sur un pas de temps annuel puis sur la durée de l'association (50 ans dans notre étude) :

$$\text{CRE} = \text{RR Arbres} + \text{RR Prairie}$$

Soit :

$$\text{CRE} = \text{Rdt Prairie Associée} / \text{Rdt Prairie Pure} + \text{Rdt Arbre Agroforestier} / \text{Rdt Arbre boisement pur.}$$

Un CRE supérieur à 1 indique que l'association dans son ensemble est plus productive que la somme

des 2 cultures pures séparées. Par exemple, un CRE de 1,3 indique qu'il faudrait 1,3 ha d'assolement des 2 cultures pures (dont les proportions sont fixées par les RR) pour produire autant qu'1 ha de cultures associées. Autrement dit, 1 ha d'association de cultures produirait ici 30 % de biomasse en plus – herbe et arbre - qu'1 ha partagé en deux parties, d'une part la prairie pure et, d'autre part, le boisement pur.

Dans LER-SAFE, le calcul du CRE est établi sur l'ensemble de la rotation dont la durée est conditionnée par la date de l'exploitation des arbres. Le Rendement Relatif « Arbres » est fourni à dire d'experts complété avec des mesures sur le terrain. On en déduit alors le RR cultures pour correspondre à un CRE objectif donné par l'utilisateur. Le modèle génère ensuite l'ensemble des productions annuelles de la culture pour parvenir au RR voulu.

Pour le calcul du RR arbre, on considère qu'en dessous de 50 arbres/ha, on se trouve en situation de croissance peu compétitive pour les arbres. Dans ces conditions, la croissance de l'arbre « isolé » est plus importante (mieux enracinés, accès à une réserve hydrique plus importante, davantage de lumière) et produit 20 % de biomasse en plus que son homologue forestier. LERSAFE a été paramétré sur ces niveaux de densité avec les partenaires européens du projet SAFE (que ce soit pour le noyer, le merisier, le peuplier ou le frêne). Cette hypothèse forte est très prudente, sachant que dans la réalité, des arbres à faible densité peuvent produire 30 à 60 % de biomasse en plus, voire davantage (Dupraz *et al.*, 2005 ; Burgess *et al.*, 2018).

La décision importante pour LER-SAFE est donc de choisir un niveau de CRE raisonnable, quitte à le faire varier entre deux niveaux réalistes de production, avec une hypothèse **prudente**, caractérisée par une compétition forte entre l'arbre et la prairie, ou a contrario **plus optimiste**, où l'effet compétition est moindre et où on peut imaginer des effets de facilitation entre les deux productions (comme par exemple avec un effet favorable du microclimat agroforestier sur le long terme). Dans la littérature, il est très rare d'avoir des niveaux de CRE inférieurs à 1 en agroforesterie, ce qui représenterait un effet dépréciatif fort de l'une des deux cultures, voire des deux entre elles.

Quel CRE peut-on espérer pour une prairie agroforestière ?

Sur une étude bibliographique récente, le niveau moyen de CRE était de 1,36 (avec une forte variabilité) à partir de 277 publications étudiées, (Paut & *al.*, 2019). Dans PARASOL, nous avons repris les données de terrain mesurées à mi-parcours (arbres de 25 ans environ pour une coupe finale prévue à 50 ans). Nous avons pu contraindre ainsi le niveau de CRE pour arriver à représenter le plus fidèlement la situation des parcelles étudiées. Sur les sites existants, compte tenu de la production de la prairie en agroforesterie et de la croissance des arbres, le CRE attendu varierait entre 1.3

et 1.35, ce qui est assez courant dans ce type d'aménagement. Avec des arbres de 25 ans, qui ont fait l'objet de mesures dendrométriques fréquentes, nous pouvons prédire des courbes fiables sur la croissance et le volume unitaire par arbre (Picard *et al.*, 2012). Pour la partie prairie, si l'on considère que les peuplements d'arbres sont avancés en âge et donc en développement, la dynamique des rendements peut s'estimer sur une base prudente de production (tableau 1). Dans les calculs, on fait ainsi l'hypothèse d'un rendement minimal pour éviter toute mauvaise surprise pour l'éleveur.

