



# L'ARBRE A LA FERME

## LES OUTILS ET METHODES D'EVALUATION DES IMPACTS DE L'ARBRE

« Cela fait plus de dix ans que je plante des arbres en bordure et au sein de mes parcelles agricoles. A ce jour, je n'ai pas d'outils et méthodes me permettant d'évaluer l'impact de mes arbres sur ma ferme. Ont-ils un impact sur mes animaux, sur mes sols, sur mon environnement global ? Comment le quantifier ? Pourtant, cette compréhension est nécessaire pour moi, car cela peut m'éclairer sur cette question que je me pose : ai-je fait les bons choix ? Y en avait-il d'autres ? »

Nicolas, éleveur dans le Gers



<b>Introduction</b>	3
<b>Outils et méthodes d'évaluation de l'impact de l'arbre sur l'environnement</b>	5
L'arbre en tant que modificateur de la qualité des sols	7
<i>Outils d'évaluation globale des sols</i>	7
L'arbre, vecteur de biodiversité	7
<i>Arbre et vie biologique des sols</i>	7
<i>Arbres et arthropodes volants</i>	9
<i>Arbres, avifaune et chiroptères</i>	9
<i>Arbres et couverts végétaux</i>	10
<i>Résumé des outils pour le suivi de la biodiversité en contexte agricole</i>	10
<i>Macro-indicateurs de la place de la haie dans la ferme</i>	11
<b>Outils et méthodes d'évaluation de l'impact de l'arbre sur le climat et le micro-climat</b>	12
Impact de l'arbre sur le bilan carbone	12



<i>Le cycle du carbone dans le sol : calcul du bilan humique du sol</i>	13
<i>Le cycle du carbone à l'échelle de l'arbre</i>	17
<i>Stockage de carbone dans la biomasse ligneuse</i>	17
<i>Le cycle des GES à l'échelle d'une exploitation agroforestière</i>	18
Impact de l'arbre sur le micro-climat	20
<b>Outils et méthodes d'évaluation de l'impact de l'arbre sur le bien-être animal</b>	21
<b>Outils et méthodes d'évaluation de l'impact de l'arbre sur l'économie de la ferme</b>	21
Impact économique de l'arbre à l'échelle de la parcelle	21
Impact économique de l'arbre à l'échelle de la ferme	22
<b>Tableau récapitulatif des outils et de leurs utilités</b>	24
<b>Remerciements</b>	26
<b>ANNEXE 1 : fiche d'observation des vers de terre au champ</b>	28
<b>ANNEXE 2 : fiche d'observation des arthropodes volants</b>	29
<b>ANNEXE 3 : Présentation de l'indice de biodiversité potentielle</b>	30

## INTRODUCTION

L'agroforesterie est un mode d'utilisation des terres associant des arbres et des cultures et/ou de l'élevage sur une même parcelle. Il existe une grande diversité de systèmes agroforestiers résultant de différentes variables : contexte pédoclimatique, objectifs de l'agriculteur, moyens pouvant être engagés, etc. Le système agroforestier mis en place va générer des services écosystémiques. Cette dernière composante est l'argument clé légitimant la place de l'arbre au sein des parcelles agricoles.

La science a confirmé le rôle joué par la strate arborée dans le fonctionnement des écosystèmes : création d'habitats pour les auxiliaires de culture régulant les ravageurs, support de la biodiversité, réduction de l'érosion des sols et amélioration des qualités du sol par l'augmentation des taux de matières organiques, stockage d'éléments nutritifs, régulation climatique, et tant d'autres (figure 1).

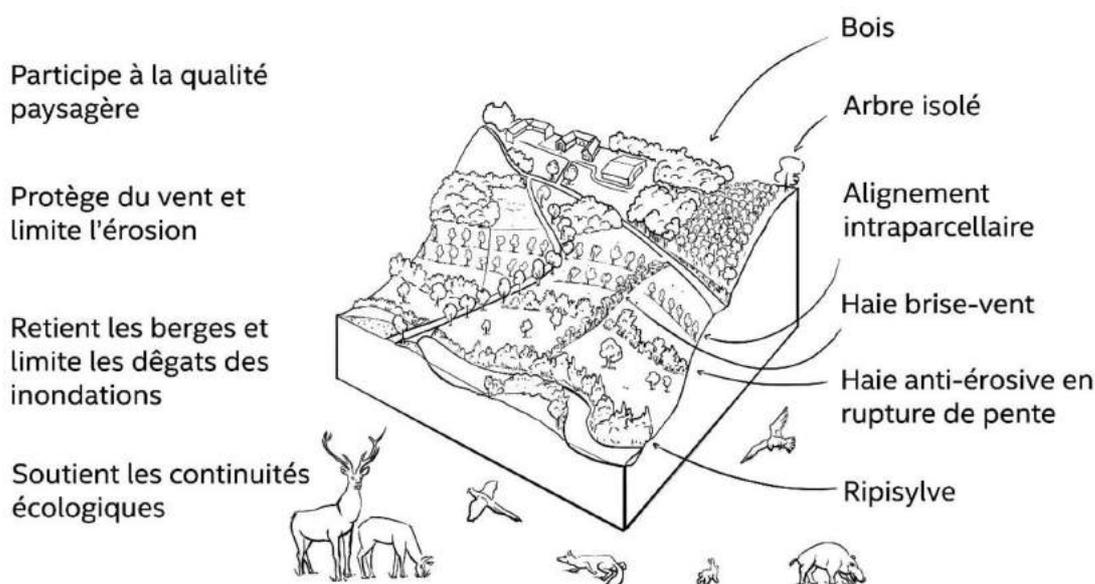


Figure 1 : impacts de l'arbre au niveau d'un bassin versant : focus sur les services environnementaux © Association Française d'Agroforesterie

Comprendre et évaluer ces bénéfices agronomique, économique et écologique, autant à l'échelle des parcelles que des exploitations, peut aider les agriculteurs dans leur stratégie d'intégration de l'arbre à la ferme. Il est à noter que les services de l'arbre résultent de sa structure et de son emprise autant au niveau du sol qu'en aérien (figure 2).

Chaque segment de l'arbre va jouer un rôle au niveau micro et macro du sol, à l'interface sol-air, mais également au niveau du micro-macro climat.

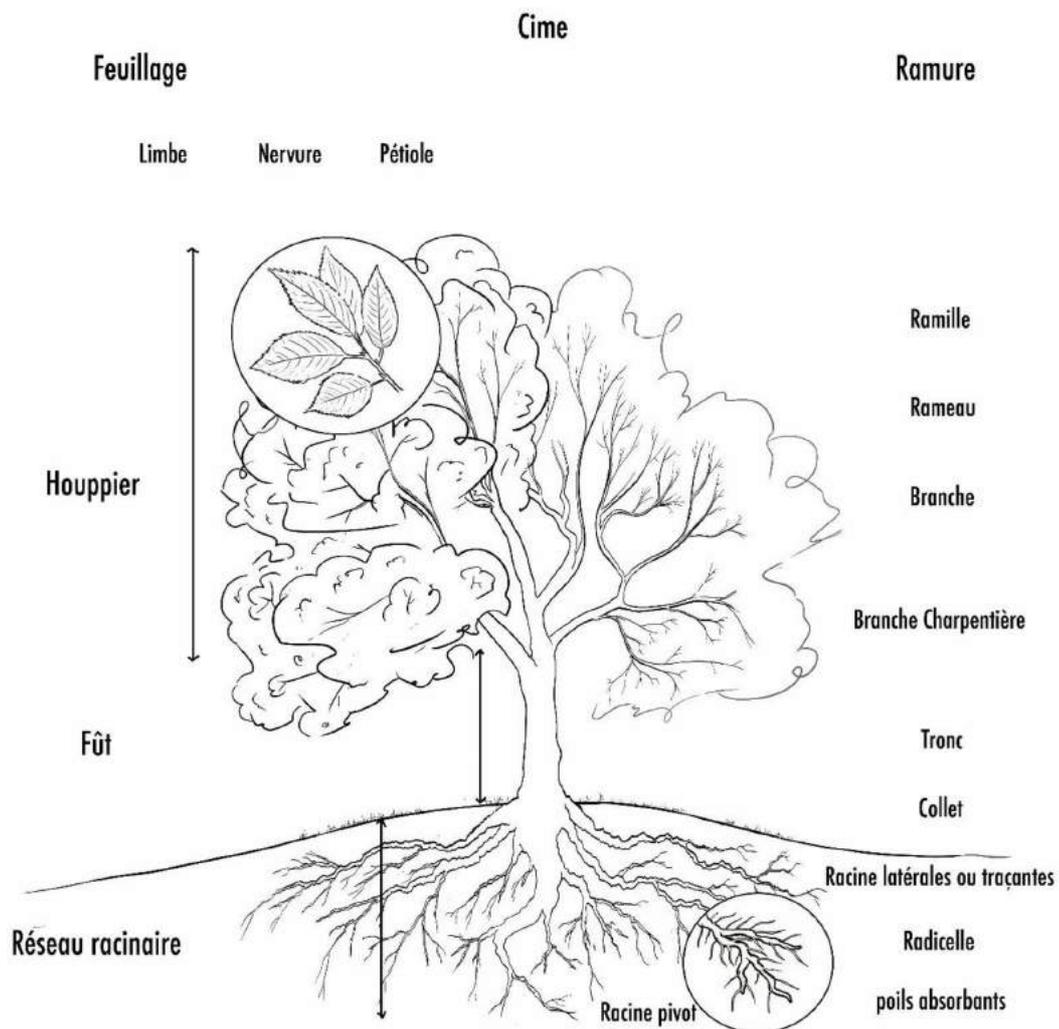


Figure 2 : représentation détaillée de la structure d'un arbre en milieu agricole © Association Française d'Agroforesterie

Le document présente des protocoles de mesure de données et des outils de calculs pour quantifier ces services écosystémiques. La pertinence des outils, leur facilité d'appropriation et de mise en œuvre par l'agriculteur ont été évaluées. Enfin, des applications concrètes à la ferme sont présentées pour illustrer les résultats obtenus par ces outils et méthodes. Les sections sont divisées selon les principaux services écosystémiques habituellement utilisées : environnement, climat, biodiversité, produits bois.

# OUTILS ET METHODES D'ÉVALUATION DE L'IMPACT DE L'ARBRE SUR L'ENVIRONNEMENT

## L'ARBRE EN TANT QUE MODIFICATEUR DE LA QUALITE DES SOLS

L'arbre va modifier le sol en développant son système racinaire au sein des différents horizons, en y injectant du carbone. En se liant à des populations microbiennes et des champignons qui vont sécréter des glycoprotéines structurantes du sol comme la glomaline [1], l'arbre va jouer un rôle dans la stabilisation des agrégats du sol [2].