Modalité	50 Frênes	100 Frênes	50 Frênes têtards	100 Frênes têtards
Densité initiale par hectare	70	120	70	120
Densité finale par hectare	50	100	50	100
Distance entre les lignes (en m)	12	12	12	12
Distance théorique entre les arbres sur la ligne (en m)	11.86	6.92	11.86	6.92
Coefficient de dominance des arbres en AF	1,25	1,25	0,6	0,6
Hauteur finale de l'arbre (en m)	20	20	5	5
Hauteur de bille maximale (en m)	20	20	2	2
RR prairie	0.84	0.48	0.94	0.71
RR Arbres	0.51	0.82	0.26	0.49
CRE final	1.35	1.30	1.20	1.20

TABLEAU 1 : Liste des valeurs principales retenues pour le paramétrage des simulations dans LER-SAFE.

Table 1: *Main parameter values used in the LER-SAFE simulations*

Des itinéraires techniques adaptés

Pour chacun des 4 aménagements avec frênes purs simulés, on caractérise les objectifs et les interventions :

- **Un aménagement à 100 tiges / ha (scénario « 100 frênes »)**: situation où on privilégie l'arbre. Nous sommes en densité finale quasi-forestière. Il est possible d'avoir une prairie mais qui va rapidement être impactée par le développement des arbres. Cependant, on a un décalage phénologique qui peut être intéressant et qui pourrait être davantage valorisé en été. Dans ce scénario, pour des raisons de modélisation, nous n'avons retenu que la production globale annuelle, sans retenir cet aspect de valorisation intra-annuelle. LER-SAFE fonctionne à un pas de temps annuel et ne prend pas en compte des variations liées aux saisons.

- **Un aménagement à 50 tiges / ha (scénario « 50 frênes »).** Nous sommes en densité agroforestière, où le potentiel-prairie s'exprime davantage. On produit globalement moins de biomasse arbre (bois et feuille), mais on a une productivité individuelle par arbre plus intéressante (arbre plus ensoleillé, avec peu de compétition intraspécifique). L'inconvénient de plantation à faible densité est la quasi-impossibilité de pratiquer une éclaircie sélective. Il est vraisemblable que la qualité en bois d'œuvre sera de moins bonne qualité dans ce scénario.
- **Un aménagement à 100 arbres têtards (scénario « 100 frênes têtards »).** On intervient tous les 2 ans sur les houppiers des arbres pour produire du fourrage et du bois déchiqueté. La production intervient surtout quand les arbres deviennent matures soit à partir de la quinzième année. A chaque coupe, on améliore les apports de lumière les années suivantes pour la prairie ce qui relance sa productivité. Les interventions peuvent s'échelonner sur deux ans : on étête 50% des arbres la première année et 50 % la seconde.
- **Un aménagement à 50 arbres têtards (scénario « 50 frênes têtards ») :** Le scénario de gestion est le même que le précédent, mais en raison d'une densité plus faible, l'apport de lumière est plus conséquent. Les niveaux de rendement prairie sont donc supposés plus importants dans ce scénario.

2. Résultats

2.1. Impact du mode de plantation et de sa gestion sur la productivité globale

Dans la lignée des résultats mesurés sur les sites de PARASOL, on observe un effet dépressif fort des arbres sur la prairie pour une densité de 100 arbres/ha.

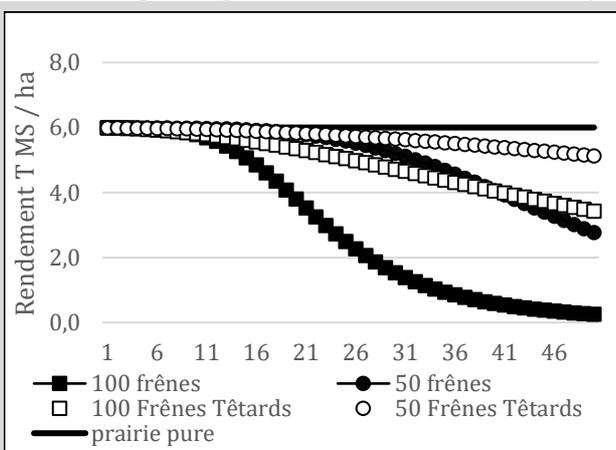


FIGURE 1 : Evolution des rendements prairie en T de MS/ha des 4 modalités de gestion des arbres sur 50 ans.

Figure 1: *Change over 50 years in grassland yield (in tonnes of DM/ha) as a function of the 4 tree management protocols*

L'impact du peuplement à cette densité est très important après un premier tiers de la rotation « arbres », soit juste après la croissance en hauteur des arbres vers 15 - 20 ans (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cette situation est courante en agroforesterie. Tant que les arbres sont en croissance en hauteur, l'impact sur le rendement reste limité. Les houppiers des arbres ne sont pas encore très larges, et arbres et cultures cohabitent assez facilement.

Sans intervention technique ou sélection variétale spécifique, une prairie à faible densité à 50 arbres/ha est préférable pour maintenir une productivité jusqu'à la coupe des arbres. Néanmoins, dans le dernier tiers de la vie de l'arbre, l'impact sur le rendement se fait également sentir, jusqu'à représenter une baisse de 30 à 50% les 10 dernières années.

N'étant pas pris en compte dans LER-SAFE, l'effet microclimatique ne compense pas ici l'effet dépressif des arbres à forte densité. Ce résultat lié à la parcelle est donc à relativiser :

- La différence phénologique de la prairie (stade plus tardif, dessèchement décalé dans l'été) peut inciter à maintenir des parcelles à fortes densités d'arbres sur l'exploitation. Ceci pour prévenir des accidents climatiques ou gérer au mieux l'alimentation estivale (au détriment de la production) ; notamment dans les régions soumises à plus fort aléas climatiques (Méditerranée par exemple).
- En cas d'événement climatique exceptionnel, une prairie à forte densité d'arbres peut s'avérer utile pour gérer le bien-être des animaux.
- Enfin, une parcelle à forte densité d'arbres peut se gérer. A partir d'un certain stade, on peut décider d'intervenir sur les arbres pour réduire la densité. Avec une production de biomasse bois qui peut être ponctuellement intéressante, tout comme le fourrage qui sera récolté à cette occasion. Un système à forte densité d'arbres a un rôle d'«assurance». Ces interventions pourraient se faire par éclaircie classique (un ou deux prélèvements d'arbres pour optimiser la coupe) ou progressivement (quelques individus par année à partir des premiers signes de compétition importante).

2.2 Intervenir sur les houppiers pour relancer la production

Plutôt que d'intervenir sur le nombre d'arbres à prélever, une autre solution consiste à intervenir directement sur les houppiers, en étêtant par exemple les charpentières tous les 2 ans comme simulé dans les modalités Têtards de la figure 1. Cette intervention permet de produire une ressource fourragère (feuilles et fins rameaux) mais aussi de réduire la compétition arbres/prairie. A 100 tiges/ha, on maintient un bon niveau de production d'herbe sur les deux tiers de la vie des arbres (30 ans environ) et on limite l'impact les

années suivantes : la baisse de rendement est plus douce. Néanmoins, dans la deuxième partie de la vie des arbres, on diminue de 25 % la production prairie contre seulement 6 % avec 50 arbres têtards/ha (en comparaison avec le témoin prairie sans arbre). A 50 tiges/ha, l'exploitation en « têtard » permet de maintenir un rendement prairie très élevé jusqu'à la coupe des arbres.

2.3. Produire une ressource fourragère aérienne

Nous avons simulé la production de feuilles (MS/ha/an) en complément à la production herbacée. L'objectif était de voir dans quelle mesure l'effet dépressif des arbres pouvait être compensé par la productivité de feuille, sans tenir compte ici de la valeur fourragère réelle et de la qualité du fourrage (Emile et al., 2017). En effet, les résultats d'analyses réalisées par l'équipe de l'INRA de Lusignan montrent des résultats remarquables pour certaines essences tels que le frêne ou le mûrier blanc, avec des teneurs en Matières Azotées Totales (MAT) et en Taux de Digestibles (TD) plus élevés que pour des prairies permanentes. Cette différence est plus marquée en été où les arbres conservent un stock de feuilles vertes de qualité sur les branches, alors que les prairies sont souvent sèches. Mais si l'utilisation des feuilles est alors recherchée en été et en automne, périodes clés de faible productivité des prairies, on peut également imaginer des premiers prélèvements dès le printemps, à condition d'éviter des coupes foliaires trop importantes (voir articles de F. Liagre sur les aménagements ligneux en agroforesterie). Dans ces systèmes intensifs, on peut imaginer entre 4 et 5 prélèvements par an.