Les **analyses de sol** faites **en laboratoire** sont centrales car elles permettent d'évaluer l'état du sol et d'étudier dans le temps les effets de l'arbre au fur et à mesure de son développement. Les analyses vont habituellement donner comme résultat : les taux de matières organiques du sol, la capacité d'échange cationique, le rapport carbone sur azote, la texture du sol.



Photo 1 : système agroforestier intra-parcellaire grandes cultures (Ardennes) © Association Française d'Agroforesterie

Des méthodes ou outils plus simples peuvent être utilisés directement au champ sans passer par un laboratoire afin de visualiser le comportement physico-chimique et biologique du sol. Ces **outils pédagogiques** permettent d'obtenir des résultats moins précis mais ont le mérite de dégager des tendances (haussières, baissières ou stables). Il s'agit 1) des outils d'évaluation du sol du département de l'agriculture des Etats-Unis regroupés au sein de la **malette USDA** [3] dont le **slake test** : un test de sédimentation qui permet d'observer la cohésion structurale des agrégats, le **test de densité apparente** qui évalue le tassement du sol et la capacité de développement racinaire et le **test d'infiltration de l'eau** qui évalue le ruissellement (photo 2), l'érosion et les pollutions des eaux de

surface par la simulation de pluies sur site ; 2) du **test bêche**, un prélèvement évaluant l'horizon superficiel de sol dont l'interprétation peut se faire directement sur smartphone grâce à l'**application VESS**.



Photo 2 : utilisation au champ de deux méthodes de la maquette USDA : le test de densité apparente (en haut) et le test d'infiltration du sol (en bas) © Association Française d'Agroforesterie

Dans le cadre de l'évaluation sur l'infiltration du sol par les arbres, des relevés peuvent être réalisés à proximité d'arbres à différents âges. C'est ce travail qui a été réalisé sur une parcelle en agroforesterie intra-parcellaire dans les Ardennes pour déterminer l'impact des bandes enherbées arborées sur le cycle de l'eau (figure 3).

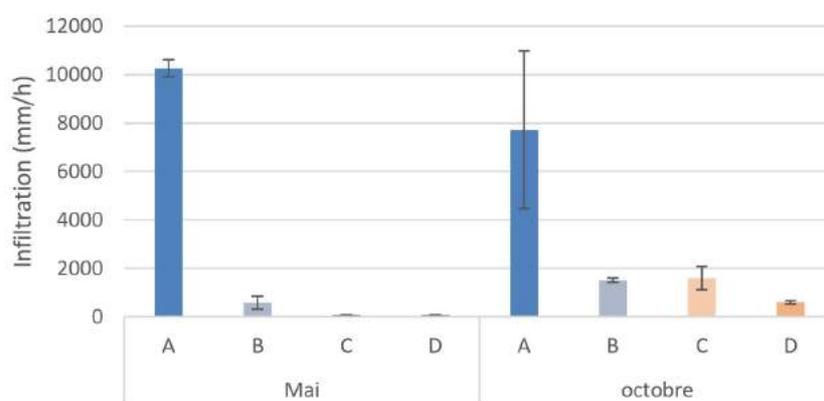
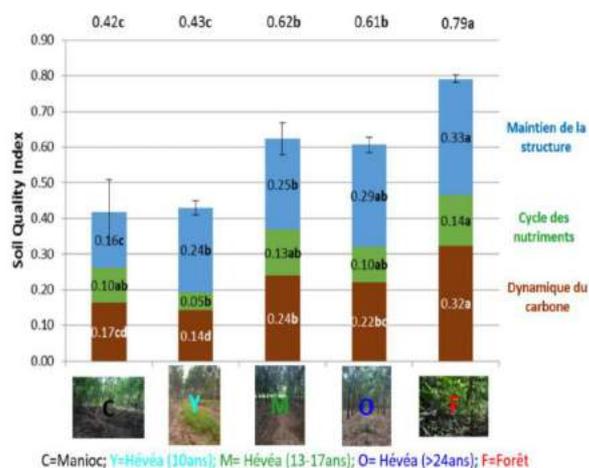


Figure 3 : vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol sur la ligne arborée (A), à 5 mètres de la ligne (B), à 15 mètres (C) et en parcelle sans arbre et ce à 2 périodes de l'année (D)

## OUTILS D'ÉVALUATION GLOBALE DES SOLS



Certains outils agrègent plusieurs indicateurs au sein de macro-indicateurs afin d'approcher la qualité d'un sol plus globalement. C'est le cas de **Biofunctool**<sup>®</sup> développé par le Cirad qui évalue la qualité des sols selon 9 indicateurs de terrain regroupés en 3 catégories (figure 4) : le maintien de la structure du sol, le cycle des nutriments et la dynamique du carbone dans le sol [4]. Cette évaluation multicritère utilisée principalement pour les systèmes tropicaux permet de positionner les systèmes agroforestiers par rapport à d'autres pratiques avec ou sans arbres.

Figure 4 : rendu de la comparaison de systèmes agricoles et forestiers à travers Biofunctool<sup>®</sup> © Cirad

Indicateur	Outils	Temps de réalisation au champ	Coût	Facilité de réalisation	Robustesse des résultats
Sol	Analyse de sol				
	Slake test				
	Test bêche				
	Densité apparente				
	Infiltration de l'eau				

Tableau 1 : synthèse des outils en fonction de leur facilité de mise en œuvre et de la robustesse des résultats obtenus au niveau scientifique

## L'ARBRE, VECTEUR DE BIODIVERSITÉ

### ARBRE ET VIE BIOLOGIQUE DES SOLS

Plusieurs compartiments de biodiversité (qui interagissent tous entre eux) sont observables dans le sol. Ils sont regroupés au sein de la microfaune (bactéries, champignons, virus, etc.) ou de la macrofaune (vers de terre, etc.).

Les **analyses fongiques** et **microbiennes** faites **en laboratoire** (extraction et analyse d'ADN effectués à la suite de prélèvements de racines ou des pièges à mycorhizes) permettent d'étudier la diversité et quantité de champignons mycorhiziens ou de bactéries dans les sols agricoles et de savoir si un sol est biologiquement riche ou non. Ces analyses réalisées dans le cadre de projets de recherches sont à l'heure actuelle très coûteuses et très chronophages. Elles sont peu pertinentes pour un déploiement généralisé au sein des parcelles agroforestières. Des fiches techniques ont été réalisées dans le cadre du projet Casdar Mycoagra sur les techniques pour évaluer la présence des mycorhizes au champ [5, 6, 7, 8]. La **mesure d'activité enzymatique** permet d'évaluer la biomasse microbienne. Les **analyses de phospholipides** et **l'extraction d'ADN** vont permettre d'étudier la diversité microbienne et le **dosage de l'ergostérol** ; la biomasse fongique.

Des méthodes ou **outils pédagogiques** permettent d'étudier la vie biologique des sols sans possibilité de comparaison à l'heure actuelle étant donné que des paramètres sols ont un impact bien plus

déterminant sur la répartition de certaines espèces que l'arbre. La température et l'humidité des sols vont fortement impacter les populations lombriciennes qui supportent difficilement des températures supérieures à 25°C et des niveaux d'humidités inférieurs à 75%. Ces outils sont : 1) Le **test bêche** ou **test moutarde** (feuille d'observation en annexe 1) de l'observatoire participatif des vers de terres (OPVT), 2) les **tests sachet de thé** (ou test du slip dans certains cas) qui permettent de voir la dégradation de produits dans le sol par la vie biologique des sols sans distinction spécifique et caractérisation des populations responsables de la chaîne trophique étudiée. C'est également le cas du **test de respiration du sol** inclus dans la **malette USDA**. Des méthodes pour observer la présence de vertébrés et invertébrés existent et présentent les mêmes limites analytiques que les méthodes précédentes : **pot barber** par ex.

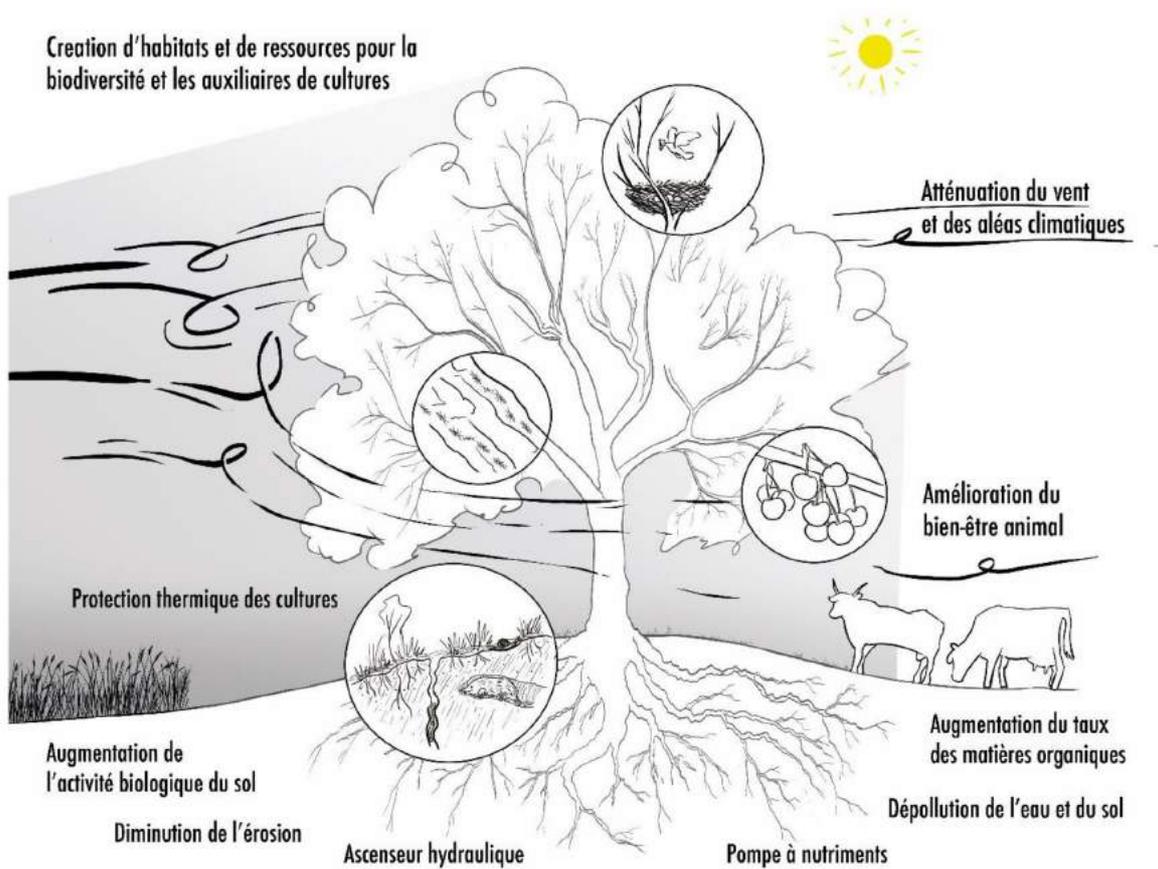
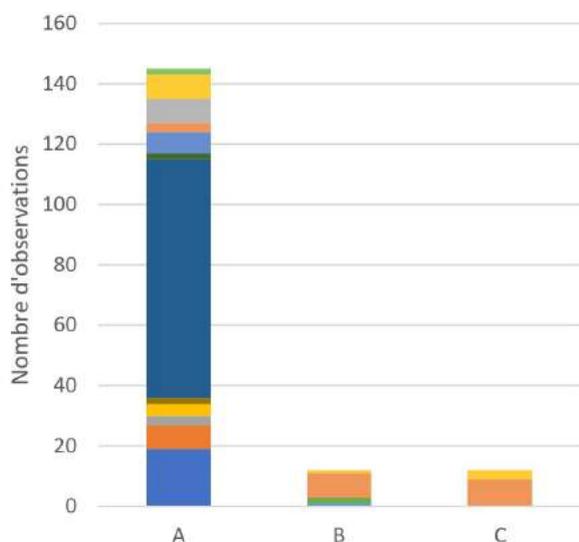