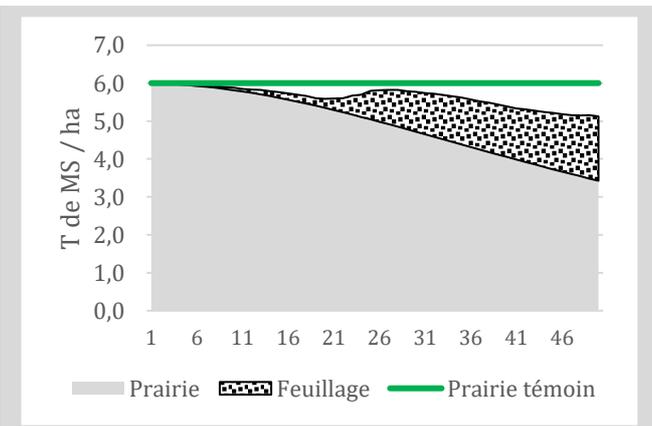


FIGURE 2 : Comparaison de la production fourragère annuelle d'une prairie avec 100 arbres par ha (T de MS / ha cumulé feuilles + prairie) et d'une prairie sans arbre.

Figure 2: Annual forage yield (in tonnes of DM/ha [leaves and grass combined]) for a grassland with 100 trees per ha versus a grassland without trees

Avec un aménagement de 100 arbres têtards par ha, la production de fourrage feuille commence à devenir conséquente à partir de 20 ans. On débute la formation des têtards dès la cinquième année et les arbres vont être formés pendant une dizaine d'années avant d'initier

un cycle de production intéressant pour l'éleveur (figure 2). En système traditionnel, la fréquence d'intervention sur les arbres peut atteindre dix à quinze ans pour des arbres à croissance moyenne comme les chênes (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), mais il est fréquent de voir des systèmes à base de frênes, de saules ou de peupliers avec des interventions beaucoup plus fréquentes, entre deux et quatre ans (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

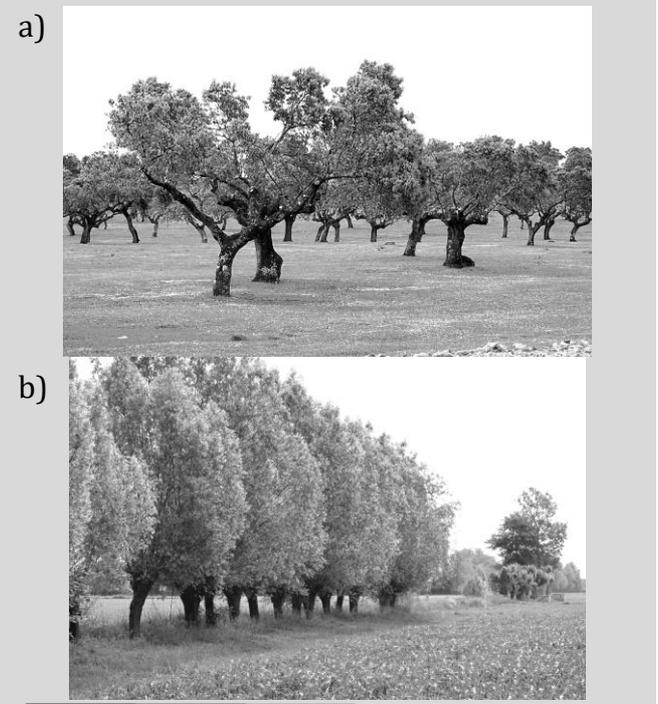


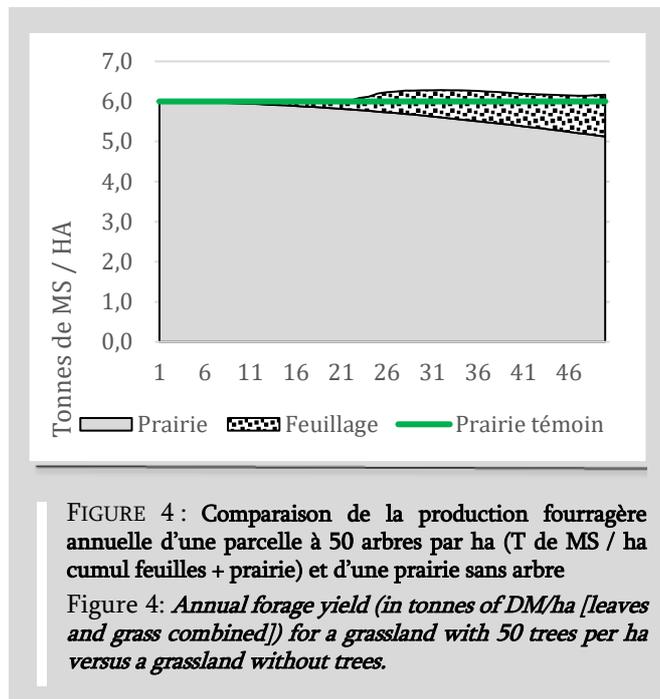
FIGURE 3 : A) Exploitation de chênes fourragers têtards en intraparcélaires dans la Dehesa espagnole. b) Alignement de bordure de saules fourragers

Figure 3: a) Pollarded forage oaks within a plot in a Spanish dehesa landscape. b) Line of forage willows being used as a border

Mais à 100 arbres/ha, les arbres se font également concurrence entre eux pour leur nutrition et la lumière. Il n'existe que très peu de données sur ces interactions intraspécifiques et les conséquences sur la production de feuilles. On considère donc que la production de feuilles est moindre à l'échelle de l'individu pour de fortes densités, mais reste intéressante à l'échelle de la parcelle compte tenu du nombre important d'arbres. Dans le dernier tiers de la rotation, en reprenant les chiffres moyens obtenus dans le suivi des parcelles de références du projet PARASOL (Béral et al, 2018), cette production représente entre 1 et 2 T de MS/ha. En volume, si l'on prend l'hypothèse basse de 1 tonne de MS/ha, cette production ne suffit pas à compenser la perte de rendement prairie mais reste intéressante d'un point de vue qualitatif et pour la gestion de l'alimentation estivale des animaux. Dans la réalité, comme nous l'avons évoqué précédemment, l'éleveur pourrait réduire la densité des arbres, par une éclaircie judicieuse, pour relancer la production à mi-rotation.

Mais avec une production de 2 T de MS/ha, alors la situation devient supérieure à la production d'une prairie en terme de bilan cumulé herbe + feuilles.

Avec 50 arbres/ha, la productivité foliaire par arbre est plus importante (figure 4). Dans notre scénario, nous avons considéré qu'un arbre dans ces conditions peut produire environ 20 % de plus qu'à 100 arbres/ha. Cette hypothèse est prudente sachant que dans la réalité, certaines parcelles expérimentales ont montré des résultats jusqu'à 3 fois plus importants en agroforesterie qu'en boisement forestier (Gavaland & Brunel, 2005). Compte tenu du fait que l'impact sur la production prairie est assez faible, cette production supplémentaire permet à l'aménagement agroforestier de produire davantage de MS à partir du milieu de la rotation.



2.4. Production de plaquettes pour substitution partielle de la paille

Dans un système agroforestier, notamment à base d'arbres têtards, la production de plaquettes est un élément à prendre en compte. Sur le terrain, les agriculteurs étant les frênes valorisent souvent les refus (branches de trop gros diamètre) en bois déchiqueté, soit pour leurs besoins énergétiques, soit pour couvrir une partie de leurs besoins de litière. Cette production est donc couplée avec la production de fourrage et doit être considérée.

Lorsqu'on cherche à remplacer la paille par des copeaux de bois, le seuil de rentabilité tourne autour de 90 € la tonne de paille. A partir de ce prix, la production locale de plaquettes est intéressante pour l'agriculteur. En effet, le coût de production de la plaquette, intégrant les chantiers de récolte, de stockage et de séchage des plaquettes, représente environ 80 € la tonne (Liagre,

2018). Ce qui correspond souvent au prix de la paille en été, en zone de montagne ou en Méditerranée.

Pour rappel :

- 1 m³ de bois déchiqueté = 250 kg de paille.
- Consommation : 10 à 12 tonnes de paille céréales pour 100 brebis, uniquement pour la litière.

Pour un troupeau de 400 brebis, si l'on souhaite remplacer un tiers de la paille par des copeaux, cela demande de fournir au minimum 40 T de copeaux. En ciblant une autoconsommation de 30% de ces besoins, les parcelles agroforestières doivent fournir environ 14 T de copeaux soit 48 m³/ an (96m³ pour 60% des besoins).