Figure 5 : les services écosystémiques de l'arbre et lien arbre-microclimat © Association Française d'Agroforesterie

## ARBRES ET ARTHROPODES VOLANTS



Se focaliser sur les arthropodes volants et les auxiliaires de culture en tant que « proxy » de biodiversité selon une méthode de **transect** est plus intéressant autant dans des fonctions d'analyses que d'évaluation de l'introduction de l'arbre dans un système agricole. Bien évidemment l'arbre ne vient souvent jamais seul et il est accompagné parfois d'une bande enherbée qui va jouer un rôle certain dans la fourniture d'un habitat et de ressources pour la biodiversité au champ. Séparer l'impact de l'arbre de l'impact de ce couvert enherbé nécessite la mise en place sur site d'une modalité témoin (un site avec couverture végétale herbacée de même constitution, sans arbres). Des relevés en systèmes agroforestier intra-parcellaire jeune (inférieur à 7 ans) ont été réalisés dans les Ardennes, permettant de dégager des tendances sur l'évolution des arthropodes volants (figure 5).

*Figure 6 : nombres d'observations par catégorie d'auxiliaires de cultures et par modalité sur une parcelle en agroforesterie intra-parcellaire dans les Ardennes : linéaire sous-arboré (A), 5 mètres de la ligne d'arbres (B), parcelle témoin (C)*

Des fiches de relevé et d'identification des arthropodes volants ont été réalisées (annexe 2) et utilisées dans plusieurs projets de recherche-action. C'est le cas du projet Casdar Bouquet qui s'est intéressé à évaluer les services apportés par l'arbre au sein des parcours volailles [9].

## ARBRES, AVIFAUNE ET CHIROPTERES

Afin d'évaluer la présence de l'avifaune sauvage et des chiroptères au champ, des matériels et méthodes ont été développés depuis une cinquantaine d'années et le matériel d'écoute devient plus abordable désormais. L'observation par **points d'écoutes** permet de capter la présence d'individus par enregistrement sonore sur des pas de temps longs (enregistrements sur une nuit ou sur plusieurs jours).

Il est désormais reconnu par la littérature scientifique que les systèmes agroforestiers (et notamment les systèmes agroforestiers intra-parcellaires en grandes cultures) ont une influence positive sur l'avifaune et les chiroptères qui vont utiliser ces parcelles en tant que terrain de chasse. Les arbres vont servir de guidage aux chauves-souris.

Une autre méthode de suivi de la biodiversité au champ ou en forêt est un outil développé par le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF) qui s'intitule « **Indice de Biodiversité Potentielle** » (annexe 3). La méthode consiste en l'évaluation de la diversité spécifique d'une forêt homogène. Il est initialement destiné aux forestiers pour diagnostiquer la diversité spécifique lors de mesures d'évaluation de la biodiversité dans la gestion courante des forêts. Cet indice est un indicateur de moyen et non de résultat comme les indicateurs présentés précédemment. Cet indice qui se base sur l'analyse du milieu permet d'extrapoler la présence d'une biodiversité à partir de l'observation d'habitats fonctionnels en place.

Pour ce qui est des systèmes agroforestiers à base d'élevage bovin, la démarche **BIOTEX** créée et menée par l'Institut de l'Élevage a été construite pour les agriculteurs et afin de mettre en évidence la

nécessité de prendre en compte la **biodiversité** ordinaire dans des approches agro-écologiques [10]. Plus précisément, **BIOTEX** est une évaluation multicritère du niveau global de biodiversité d'une exploitation d'élevage et de polyculture-élevage, basé sur la quantification et la caractérisation des infrastructures agroécologiques.

### ARBRES ET COUVERTS VEGETAUX

Lors d'une approche paysagère ou en étudiant des systèmes agroforestiers complexes, il apparaît comme difficile d'isoler l'arbre de ses interactions avec la strate herbacée ou les couverts végétaux d'interculture. Evaluer les bénéfices de cette strate essentielle à la durabilité des systèmes agroforestiers permet d'approcher la performance globale du système agricole. Différents outils et méthodes existent pour déterminer le **bilan humique** d'une parcelle en agroforesterie, prenant en compte l'itinéraire technique ainsi que la productivité des couverts végétaux et la diversité : la **méthode MERCI**.

Les méthodes de **transect** pour évaluer qualitativement et quantitativement la biodiversité d'une parcelle ne peuvent s'affranchir d'intégrer automatiquement les impacts de cette strate. Car comment attribuer la valeur d'un insecte posé une fois sur un arbre ou sur une fleur d'un couvert de trèfles ?

Par ailleurs, la biodiversité floristique peut être approchée par d'autres méthodes de caractérisation de la flore telles que les méthodes **d'identification de la flore bioindiatrice** ou la méthode GALLYC développée dans le Grand-Est.



Photo 3 : les adventices hébergent la biodiversité © Association Française d'Agroforesterie

### RESUME DES OUTILS POUR LE SUIVI DE LA BIODIVERSITE EN CONTEXTE AGRICOLE

Indicateur	Outils	Temps de réalisation au champ	Coût	Facilité de réalisation	Robustesse des résultats
Biodiversité	Transect	Vert	Vert	Vert	Jaune
	Points d'écoute	Jaune	Vert	Jaune	Jaune
	IBP	Vert	Vert	Jaune	Jaune
	Analyses fongiques et microbiennes	Jaune	Rouge	Rouge	Vert
	Test du slip, pots barber, test bêche, test moutarde, test sachet de thé	Vert	Vert	Vert	Rouge

Tableau 2 : synthèse des outils en fonction de leur facilité de mise en œuvre et de la robustesse des résultats obtenus au niveau scientifique

## IMPACT DES ARBRES ET COUVERTS VEGETAUX SUR LA RESSOURCE HYDRIQUE

Des outils ont été développés pour proposer des stratégies d'aménagement des milieux agricoles et des pratiques vertueuses pour limiter les risques de pollutions des eaux par l'application de produits phytosanitaires. Un certain nombre d'outils ont été développés depuis les années 2000. Citons quelques outils à disposition des techniciens et des agriculteurs : **AQUAPLAINE®** (diagnostic des risques de transfert de produits phytosanitaires) d'Arvalis, **ARTHUR** (évaluation des risques de transfert de substances actives phytosanitaires) et **MERLIN** (évaluation des risques de lessivages de nitrates), Aquasite (diagnostic et maîtrise des risques de pollutions ponctuelles par les phytosanitaires).

Il est à noter qu'à date, aucun de ces outils n'intègre l'arbre dans le calcul et les éléments ligneux ne sont pas pris en compte dans les indicateurs de suivi des outils. Cela pose une grande question de la place de l'arbre dans ces outils et dans les stratégies de lutte contre la pollution des eaux, alors même qu'il est reconnu que les arbres limitent l'érosion des sols tout en filtrant l'eau en retenant des éléments polluants.

### Effets des arbres et couverts végétaux sur la ressource hydrique

Les outils tels que **MERCI**, couplés à des **analyses de reliquats azotés** et **d'infiltration de l'eau** dans le sol, permettent d'approcher le rôle des arbres et couverts végétaux dans la gestion en quantité et qualité de l'eau.

Une fiche des outils de la recherche pour réduire les pollutions de l'eau par les pesticides a été réalisée par l'INRAE et peut se trouver ici : [aires-captages.fr/sites/default/files/document-sandre/annexe\\_fiches\\_outils\\_version\\_finale\\_230218.pdf](https://aires-captages.fr/sites/default/files/document-sandre/annexe_fiches_outils_version_finale_230218.pdf)



Photo 4 : système agroforestier en système viticole © Association Française d'Agroforesterie

### Plan de Gestion Durable des Haies (PGDH)

Cet outil développé par l'APCA et l'AFAC-Agroforesteries à destination des agriculteurs. Il fait un état des lieux sur les connaissances et les références techniques et économiques concernant les haies et propose des travaux de gestion et d'amélioration de l'existant. Par ailleurs, il permet d'évaluer via 9 critères (tels que la morphologie, la diversité d'essences, la gestion, etc.) l'état et la qualité des haies, les travaux et entretiens qui doivent être mis en place, leur potentiel d'accueil de biodiversité et de stockage de carbone, ainsi que les valorisations possibles.