Dans nos scénarios, nous avons calculé la production de copeaux à partir des résultats obtenus sur le terrain dans le projet PARASOL.

Nous avons calculé la quantité produite par 15 ha d'agroforesterie, dans 3 situations : 15 ha à 50 arbres/ha, 15ha à 100 arbres/ha et une situation mixte où on panache les deux systèmes en donnant la priorité aux faibles densités (10 ha à 50 arbres/ha et 5 ha à 100 arbres/ha) (figure 5).

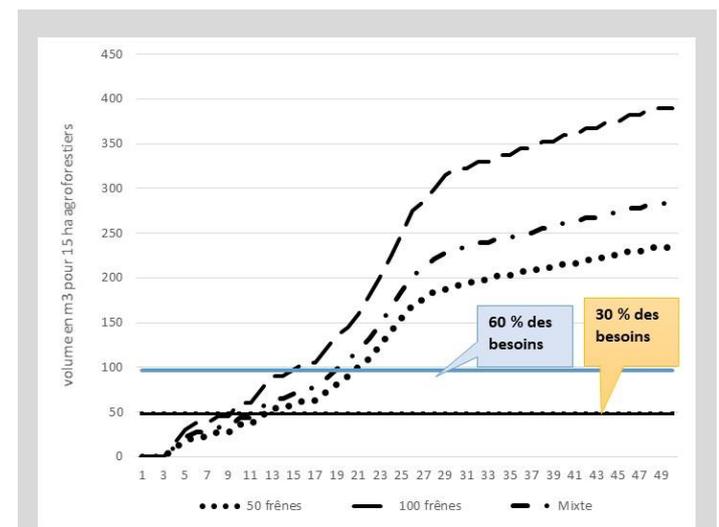


FIGURE 5 : Production de plaquettes issues du broyage des refus dans 3 scénarios de densités en fonction du nombre d'années après plantation.

Figure 5: Wood chip yield from shredded woody waste for three tree density levels as a function of time since tree planting

En plantant les 15 hectares la même année, on arrive à subvenir à 30 % des besoins entre l'année 9 (densité 100) et 13 (densité 50). La différence entre les deux scénarios est donc faible. Pour parvenir à 60 % des besoins, il faut attendre 20 ans à faible densité contre 15 ans à plus forte densité.

Dans ces calculs purement théoriques, on ne tient pas compte de la réalité des exploitations d'élevage qui ont souvent des haies adultes à exploiter, le temps d'arriver à une production satisfaisante dans les nouvelles plantations. Ainsi, un linéaire de 1,5 km

pourrait suffire pour subvenir aux besoins le temps que les plantations intraparcellaires prennent le relais.

Ce qui est notable dans chacun des scénarios, c'est l'augmentation rapide de la productivité des arbres à partir de la deuxième moitié de la rotation, habituelle pour les systèmes traditionnels d'arbres têtards. Cela correspond à la prise de volume des houppiers, induisant du même coup un début de compétition pour l'ensoleillement décrit précédemment.

Selon le schéma de plantation, une quinzaine d'hectares permet ainsi une production de 200 à 400 m³ par an. Si l'on soustrait 100 m³ pour la litière, l'excédent est donc de 100 à 300 m³. A terme, les 15 ha permettent donc de subvenir à la totalité des besoins et la vente du surplus engendre un produit économique intéressant. Plusieurs scénarios sont alors possibles : subvenir aux besoins énergétiques des bâtiments, ou revendre le surplus à l'extérieur. Généralement les exploitations d'élevage ont des besoins énergétiques entre 75 et 125 m³ selon leur position géographique et le dimensionnement des installations (laiterie, fromagerie, bergerie, maison). Le scénario mixte permet donc une autonomie en termes de paillage litière et de besoins énergétiques. Le scénario à forte densité permet une revente à l'extérieur de près de 200 m³, soit une recette entre 3 000 et 4 000 € par an. Cette vente permet l'achat du fourrage déficitaire de ce scénario (estimée à 5 T de foin/an dans la deuxième partie de la rotation ; soit une économie réalisée de 500 à 1000€/an selon la date d'achat et le contexte climatique) et diminue le coût de production des plaquettes de 5 à 10€/T (projet ARBELE).

Dans tous les cas, la valorisation de la biomasse en plaquettes pourrait compenser le temps passé à l'exploitation des houppiers. C'est une économie intéressante dans le calcul éventuel de la marge brute liée à l'exploitation des branches pour l'alimentation, car le coût de récolte est ainsi couvert en large partie par la revente des surplus à l'extérieur. Le coût de l'alimentation feuilles devient alors compétitif par rapport à celui d'un foin conventionnel (dont le coût de production varie de 300 à 400 €/ha).

3. Discussion

La principale limite de ce travail exploratoire réside dans le manque de données de terrain et de répétitions de sites de mesures, en situations pédoclimatiques variables. Il serait intéressant de poursuivre ce travail dans différents contextes de profondeur de sol, d'exposition et d'orientation des aménagements, de potentiel hydrique... De même, le choix des essences joue un rôle majeur. Cette étude s'est concentrée sur une essence fourragère emblématique - le frêne - à haute valeur fourragère et qui présente une physiologie intéressante car faiblement compétitrice pour la lumière. Avec des espèces plus compétitives, à fort ombrage comme le noyer, l'impact sur la production

d'herbe serait plus marqué et se poserait la nécessaire articulation entre deux ateliers de production : gestion du pâturage et récolte des noix. A contrario, avec des espèces fixatrices d'azote, comme le robinier, et à faible impact ombrager, on pourrait s'attendre à des phénomènes de facilitation intéressants entre l'arbre et la prairie (bilan azote positif, microclimat favorable à la pousse de l'herbe, production de piquets, ...). A contrario, ce type d'essence présente souvent une fragilité des branches dont la chute lors des coups de vent pourrait constituer une gêne pour la mécanisation.

Les résultats de ce travail indiquent que la décision de l'éleveur à l'échelle de l'exploitation ne doit pas se faire sur un choix unique d'aménagement mais plutôt sur une mosaïque d'aménagements. En dehors des paramètres cités précédemment, les proportions en surface de chaque modalité, y compris pour une modalité sans arbre, doit se raisonner selon les besoins fourragers du troupeau (chargement mensuel, période physiologique des animaux...) et la gestion du mode de pâturage. Une majorité de parcelles à faible densité sera favorisée pour maintenir une ressource pâturée au moins équivalente à la situation d'origine. Des parcelles de petite surface à forte densité conviendraient bien à des pâturages d'été. Des parcelles à très forte densité pourraient convenir à des animaux en phase de tarissement ou d'aire de replis en cas de fortes chaleurs.

Enfin, des prairies pures doivent être conservées pour les fauches, les pâturages de printemps, ou selon la gestion liée au climat de l'année. Mais il n'existe pas d'aménagement type à l'échelle de l'exploitation : il s'agit pour l'éleveur de faire un choix prudent, dans un contexte de probabilité climatique incertain, mais qui lui permettrait une certaine résilience dans l'adaptation de son système, face aux effets du changement climatique, sans le pénaliser lors des années climatiques « normales ».

Nous n'avons pas abordé ici le potentiel d'amélioration du rendement fourragère par la génétique végétale. Toute l'étude a été réalisée en situation de prairie permanente sans recherche sur les variétés herbacées qui pourraient être davantage adaptées au microclimat arboré. De même, il existe un potentiel sans doute encore plus important sur la sélection de provenances pour des espèces d'arbres fourragers identifiés afin d'en améliorer leur capacité de production (arbres avec une production foliaire plus importante, aptitude au recépage et à la repousse annuelle, valeur nutritive des feuilles et leur évolution dans l'année, etc.).

4. Conclusion

L'idée de rationaliser une production fourragère aérienne grâce à un dispositif intraparcellaire est une option aujourd'hui à considérer notamment dans le cadre du changement climatique. Dans le projet PARASOL, avec des hypothèses de production en agroforesterie prudentes, basées à la fois sur des

mesures de terrain et de modélisation, on montre qu'une parcelle agroforestière peut être plus productive qu'une prairie sans arbre lorsqu'on intègre le fourrage feuille.

On montre notamment que le choix de la densité influera progressivement sur l'évolution du rendement prairie mais aussi sur la production foliaire, qui peut représenter un tiers de la production globale (voire davantage si les peuplements sont gérés de manière intensive en termes de prélèvement). Cette production peut être prélevée régulièrement ou à des périodes clés liées au manque de ressources herbacées. Mais pour l'éleveur, la solution idéale résulte dans une combinaison d'aménagements avec des densités différentes, afin de faire face aux différentes situations de la vie d'un élevage, notamment en lien avec les aléas climatiques.