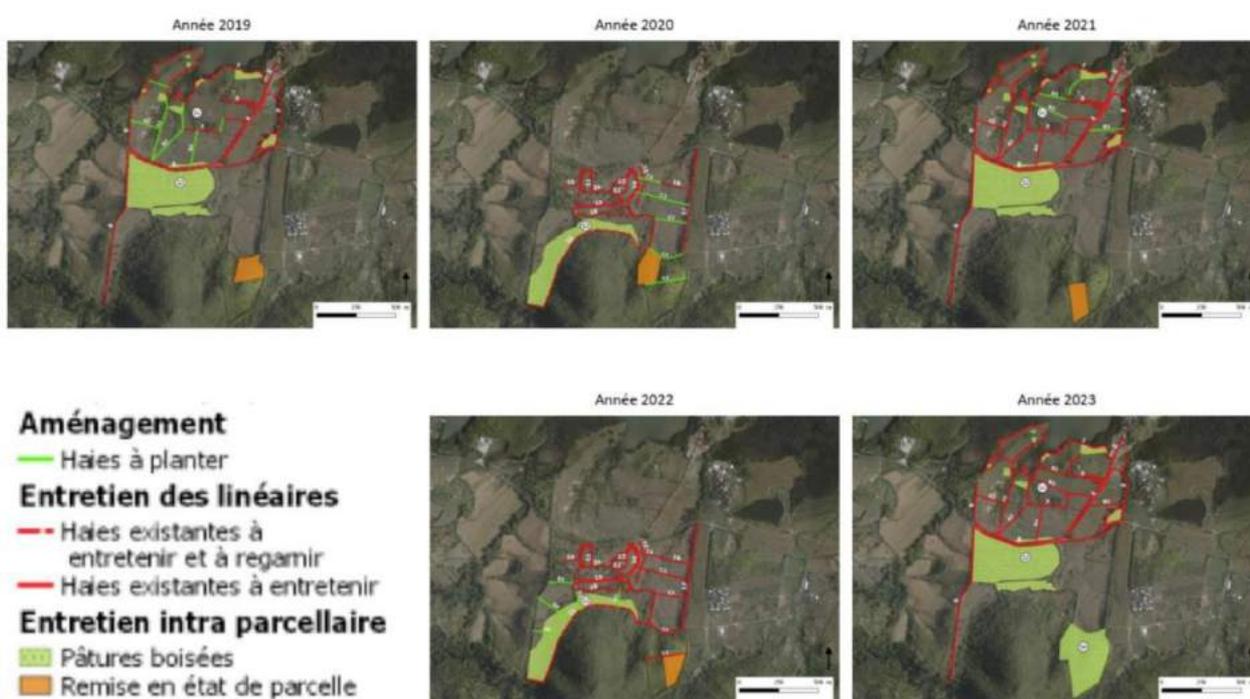


Figure 7: diagnostic et plan de gestion informatisé de parcelles agricoles © Association Française d'Agroforesterie

# OUTILS ET METHODES D'EVALUATION DE L'IMPACT DE L'ARBRE SUR LE CLIMAT ET LE MICRO-CLIMAT

## IMPACT DE L'ARBRE SUR LE BILAN CARBONE

Le contexte actuel de changement climatique nous amène à nous questionner sur l'impact de l'agriculture sur les émissions de gaz à effet de serre (GES). L'agriculture est un secteur important pour répondre aux objectifs de stockage de carbone. La FAO estime que le changement d'utilisation des terres et l'agriculture intensive sont responsables d'environ 1/3 des émissions des GES [21]. Il faut cependant prendre en compte que les terres agricoles sont les plus grands réservoirs de carbone de la planète et que grâce à la photosynthèse, les flux s'équilibrent. Cependant, la FAO estime que les sols pourraient séquestrer 20 Gt de carbone en plus au cours des 25 prochaines années, soit plus de 10% des émissions de GES anthropiques. Ces GES anthropiques s'élèvent à 9,4 Gt de carbone chaque année [11].

L'objectif est d'adopter des pratiques agricoles durables, favorisant la séquestration du carbone dans les sols et dans la biomasse végétale vivante. La diminution du travail du sol, l'intégration de couverts végétaux ou l'agroforesterie sont autant de pratiques permettant d'augmenter la restitution de matières organiques (composée d'environ 50% de carbone organique) dans le sol d'une part, et de stocker du carbone dans les éléments ligneux et dans le sol d'autre part.



Photo 5 : Les arbres en système intra-parcellaire, stocks de carbone sur pied © Association Française d'Agroforesterie

Des dispositifs nationaux et régionaux de paiement pour ces services environnementaux voient le jour afin d'inviter les agriculteurs à adopter des pratiques en faveur du maintien et de la restauration des écosystèmes. Des **méthodes de labélisation « bas carbone »** de systèmes agricoles durables sont ainsi mises en place depuis quelques années. Elles permettent aux agriculteurs de faire financer leurs

projets de transition environnementale par des personnes physiques ou morales souhaitant compenser leurs émissions de GES. Ces labélisations sont encadrées par plusieurs méthodes adaptées aux différents systèmes agricoles et agroforestiers accompagnés (détaillées en section II-4.c).

#### LE CYCLE DU CARBONE DANS LE SOL : CALCUL DU BILAN HUMIQUE DU SOL

Dans les sols cultivés français, les stocks moyens de carbone sont de 50 tC/ha/an sur 0-30 cm de profondeur. Selon l'INRAE, la mise en place de haies permet un taux moyen de stockage additionnel à la culture de 0,75 tC/ha/an [11]. Les systèmes agroforestiers en alignements (densités entre 50 à 100 arbres/ha) permettent en moyenne un stockage additionnel de carbone de 0,24 (0,09 – 0,46) tC/ha/an dans les 30 premiers centimètres du sol. L'introduction de cultures intermédiaires permettraient quant à elles de stocker 0,24 +/- 0,11 tC/ha/an sur cette même profondeur [12]. Le stockage de carbone dans le sol s'effectue grâce à la décomposition des matières organiques (MO) produites sur la parcelle et restituées ou apportées. Une parcelle agroforestière produit 40% de plus de matières organiques qu'une parcelle agricole chaque année, grâce à une meilleure utilisation des ressources sur l'ensemble de l'année [12].

Les MO restituées au sol proviennent de 3 catégories : les résidus de cultures, les couverts végétaux et les produits organiques résiduels (PRO) apportés. Ces matières évoluent de deux manières dans le sol : (i) une partie des matières organiques se minéralise rapidement en libérant des éléments minéraux, du CO<sub>2</sub>, de la chaleur et de l'eau ; (ii) L'autre partie, plus difficilement décomposable, va subir une humification lente aboutissant à un humus stable (séquestrant du carbone et stockant des éléments nutritifs et de l'eau) qui se minéralisera ensuite lentement.

Le **bilan humique** permet de comparer les gains et les pertes d'humus d'une parcelle sur une profondeur définie. Les gains viennent des MO restituées ou apportées et les pertes de la minéralisation lente de l'humus selon son attachement aux argiles. Il est ainsi possible d'apprécier l'impact des techniques culturales à travers un maintien, voir une augmentation, du niveau de MO et donc de génération d'humus et de fertilité du sol.

La manière la plus simple de connaître la quantité de carbone stockée par le sol est de réaliser une **analyse de sol** et de la coupler à une mesure de **densité apparente du sol** puis de recommencer la mesure quelques années plus tard. Il est bien sûr nécessaire d'avoir une représentativité d'échantillonnage pour avoir des résultats robustes au niveau statistique et s'affranchir d'effets localisés ou indépendants des pratiques agricoles évaluées.

#### Cas concrets

##### *Résultats du stockage carbone des arbres dans les sols dans un système parcours volailles (Gers)*

Depuis 2003, 6 km de haie et 1400 arbres intra-parcellaires sur 20 ha ont été installés sur l'exploitation spécialisée dans l'élevage de volailles. Grâce aux analyses de sols effectuées régulièrement, il est possible d'évaluer l'évolution du taux de matière organique des sols. Ce dernier est passé de 2,4 à 3,3%, soit une augmentation du stock de carbone de 21,5 tC/ha en 17 ans.

##### *Résultats du stockage carbone des arbres dans les sols dans un système intra-parcellaire en grandes cultures (Somme)*

En 2009, 670 arbres intra-parcellaires ont été plantés sur 13 ha destinés aux grandes cultures. Deux analyses de sol espacées de 6 ans ont montré une augmentation des taux de matières organiques de 0,3%, soit 7,5 tC/ha.

Par ailleurs, des outils et modèles ont été développés pour estimer la répartition du carbone dans les différentes parties de ces compartiments de MO et de déterminer, via des coefficients, la part de carbone humifiée et celle minéralisée rapidement. Les suivis précis des itinéraires techniques (travaux, apports, composition, fréquence, rendements), des assolements et l'appréciation du sol (argile, calcaire, C/N, pH) sont donc primordiaux ; tout comme les facteurs extérieurs tels que la température et le bilan hydrique annuel qui vont déterminer les vitesses de minéralisation dans les sols. Certaines données climatiques et pédologiques manquantes pourront être renseignées par défaut. Les 3 outils décrits ci-dessous permettent de mesurer efficacement et de manière complète le stockage de carbone dans le sol. Pour certains de ces modèles, le calcul est complété par le stockage de carbone dans les végétaux et selon la nature de ces derniers.

**Modèle SIMEOS-AMG** : outil approchant l'évolution de l'état organique du sol. Cet outil réalisé par AGRO-TRANSFERT est fondé sur le modèle du Bilan Humique AMG de l'INRA Agro-Impact. Il est à destination des agriculteurs et des professionnels agricoles pour simuler l'évolution des teneurs et des stocks de matières organiques et de carbone en fonction des systèmes de cultures. Afin de faire fonctionner le modèle, il suffit d'entrer les informations de l'itinéraire technique (exports des résidus, apports organiques, rotations), ainsi que les données de sol et de climat. Les résultats du modèle exposent l'évolution des teneurs en matières organiques et la quantité de carbone stocké sur une projection de 100 ans.

## Cas concrets

L'impact des couverts végétaux dans des systèmes grandes cultures : le cas de couverts végétaux à base de moutarde (Hauts-de-France)

Différents systèmes agricoles dans lesquels ont été mis en place des couverts végétaux de moutarde plus ou moins diversifiés et plus ou moins productifs ont été simulés à partir de données réelles au champ sur une durée de 30 à 100 ans, selon une rotation de 6 ans. Le modèle **SIMEOS-AMG** a permis d'estimer l'évolution des taux de matières organiques et du stock de carbone en fonction des 3 pratiques agricoles.

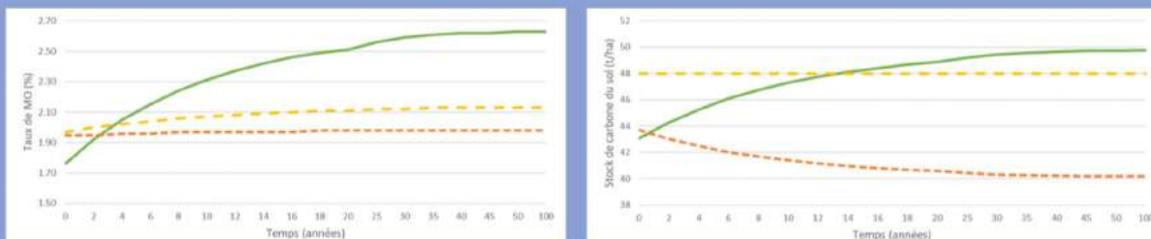


Figure 8 : évolution des taux de matières organiques selon le type de couverts mis en place et les pratiques agricoles associées © Association Française d'Agroforesterie

Les modélisations montrent que selon les pratiques agricoles, les rendements et les compositions des couverts intermédiaires d'intercultures et les conditions pédo-climatiques, les effets sur l'évolution des stocks de carbone dans les sols peuvent être considérables.

## Et l'effet de l'arbre sur le sol ?

Il est également possible d'intégrer aux modèles les effets des éléments arborés sur le stockage de carbone du sol. Dans les systèmes précédemment présentés, 50 arbres/ha et 100 mètres linéaires de haie/ha ont été ajoutés dans le système et les effets sol ont été modélisés à travers **SIMEOS-AMG** et en couplant des équations de transformation des matières organiques injectées dans le sol par les arbres (feuilles, racines).

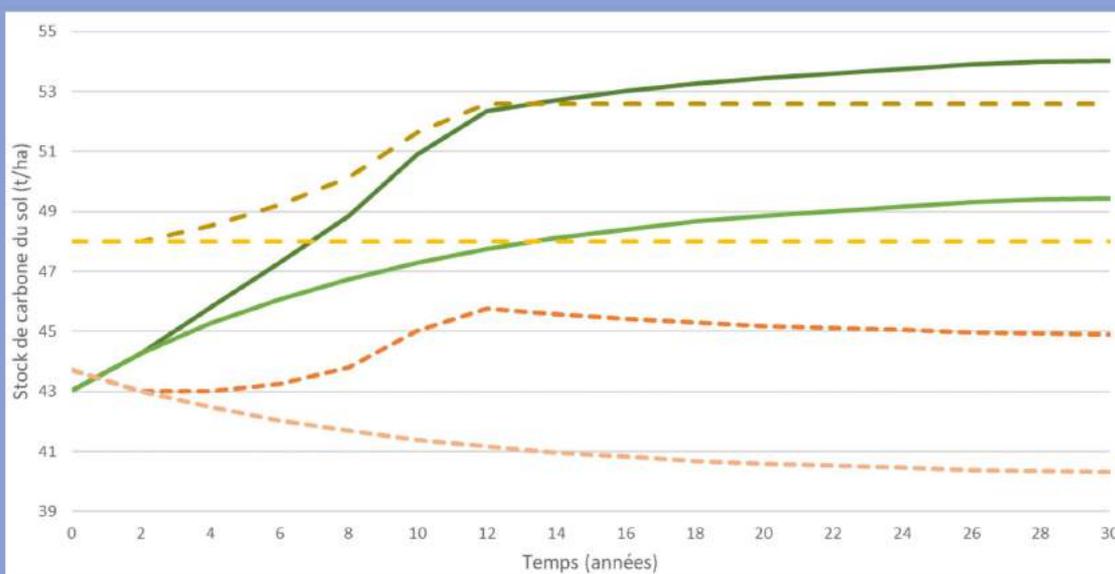


Figure 9 : évolution des taux de matières organiques selon le type de couverts mis en place et pour des pratiques agroforestières associées identiques © Association Française d'Agroforesterie

Les systèmes agroforestiers stockent plus de carbone dans les sols que les systèmes en couverts végétaux uniquement. Après une phase neutre de quelques années, le stockage de carbone des arbres dans le sol est croissant, avant de se stabiliser.

Evolution en 30ans par rapport à T0	Couvert 1		Couvert 2		Couvert 3	
	Classique	AF	Classique	AF	Classique	AF
Taux de MO (ZT)	+ 47,2 %		+ 1,5 %		+ 7,6 %	
Stock C (0-30cm) en t/ha	+ 14,8 %	+ 25,5 %	- 7,7 %	+ 2,8 %	0 %	+ 9,6 %

Tableau 3 : synthèse des effets sur les taux de matières organiques des différentes pratiques agricoles et selon l'intégration ou non de l'arbre © Association Française d'Agroforesterie

**Outil MERCI - Mesures du carbone et de l'azote restitués par le couvert végétal à travers l'estimation de la biomasse aérienne verte** a été développé par la Chambre d'Agriculture de Nouvelle-Aquitaine pour les agriculteurs et les techniciens agricoles. Il permet d'estimer la biomasse produite par les cultures intermédiaires et d'estimer les quantités d'azote, phosphore et potasse restituées. La méthode consiste à prélever et peser sur de petites zones représentatives de la parcelle la masse verte des différentes espèces herbacées du couvert végétal. Ces mesures sont ramenées en biomasses sèches puis sont couplées à des références terrains et des données simulées par l'**outil STICS** développé par l'INRAE.

### Cas concrets

Des couverts végétaux d'été sont testés dans une parcelle en rotation soja et blé, Haute-Garonne :  
**Couvert 1** : sorgho, tournesol, vesce, trèfle, maïs  
**Couvert 2** : sorgho, tournesol, vesce, trèfle, avoine  
 Après pesée de chaque couvert sur 3 placettes d'1m<sup>2</sup>, les données ont été intégrées à l'outil **MERCI** en considérant que les couverts sont restitués au sol. La méthode **MERCI** a permis de comparer les 2 couverts pour estimer la biomasse aérienne produite.

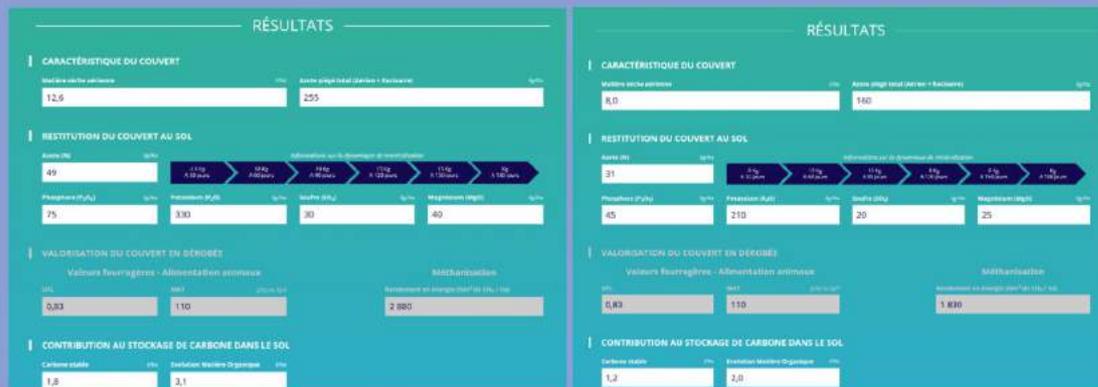


Figure 10 : saisie des données terrain de pesée dans l'outil MERCI

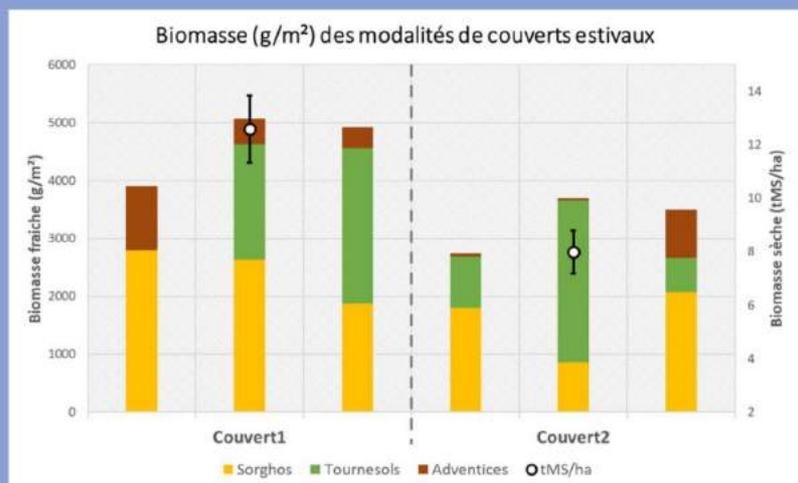


Figure 11: résultat MERCI de 2 couverts mis en place en Haute-Garonne © Association Française d'Agroforesterie

Le couvert 1 produit plus de biomasse que le couvert 2 : 12,6 tMS/ha contre 8 tMS/ha.

## LE CYCLE DU CARBONE A L'ECHELLE DE L'ARBRE

Dans les végétaux, le carbone est réparti entre la biomasse ligneuse, la partie souterraine (racines et exsudats) et partie aérienne (tronc, branches) et la litière. Une étude a déterminé qu'en système agroforestier linéaire, en moyenne la biomasse aérienne et souterraine des arbres stocke 1,08 (+/- 0,3) tC/ha/an [12]. Une autre étude estime que le carbone stocké par les haies est de 0,5 à 1,2 tC/km/an dans la biomasse aérienne, de 0,12 à 0,7 tC/km/an dans la biomasse racinaire et de 0,12 à 3 tC/km/an dans le sol [13]. Les écarts de valeurs sont dus à la forme de haie (pluri-strates, taillis, futaie, arbustive...) [13]. En parallèle, la **méthode haie du Label Bas-carbone** estime que les travaux d'exploitation des haies représentent 0,003 à 0,006 tC/ha/an émis alors que leur stockage est évalué à 0,56 à 0,94 tC/ha/an [14, 15, 16].

Carbone séquestré en tC/km/an	Haie pluristrate	Haie de taillis	Haie de futaie	Haie arbustive
Racine	0,49	0,87	0,74	0,11
Biomasse aérienne exploitée	1,20	3,11	1,32	0,00
Biomasse aérienne non exploitée	0,52	0,00	1,32	0,38

Tableau 4 : Stockage de carbone par différents types de haies © ADEME, 2020

## STOCKAGE DE CARBONE DANS LA BIOMASSE LIGNEUSE

Plusieurs outils et méthodes ont été adaptés ou développés pour prendre en compte le stockage de carbone dans la biomasse ligneuse : **méthodes Label bas carbone haie, arboriculture plantation de verger, CAC6...** [18]

Pour le calcul de stockage de carbone, il est primordial de différencier les arbres de haut jet, des moyens jets et arbustes qui n'ont pas les mêmes dynamiques. La distinction doit être faite lorsque l'élément arboré développe une canopée de plus de 3 mètres de diamètre sans être buissonnant ou arbustif. Afin de déterminer le stockage de carbone d'un élément arboré, il est nécessaire de mesurer le stockage par les parties aériennes et par les parties racinaires. Afin d'évaluer l'ensemble du carbone stocké, ces 2 données sont habituellement additionnées puis multipliées par le taux de carbone de la matière sèche ligneuse (0,475 tC/tMS).