En intervenant sur les houppiers, on peut imaginer des systèmes plus denses car à chaque intervention, le rendement prairie sera relancé grâce à l'ouverture de la canopée induite.

Pour l'éleveur, il faudra néanmoins tester différents gradients de densité pour tenter de trouver un optimum en termes de nombre d'arbres par hectare, conditions pédoclimatiques et objectifs fourragers.

Article accepté pour publication le 24 juin 2020

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Béral C., Andueza D., Ginane C., Bernard M., Liagre F., Girardin N., Emile J.-C., Novak S., Grandgirard D., Deiss V., Bizeray D., Moreau J.-C., Pottier E., Thiery M., Rocher A., (2018). « Agroforesterie en système d'élevage ovin : étude de son potentiel dans le cadre de l'adaptation au changement climatique ». Rapport final du projet de recherche PARASOL dans le cadre de l'AAP REACTIF ADEME, 158p.
- Bergez J.E., Etienne M., Balandier P. (1999). Always: a plot-based biophysical silvopastoral system model. *Ecological Modelling* 115 : 1-17.
- Burgess P.J., den Herder M., Dupraz C., Garnett K., Giannitsopoulos M., Graves A.R., Hermansen J.E., Kanzler M., Liagre F., Mirck J., Moreno G., Mosquera-Losada M.R., Palma J.H.N., Pantera A., Plieninger T., (2018). AGFORWARD PROJECT Final Report. Cranfield University: AGFORWARD. 117 p.
- Coppel B. & Etienne M. (1992). « Modélisation de la production fourragère dans une vallée des Préalpes : application à la mise à l'herbe en exploitation ». *Fourrages*, 132, 365-380.
- Dupraz C., Burgess P., Gavaland A., Graves A., Herzog F., Incoll L., Jackson N., Keesman K., Lawson G., Lecomte I., Liagre F., Mantzanas K., Mayus M., Moreno G., Palma J., Papanastasis V., Paris P., Pilbeam D., Reisner Y., Werf Van der W., (2005). Synthesis of the Silvoarable Agroforestry For Europe project. INRA-UMR System Editions, Montpellier, 254 p.
- Emile, J.C., Barre, P., Delagarde, R., Niderkorn, V., Novak, S., (2017). « Les arbres, une ressource fourragère au pâturage pour des bovins laitiers ? » *Fourrages* 230, 155-160.
- Etienne M., Hubert D., 1987. « Relations herbe-arbre: état des connaissances ». *Fourrages hors-série. La forêt et l'élevage en région méditerranéenne française* : 151-166
- Forrester D., Tachauer I.H.H., Annighoefer P., Barbeito I., Ruiz-Peinado R., Stark H., Vacchiano G., Zlatanov T., Pretzsch H., Chakraborty T., Saha S., Sileshi G., (2017). Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management* 396 (2017) 160-175.
- Gavaland A., Brunel L., 2005. Croissance et biomasse aérienne de noyers noirs en parcelle agroforestière ; Rapport du WP3 + annexes, Projet européen SAFE, 5 p.
- Liagre F. (2018). Les haies rurales - Rôles, création, entretien, bois énergie. Editions France Agricoles, seconde édition. 294 p.
- Moreau J.C., (2018). L'ARBRE dans les exploitations d'ÉLEVAGE herbivore : des fonctions et usages multiples. Rapport final du projet ARBELE dans le cadre de l'AAP DAR du Ministère de l'Agriculture. 98p.
- Paut R., Sabatier R., Tchamitchian M. (2019). «Modelling crop diversification and association effects in agricultural systems». November 2019, *Agriculture Ecosystems & Environment* 288.
- 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, 220 p.
- Borrel T., Dupraz C., and Liagre F. (2005) Economics of silvoarable systems using LER approach, Deliverable of the European Research contract QLK5-CT-2001-00560, Silvoarable Agroforestry For Europe (SAFE), 37 p.
- Vandermeer J.H., 1989. *The Ecology of Intercropping*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Willey, R. W. (1979). *Field Crop Abst.* 32(1):Pt 1, pp. 1-10.