### Le stockage de carbone dans la partie aérienne de l'arbre

Dans les systèmes agroforestiers linéaires, des **mesures dendrométriques** simples (hauteur et circonférence des arbres) sont souvent jugées comme étant suffisantes pour calculer le volume total aérien d'un arbre, c'est-à-dire la tige et les branches en mètre cube. Des méthodes ont été mises en place pour que les calculs tiennent compte de la diversité des essences d'arbres.

Les calculs pour les haies sont plus compliqués par le mélange important d'essences. Les mesures sont donc plus nombreuses : linéaire de haie, nombre de tiges moyen par mètre linéaire et moyenne de la hauteur et de la circonférence à 1m30 de 10 tiges au hasard... Dans les haies gérées, il est nécessaire de quantifier le volume en mètres cubes de la biomasse exportée à chaque taille.

### Le stockage de carbone dans la partie souterraine de l'arbre

Le calcul de biomasse racinaire peut se baser sur la **méthode label bas carbone « boisement »** développée par le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF). Les formules sont établies à partir de données issues de forêts tempérées de feuillus et résineux et peuvent être adaptées aux systèmes agroforestiers [17]. A partir de l'évaluation de la biomasse aérienne liée à l'âge de la plantation, il est

possible d'appliquer des coefficients d'expansion racinaire pour déterminer la quantité de carbone stockée dans la biomasse racinaire [13] et de rajouter les quantités de carbone stockées via les exsudats racinaires.

### Le stockage de carbone dans la litière

Dans la méthode **label bas carbone boisement** [17], il est considéré que le compartiment litière atteint sa valeur d'équilibre au bout de 30 ans. La valeur de référence est de 10 tC/ha – soit un stockage moyen de carbone dans la litière forestière de 0.33 tC/ha/an [19]. Dans les systèmes agroforestiers ayant une couverture arborée inférieure à 60% de la surface, il est nécessaire d'adapter la valeur de référence en fonction de la couverture arborée que procure le système. Le pourcentage peut s'appliquer proportionnellement pour des couvertures entre 30 et 60% de la surface.

### Cas concrets

#### Système agroforestier parcours volaille, Gers

L'exploitation à fait l'objet d'une évaluation du stockage de carbone par la biomasse aérienne, racinaire et dans la litière via l'outil **CAC6** développé par l'Association Française d'Agroforesterie. En 17 ans, sur les parcours volailles d'une surface de 4 ha et composés de 1 km de haie et 600 arbres intra-parcellaires, 44,4 tC ont été stockés, soit environ 0,7 tC/ha/an. A travers une projection à 30 ans de la croissance des arbres, il est possible d'estimer que durant les prochaines années, ces arbres permettront le stockage de 2,8 tC/ha/an. A l'échelle de l'exploitation, les 6 km de haies permettent un stockage additionnel de 13,5 tC/an.

#### Agroforesterie intra-parcellaire en grandes cultures, Ardennes

De 2000 à 2030, le stockage additionnel fourni par 219 arbres plantés sur 4,36 hectares et les couverts végétaux sont estimés à 39,7 tC/ha.

### LE CYCLE DES GES A L'ECHELLE D'UNE EXPLOITATION AGROFORESTIERE

Plusieurs outils et méthodes ont été développés pour estimer le carbone stocké par la biomasse ligneuse : il est ainsi possible d'estimer une moyenne du stockage annuel en fonction de la courbe de croissance d'un arbre durant les 30 premières années de sa vie. En ramenant à l'hectare, une exploitation peut évaluer sa quantité de carbone stockée chaque année et à long terme.

Des méthodes ont été créés pour quantifier le stockage du carbone à l'échelle de l'exploitation (dans le sol, dans la biomasse produite et dans le bois valorisé). Il est ainsi possible de soutenir les pratiques agroforestières permettant la réduction des émissions de GES.

C'est le cas du **label bas carbone** qui existe depuis 2018. Il s'agit d'un outil de compensation carbone volontaire promu par le gouvernement français. Il permet de labelliser et de financer des projets de séquestration ou d'évitement d'émissions de carbone. Dans le domaine agricole, différentes méthodes existent, de nouvelles sont créées chaque année et d'autres sont mises à jour, afin de représenter la pluralité des activités et des projets potentiels bénéficiaires de cette initiative. En résumé, les méthodes existantes sont les suivantes :

- **Carbon Agri** : méthode de suivi des réductions d'émissions en élevages bovins et de grandes cultures ;

- **Méthode label bas carbone plantation de vergers** : stockage de carbone permis par la plantation d'une culture fruitière pérenne (verger) sur une terre non cultivée [20] ;
- **Méthode label bas carbone haies** : méthode d'évaluation du stockage du carbone par les haies gérées durablement.

D'autres méthodes sont en cours d'évaluation pour évaluer les impacts des pratiques agricoles sur les émissions de GES des fermes mais sortent du cadre *stricto sensu* des arbres et de la végétation ligneuse sur la ferme : **Méthode SOBAC'ECO-TMM** : impact carbone des projets agricoles de réduction de l'usage d'intrants de synthèse et organiques achetés ; **méthodes grandes cultures et légumineuses** : impact carbone des modifications de pratiques et d'ateliers grandes cultures, etc.

Les **méthodes label bas carbone haies et plantation de vergers** détaillent les exigences adaptées aux projets de plantations d'arbres et arbustes souhaitant labelliser leur réduction d'émissions de GES à partir du référentiel national. Les porteurs de projets peuvent être rémunérés pour la plantation par un partenaire volontaire qui souhaite faire reconnaître ses réductions d'émissions, ou financer eux-mêmes les plantations et bénéficier d'une labélisation. A ce jour, ces méthodes ne sont applicables qu'aux exploitations agricoles en France métropolitaine qui s'engagent dans un projet de plantation d'arbres ; les arbres déjà installés ne sont pas éligibles.

Les méthodes varient selon les types de systèmes agroforestiers de par des calculs et des données de références différentes. Elles sont novatrices dans la prise en compte du stockage de carbone dans le sol, la biomasse ligneuse aérienne et racinaire mais nécessitent l'acquisition de références/données complémentaires, actuellement non disponibles, pour affiner les calculs de stockage selon les espèces, le climat, l'itinéraire technique ou encore le stock de référence de la parcelle avant la mise en place du projet.

### Focus sur la Méthode label bas carbone arboriculture plantation de verger

La **méthode verger** concerne l'installation d'un verger de fruitiers à vocation productive et à haute densité de plantation sur une durée de 20 ans [20]. Les vergers doivent être plantés sur des terres non cultivées à cet usage au préalable. Il est impossible de planter sur une friche herbacée car aucune méthode ne permet de comptabiliser le stock de carbone dans les sols et dans la biomasse de ces systèmes. Les GES pris en compte sont le N<sub>2</sub>O, le CO<sub>2</sub> et l'équivalent en CO<sub>2</sub> lié à l'utilisation des ressources énergétiques et des intrants. Plusieurs classes d'émissions de GES sont applicables : les émissions « classiques » qui ont lieu sur la parcelle du projet ; et les émissions « indirectes » associées à l'amont ou l'aval de ces parcelles (fertilisants, combustibles fossiles, etc.). Au sein de ces 2 classes d'émissions, les réductions sont comptabilisées comme « anticipées » ou « effectuées » selon la vérification préalable ou à posteriori de leur réalisation. Les réductions sont liées au stockage dans les sols et la biomasse ligneuse, ainsi que la limitation d'utilisation des ressources naturelles, la valorisation énergétique des coproduits et la substitution énergétique.

### Focus sur la méthode label bas carbone Haie

La **méthode haies** considère le stockage « classique » de carbone dans les sols, dans la biomasse aérienne et racinaire et dans le bois mort des haies bocagères agricoles en périphérie de parcelles et gérées durablement. Elle considère les réductions d'émissions pour des projets de haies sur une durée de 5 ans renouvelable 2 fois. Cette méthode permet également de valoriser les réductions d'émissions par substitution du bois à la place d'énergies fossiles. La gestion durable des haies dans le cadre de cette labellisation, s'appuie sur le **plan de gestion durable des haies (PGDH)** dont l'initiative a été

développée par l'APCA et l'AFAC-Agroforesteries. Les réductions d'émissions peuvent être utilisées pour la compensation volontaire d'acteurs non-étatiques uniquement.

### Focus sur la méthode label bas carbone agroforesterie intra-parcellaire

La méthode agroforesterie intra-parcellaire est quant à elle en cours de rédaction. Elle correspondra aux associations d'arbres et de culture et/ou d'élevage sur des parcelles sans changement d'usage des sols et avec une densité de 30 à 100 arbres/hectare.

### Focus sur l'outil CAC6

CAC6 est un outil d'évaluation du carbone stocké dans les arbres et les haies par un système agroforestier développé par l'Association Française d'Agroforesterie. Cet outil n'est pas en diffusion libre comme c'est le cas des méthodes Label Bas Carbone.

Indicateur	Outils	Temps de réalisation au champ	Coût	Facilité de réalisation	Robustesse des résultats
Climat et carbone	Sol	SIMEOS-AMG			
		MERCI			
	Arbre	CAC6			
		Méthode Label bas carbone Haie			
		Méthode Label bas carbone Arboriculture, Verger			
		Méthode agroforesterie intra-parcellaire (à venir)			

Tableau 5 : synthèse des outils d'évaluation des pratiques agroforestières sur le carbone en fonction de leur facilité de mise en œuvre et de la robustesse des résultats obtenus au niveau scientifique

Ces outils peuvent être couplés à d'autres qui permettent d'avoir une vision globale des émissions de GES à l'échelle de sa ferme et de pouvoir estimer la différence entre le stockage et le déstockage de carbone de mon exploitation. Citons par exemple : « Je diagnostique ma ferme » (outil d'autodiagnostic des performances énergétiques et des émissions de GES), EGES® (diagnostic des émissions de GES) ou Dia'terre® (diagnostic des émissions de GES).

## IMPACT DE L'ARBRE SUR LE MICRO-CLIMAT

D'un point de vue agronomique, la réduction du vent favorise la conservation de l'humidité en plus de protéger les cultures et animaux des extrêmes climatiques que sont les tempêtes et les canicules [22, 23]. Des études mesurent des augmentations de rendements sensibles des cultures à l'abri d'une haie brise vent [22, 24] dans différents pays. Cependant, il n'y a pas d'outils de mesure précis quant à l'impact géolocalisé des éléments ligneux sur une parcelle agroforestière. Des projets de recherche appliquée traitant ce point précis pourraient répondre à cet enjeu et amener à la création d'un outil

d'aide à la décision pour les agriculteurs qui puisse les guider dans l'aménagement de leurs parcelles en tenant compte de cet aspect micro-climat.

### Arbres et aléas climatiques

Pour mesurer des données au champ des effets de l'arbre sur le microclimat, les agriculteurs peuvent utiliser des stations météo qui mesurent en temps réel la température, l'humidité et la vitesse du vent. D'autres outils empiriques tels que des sondes capacitatives et des thermomètre sol-air peuvent permettre d'approcher les impacts localisés des arbres sur les flux d'eau et les températures. En modélisant les résultats, il est possible d'approcher des dynamiques parcelles à condition d'avoir suffisamment de données d'entrée. De plus en plus d'expérimentations au champ sont menées ces dernières années sous l'initiative des agences de l'eau (programme Agr'eau de l'Association Française d'Agroforesterie et projet Bag'ages piloté par l'INRAE sur le bassin hydrographique Adour-Garonne et financés par l'Agence de l'eau de ce bassin). Les résultats permettent de comparer des pratiques agricoles entre elle et leur impact sur l'érosion, le stockage de l'eau et l'infiltration de l'eau dans les sols tout en mesurant l'impact sur les rendements et la qualité des grains des céréales des systèmes agroforestiers intraparcéllaires grandes cultures.

## OUTILS ET METHODES D'EVALUATION DE L'IMPACT DE L'ARBRE SUR LE BIEN-ETRE ANIMAL

L'intérêt d'estimer l'impact des arbres sur le bien-être animal augmente à mesure que les pressions sociétales sur l'agriculture se font plus fortes. Des outils essayant de lier le bien-être animal aux pratiques agricoles ont émergé dans le cadre de projets ayant une approche systémique (EBENE® en parcours volailles, élevages herbivore lait, etc.).

### Focus sur l'outil EBENE

**EBENE®** est une application numérique et un outil d'évaluation du bien-être animal en parcours volailles et élevages cynicoles. EBENE® étudie les 4 grands principes garantissant le bien-être animal des volailles : une bonne alimentation (qualité et quantité), une bonne santé (suivi sanitaire), un bon environnement (qualité de la litière par ex.), des comportements appropriés (aménagement pour favoriser l'expression du comportement naturel de la volaille) [25]. Cet outil développé à la base pour l'évaluation en claustration a été adapté aux parcours volailles plein-air (Casdar BOUQUET). Sur base de retours terrains et de dires d'experts, la méthode a été pondérée pour intégrer des pratiques agroforestières à l'outil.

# OUTILS ET METHODES D'EVALUATION DE L'IMPACT DE L'ARBRE SUR L'ECONOMIE DE LA FERME

## IMPACT ECONOMIQUE DE L'ARBRE A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

L'impact de l'arbre sur le volet économique d'une ferme peut facilement être évalué dans la mesure où l'arbre va être considéré comme un produit d'exploitation. Les productions de l'arbre, qu'elles soient vendues sous forme de fruits ou de bois vont être renseignés dans le compte de résultat de l'exploitation à partir du moment où il y a un acte de transmission monnayé à un tiers.

Approcher la production et l'impact économique de l'arbre à la ferme pose la question des usages de l'arbre sur la ferme qui ne sont pas consignés au niveau comptable. Il peut s'agir de l'utilisation de l'arbre en auto-consommation pour le bois de chauffage, en fourrage ligneux pour les bovins, en bois plaquette ou d'autres usages agricoles et forestiers de l'arbre.

Pour estimer cette productivité de l'arbre, les **plans de gestion de la ressource** ainsi que des **mesures d'éléments arborés** dans le temps (accroissement moyen annuel, quantité de fourrage équivalent générée...) peuvent permettre à l'agriculteur d'avoir une idée plus précise.

La mise en œuvre d'outils pour gérer durablement la ressource et l'estimer nécessite dans la plupart des cas l'appel à une structure technique d'accompagnement ou un expert.

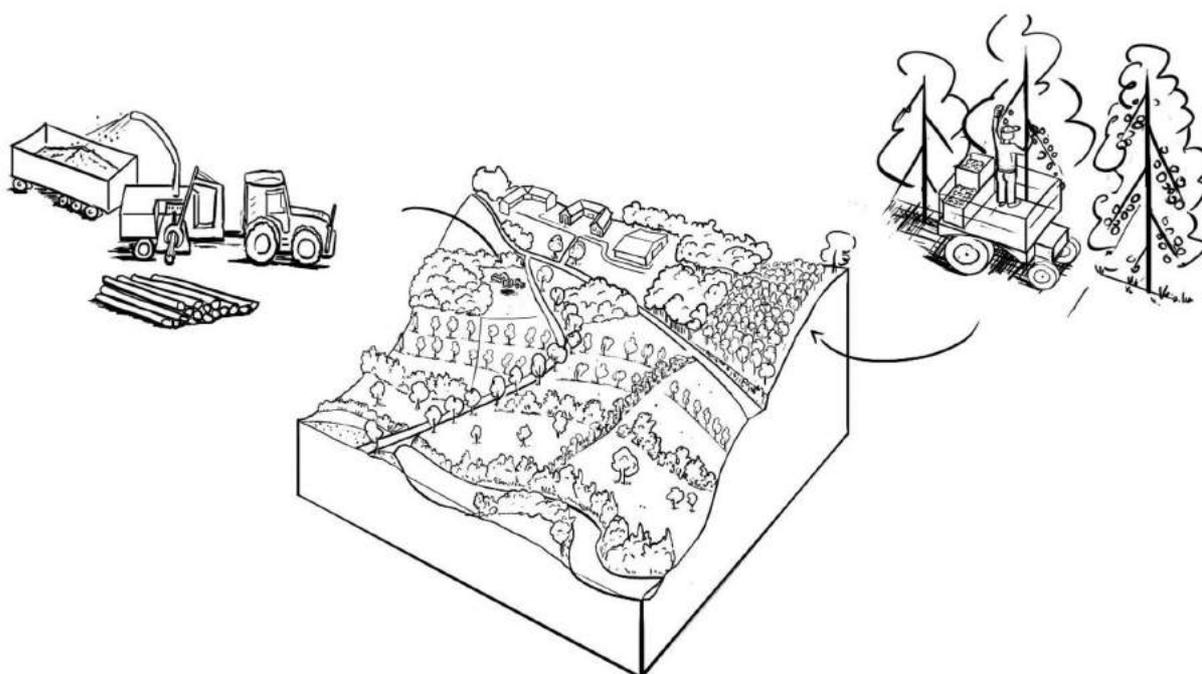


Figure 12 : l'arbre a toute sa place dans l'économie de la ferme © Association Française d'Agroforesterie

## IMPACT ECONOMIQUE DE L'ARBRE A L'ECHELLE DE LA FERME

Il est difficile d'isoler l'arbre des autres variables à l'échelle de la ferme qui conditionne la durabilité environnementale, économique et sociale de l'exploitation. Des outils tels que **l'Indicateur de Durabilité des Exploitations Agricoles 4 (IDEA 4)** existent. **IDEA4** est une analyse multicritère de la performance globale de l'exploitation (autonomie, ancrage territorial, responsabilité, robustesse, productivité) : 53 indicateurs permettent de balayer la durabilité d'une exploitation agricole via les volets agroécologiques, socio-territoriaux et économique. Une note sur 100 points est attribuée par volet. Cette méthode est destinée à l'enseignement agricole, aux agriculteurs et aux acteurs de la transition agroécologique.

Un **diagnostic de durabilité** consistant en l'analyse de la durabilité économique, environnementale et sociale, développé par le réseau CIVAM, et évaluant 21 indicateurs la durabilité économique, environnementale et sociale d'une exploitation agricole, existe également et peut être téléchargé ou utilisé en ligne.

D'autres méthodes sont utilisées et développées en dehors du territoire français seul. C'est le cas de **Response-Inducing Sustainability Evaluation (RISE)** qui est également une analyse multicritère de la durabilité évaluant la durabilité d'une ferme selon une cinquantaine d'indicateurs répartis en 10 thématiques.

Au sein de ces différents outils, la place de l'arbre n'est pas isolée. Elle fait partie intégrante de la méthode d'évaluation. Cependant, il est possible de visualiser ce que le système serait sans arbre à partir du moment où tous les éléments financiers des productions secondaires reliés à l'arbre sont retirés, qu'ils soient numéraires (vente de fruits occasionnelles) ou de substitution de coûts (volumes de fourrage ou de litière bois substitués à la paille). Dans le second cas, les estimations des émissions ou des coûts évités vont être ajoutés dans l'analyse multicritère de comparaison n'intégrant pas l'arbre.

Des méthodes issues de la recherche fondamentale ont vu le jour sur la performance et l'impact des pratiques agricoles sur les ressources hydriques, l'air et le sol bien qu'aucune ne donne pleinement sa place à l'arbre agricole à l'heure actuelle. Citons par exemple **INDIGO®** (analyse de l'impact environnemental des pratiques agricole sur l'air, l'eau et le sol) développé par l'INRAE, **PERSYST** ou **MASC** (Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems). Les diagnostics d'évaluation de la durabilité ont émergé en nombre ces dernières années et ont tous des limites et spécificités qu'il est difficile à l'heure actuelle de comparer. Les analyses sur la robustesse des données, le temps de traitement ainsi que l'utilité des informations traitées est parfois tout à fait subjectif et sans réelle comparaison entre outils.

Citons parmi les outils à disposition **Cassiopée PERFORMANCE** (Diagnostic de multi performance des exploitations) développé par Agrosolutions, Arvalis et Terres Inovia, **DAESE** (Diagnostic agro-environnemental social et économique), **DAE-G** d'Agro-Transfert (Diagnostic agroenvironnemental géographique pour évaluer les risques d'impacts environnementaux des pratiques agricoles) ou encore **Dialecte** de Solagro (diagnostic agroenvironnemental et durabilité).

## TABLEAU RECAPITULATIF DES OUTILS ET DE LEURS UTILITES

Indicateur	Outils		Temps de réalisation au champ	Coût	Facilité de réalisation	Robustesse des résultats
Sol	Analyse de sol					
	Slake test					
	Test bêche					
	Densité apparente					
	Infiltration de l'eau					
Biodiversité	Transect					
	Points d'écoute					
	IBP					
	Analyses fongiques et microbiennes					
	Test du slip, pots barber, test bêche, test moutarde, test sachet de thé					
Climat et carbone	Sol	SIMEOS-AMG				
		MERCI				
	Arbre	CAC6				
		Méthode Label bas carbone Haie				
		Méthode Label bas carbone Arboriculture, Verger				
		Méthode agroforesterie intra-parcellaire (à venir)				
Bien-être animal	EBENE®					
Micro-climat	Station météo					
	Sondes capacitives et outils de mesures flux d'eau et air					
Economie	Indicateur de Durabilité des Exploitations Agricoles 4 (IDEA 4)					
Durabilité globale	Diagnostic de Durabilité					
	Response-Inducing Sustainability Evaluation (RISE)					
	Autres outils : DAE-G, DAESE, etc.					

	Long, cher, difficile
	Accessible
	Facile, très robuste
	Non renseigné

# REMERCIEMENTS

L'équipe de rédaction souhaite remercier les interlocuteurs ayant répondu aux sollicitations pour enrichir le présent document : l'INRAE Centre Val de Loire (*dynamique sol*), l'INRAE Nancy (*évolution écosystème*) dont l'animateur de l'équipe AGISEM, l'INRAE de Dijon (*microfaune du sol et focus mycorhizes*), le Centre Régional de la Propriété Forestière Occitanie (*Indice de Biodiversité Potentielle*), Le Centre National de la Propriété Forestière (*Modèle numérique de hauteur de canopée calculé à partir du modèle numérique de surface et du modèle numérique de terrain & Climafor*), Agro-transfert (*SIMEOS-AMG et évaluation de l'évolution de l'état organique des sols*), La chambre d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine (*MERCI*), La Chambre d'Agriculture des Pays-de-la Loire (*méthode haie et valorisation du carbone via le label bas carbone*), Agrosolutions (*valorisation du carbone en système vergers*). Un remerciement tout particulier à Renaud Lecomte qui a réalisé des illustrations exclusives.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Mycoagra, 2019.** Fiche technique : quantification de la glomaline. Rôle écologique de l'organisme visé. 2p
- [2] **Wright, Upadhyaya, 1998.** A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198: 97–107
- [3] **USDA, 1999.** Soil quality test kit guide. 1-79
- [4] **Brauman, Thouzazeau, 2020.** Biofunctool® : un outil de terrain pour évaluer la santé des sols, base sur la mesure de fonctions issues de l'activité des organismes du sol. *Etude et Gestion des Sols* 27, 289–303
- [5] **Mycoagra, 2019.** Fiche technique : la symbiose mycorhizienne. 2p
- [6] **Mycoagra, 2019.** Fiche technique : la préparation des échantillons. 2p
- [7] **Mycoagra, 2019.** Fiche technique : mesure du taux de mycorhization. 2p
- [8] **Mycoagra, 2019.** Fiche technique : identification moléculaire des champignons endomycorhiziens. 2p
- [9] **Bouquet, 2020.** Evaluer les services rendus par un atelier volailles avec parcours : le cadre méthodologique Bouquet (en cours de publication). 5p
- [10] **Idèle, 2014.** Biotex, une démarche d'évaluation multicritère de la biodiversité ordinaire dans les systèmes d'exploitation d'élevage et de polyculture-élevage.
- [11] **INRAE, 2019.** Pellerin, Bamière (pilotes scientifiques), Launay, Martin, Schiavo, Angers, et al. Stocker du carbone dans les sols français, quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114p
- [12] **Cardinael, 2015.** Stockage de carbone et dynamique des matières organiques des sols en agroforesterie sous climat méditerranéen et tempéré. *Sciences agricoles*. Université Paris Saclay
- [13] **ADEME, 2020.** CARBOCAGE, vers la neutralité carbone des territoires
- [14] **Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021.** Qu'est-ce que le Label bas-carbone ?
- [15] **Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2021.** Label bas-carbone : récompenser les acteurs de la lutte contre le changement climatique
- [16] **Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture, Ministère de la Transition Ecologique, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, PUR Projet, Afac-Agroforesteries, INRAE, IDELE, Agrooof, CIRAD, 2021.** Méthode haies. Version du 08/06/2021
- [17] **CNPF, 2019.** Label Bas Carbone - Méthode boisement. Version du 18/04/2019, 35p
- [18] **Carbonapp, 2021.** Liste des nouvelles méthodes certifiées par le Label Bas Carbone : [carbonapp.fr/post/liste-des-methodes-certifiees-par-le-label-bas-carbone](https://carbonapp.fr/post/liste-des-methodes-certifiees-par-le-label-bas-carbone)
- [19] **Arrouay, Balesdent, 2002.** Stocker du carbone dans les sols agricoles de France
- [20] **Agrosolutions, Compagnie des Amandes, 2020.** Label bas carbone – Méthode plantation de vergers. Version 23 octobre 2020. 52p
- [21] **FAO, 2020.** Qu'est-ce que la séquestration du carbone dans le sol
- [22] **Brandle et al., 1988.** "Windbreaks technology", Elsevier Science
- [23] **Osorio et al., 2019.** GIS approach to estimate windbreak crop yield effects in Kansas–Nebraska, *Agroforestry Systems*, 93, 1567
- [24] **Cleug, 1998.** Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields", *Agroforestry Systems*, 41, 55
- [25] **ITAVI (2021).** Protocole EBENE, guide pour les utilisateurs. Mise en application d'une méthode pratique et partagée d'évaluation du bien-être animal dans les filières avicole et cunicole. 36p





# ANNEXE 3 : PRESENTATION DE L'INDICE DE BIODIVERSITE POTENTIELLE

**Pictogrammes :** groupes d'espèces affectés par le facteur (non exhaustif), voir bas de page.

**D** Une structure verticale de la végétation complexe

Chaque strate présente des caractéristiques propres. Par exemple, alors que les strates herbacée et arbustive peuvent être riches en fleurs et constituer une production nette de producteurs primaires, la strate arborescente offre des perchoirs diversifiés et bénéficie d'un fort ensoleillement. Ainsi, chacune fournit des habitats particuliers (ressources alimentaires, abris...) propices à l'accueil d'espèces aux exigences différentes.

**Exemple :** Des oiseaux nichent préférentiellement sur certains dans des strates différentes : corneille rouge, dans les houppes des arbres (16), mésange, dans les ardoises (20), Campagnol terrestre, au sol (18). Les champignons sont les plus abondants des champignons (19) et les insectes ont la réputation d'être grands visiteurs.

**E** La présence de très gros arbres

Les arbres de gros diamètre, très souvent également très vieux, présentent des caractéristiques cruciales pour de nombreuses espèces. Ils appuient entre autres des dendromicrohabitats tels (voir encart F) fréquents et variés, de gros troncs constituent des plates-formes pour la faune, des supports (écorces, racines...) présents et de grande dimension.

**Exemple :** La Cigogne noire fabrique son nid sur de gros troncs (15), le faucon Chrysaëtre caucasiensis s'installe sur les troncs fissurés de gros arbres (12). Le Chat forestier s'abrite dans de grandes cavités (17). Les félins, comme le félin de montagne et le félin d'Europe, se nourrissent d'espèces.

**G** Des milieux ouverts, non ouverts/moqués

Dans une forêt naturelle, des ouvertures éphémères ou pérennes viennent ponctuer la matrice forestière. Dans ces milieux (trouces, lièges...), les conditions sont différentes de celles ordinaires à l'intérieur du peuplement : fleurs plus nombreuses, variations de température et de luminosité plus fortes, etc. La présence de milieux ouverts dans une forêt permet de diversifier les ressources et de répondre à des besoins spécifiques de nombreuses espèces.

**Exemple :** La tubicole enlève, mouche verte, fait ses nids dans les milieux ouverts (16), l'épave se fixe sur la lanière pour s'installer (21). Le faucon de seiche y recroqueville de la tige (18). Les papillons comme les monarques, le papillon de nuit (19) et le papillon de nuit (19) y trouvent des ressources.

**I-J** Des milieux aquatiques et rochers diversifiés

Il est fréquent de rencontrer en forêt des rivières, mares, boîtes à eau ou encore des blocs rocheux, falaises, escarpements. Comme les milieux ouverts, ces espaces constituent des habitats favorables pour des espèces spécialistes que pour des espèces forestières recherchant des caractéristiques particulières à un moment de leur cycle de vie.

**Exemple :** La chaussonneau bleu de Danemark chasse au-dessus des cascades (22), le héron d'ardoise s'installe dans les marais de boisiers ou marais (23). L'épave se reproduit dans les eaux courantes (24). L'épave se reproduit dans les marais (23) et les rivières (24).

**A** Des essences autochtones diversifiées

Les animaux, végétaux et champignons présents en forêt dépendent beaucoup des caractéristiques des arbres. De nombreuses espèces sont observées conjointement en présence d'essences spécifiques. Plus il y a d'essences forestières différentes dans une forêt, plus elle est susceptible d'accueillir la diversité d'espèces propre à chacune, en plus des espèces plus généralistes.

**C-D** Des gros bois morts abondants et diversifiés

Plus de 25% des espèces forestières dépendent du bois mort ou déclinant à un moment de leur vie. Certaines l'utilisent comme abri, d'autres comme source de nourriture, d'autres encore y résident. Une grande diversité de types de bois morts (essence, dimension, stade de décomposition, position) est nécessaire pour accueillir une diversité d'espèces associées, chacune ayant souvent des exigences bien spécifiques.

**F** Des dendromicrohabitats nombreux et variés

Les dendromicrohabitats désignent les singularités morphologiques des arbres telles que les tentes et les cavités. Ils constituent des lieux indispensables de refuge, de reproduction, d'hibernation et de nutrition pour de très nombreuses espèces. Chaque type de dendromicrohabitat accueille des espèces spécifiques. Plus ils sont variés et nombreux dans un peuplement, plus les chances d'accueillir une diversité d'espèces sont grandes.

**H** Une continuité temporelle de l'état boisé

L'histoire de la forêt a une influence sur la biodiversité présente : les forêts installées sur d'anciennes terres agricoles ne comprennent pas les mêmes espèces que des forêts boisées depuis plusieurs siècles. En plus de cartes anciennes, des indices sur le terrain peuvent révéler une longue continuité (anciennes bornes forestières) ou inversement une discontinuité forestière (anciennes terres agricoles).

Flora

Oiseaux

Mammifères carnivores

Reptiles

Amphibiens

Poissons

Insectes

Champignons mycorhiziens

Lichens