

LES SYNTHÈSES TECHNIQUES DE L'OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU

**Agroforesterie et ressources
en eau : les pratiques
anciennes en réponse aux
problématiques modernes**

Hélène LAMBERT

janvier 2015



*Office
International
de l'Eau*

En partenariat avec des organismes d'enseignement supérieur, l'OIEau propose des états de l'art synthétiques sur différents sujets liés à l'eau. Ces synthèses sont rédigées par des élèves dans le cadre de leur cursus de formation.

Cette synthèse documentaire « **Agroforesterie et ressources en eau : les pratiques anciennes en réponse aux problématiques modernes** » a été effectuée par **Hélène Lambert**, élève post-master (bac+6/7) d'AgroParisTech-ENGREF en voie d'approfondissement et mastère spécialisé « Gestion de l'eau » à Montpellier.

Le contenu de ce document n'engage la responsabilité que de son auteur, il ne reflète pas nécessairement les opinions ou la politique de l'OIEau.

Toute utilisation, diffusion, citation ou reproduction, en totalité ou en partie, de ce document ne peut se faire sans la mention expresse du rédacteur, de l'Etablissement d'origine et de l'OIEau.

SYNTHESE TECHNIQUE

AGROFORESTERIE ET RESSOURCES EN EAU : Les pratiques anciennes en réponse aux problématiques modernes

Hélène LAMBERT
h.lambert@agroparistech.fr

janvier 2015

RESUME

En France, la principale cause d'abandon de captages est la dégradation de la qualité de l'eau, consécutive aux pollutions diffuses d'origine agricole. En cause, les pratiques agricoles intensives qui, pour satisfaire des besoins de production croissants, ont transformé les usages et les paysages. L'agroforesterie fait partie des pratiques modernes mises en avant pour reconquérir une ressource qui ponctuellement peut se faire rare. Il s'agit de l'association, sur une même parcelle, d'une production agricole (qu'elle soit culture ou élevage) et d'une production forestière. Dans cet environnement, les arbres et les cultures entrent en compétition pour l'eau et les nutriments. Les arbres agroforestiers ont alors tendance à développer un système racinaire plus profond que ceux des arbres forestiers, leur permettant de capter l'eau et les nutriments inaccessibles aux racines des cultures. Ces racines jouent également un rôle de « filet de sécurité » en captant les fuites des intrants agricoles. Pour peu que les parcelles agroforestières aient été conçues avec attention, l'agroforesterie s'avère plus productive qu'une séparation des productions agricoles et forestières ; financièrement, les pertes de rendement des cultures pendant la croissance des arbres sont compensées par la vente des arbres à maturité. S'agissant d'un cycle sur plusieurs décennies, afin d'inciter la réintroduction de l'arbre dans les cultures, il apparaît nécessaire d'accompagner financièrement les agriculteurs désireux d'adopter cette pratique. Un état des lieux de l'agroforesterie en France et dans le monde nous permettra de nous intéresser aux politiques de soutien à l'agroforesterie.

Mots clés : agroforesterie – ressources en eau – cultures intercalaires – pompe à nutriments – compétition entre les arbres et les cultures – filet de sécurité – racines profondes – lessivage des nitrates

ABSTRACT

In France, withdrawal of water collection zones occurs in one case out of five because of no point source water pollution from agricultural activities. This is a consequence of decades of intensive cultures which have deeply affected agricultural practices and landscapes. To reverse the trend, research programs are interested in ancient cultural practices, which supposedly lower the need for inputs. Among these practices, agroforestry is expected to bring significant improvements of water quality. Agroforestry refers to the combination of both an agricultural (either crops or pastoralism) and a wood production on the same field. Combining trees and crops induces a competition for water and nutrients which trees overcome by growing deep roots allowing them to extract resources from the deeper soil. This root system therefore serves as a safety net which intercepts nitrates leaching resulting of the application of fertilizers on crop fields. Assuming that the plot has been carefully designed, a tree-crop combination reveals to be more productive than a separate crops and trees production. The financial loss following crop yield decreases as trees are growing is eventually balanced by the income resulting from the disposal of wood production. Financial support would be helpful to compensate the temporary loss of income and motivate farmers and land owners to adopt this long-cycle scheme. This paper will conclude by having a look on agroforestry systems in France and worldwide, trying to understand what kind of measures are taken to promote agroforestry.

Key words : agroforestry – water resources – alley cropping – nutrient pump – nitrates – pesticides – tree and crop competition – safety net – deep roots system – nitrates leachings

SOMMAIRE

RESUME.....	2
ABSTRACT	2
LISTE DES FIGURES	4
INTRODUCTION.....	5
QUELS SONT LES IMPACTS DE L'AGROFORESTERIE SUR LA RESSOURCE EN EAU ?	6
IMPACTS SUR LE BILAN HYDRIQUE	7
Effet de pompage des racines : impact sur le niveau de la nappe.....	7
Limitation de l'évapotranspiration	8
IMPACTS SUR LA QUALITE DE L'EAU.....	8
Pompe à nutriments	9
Limitation des intrants.....	9
Filet de sécurité racinaire	9
QUELLES SONT LES CONTRAINTES DU MODELE AGROFORESTIER DE CULTURES INTERCALEES SUR LA CONDUITE D'UNE EXPLOITATION AGRICOLE ?.....	10
IMPACTS « TECHNIQUES » : CHOIX DES TYPES DE CULTURES, CHOIX DE L'IMPLANTATION	10
Choix des espèces à associer.....	10
Implantation de la parcelle.....	10
Entretien des arbres	11
IMPACTS FINANCIERS	12
Rendements agricoles.....	12
Rendements sylvicoles	13
Rendement total de la parcelle.....	13
COMMENT L'AGROFORESTERIE SE DEVELOPPE-T-ELLE EN FRANCE ET DANS LE MONDE ?.....	15
ETAT DES LIEUX DE L'AGROFORESTERIE EN FRANCE	15
Les surfaces agroforestières en France	15
Le difficile soutien à l'agroforesterie en France	15
EN EUROPE ET DANS LE MONDE	16
CONCLUSION	18
ANNEXE	19
BIBLIOGRAPHIE.....	20

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Abandons de captages liés à la présence de nitrates et/ou de pesticides dans la ressource (Secrétariat d'Etat chargé de la santé, 2012).....	5
Figure 2: Classification des systèmes agroforestiers selon le type de composants (Nair, 1993).....	6
Figure 3 : Mode d'enracinement observé de peupliers agroforestiers et forestiers sur la parcelle de Vézénobres (Gard). L'enracinement profond des peupliers est dû à la compétition des cultures de céréales d'hiver (Liagre, 2008)	7
Figure 4: Intérêts (à gauche) et contraintes (à droite) des systèmes agroforestiers modernes en couloir. Adapté de C. Dupraz (INRA) (Hamon, 2007)	12
Figure 5: Croissance des arbres sur une parcelle agroforestière du domaine de Restinclières (Hérault) (PIRAT, 2007).....	13
Figure 6: Comparaison relative de 3 scénarios agriculture, boisement et agroforesterie (agriculture = base 100) (Dupraz et al., 2011).....	14

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : récapitulatif des principaux paramètres à prendre en compte pour l'établissement d'une parcelle agroforestière	19
--	----

INTRODUCTION

En France et dans le monde, la qualité de l'eau est sujette à de plus en plus d'inquiétudes. Dans les pays tempérés, l'eau a longtemps été perçue comme une ressource inépuisable et inaltérable, dont la pureté semblait une qualité intrinsèque. En quelques décennies, l'industrialisation, l'agriculture intensive puis les prémices d'un changement climatique ont mis à mal ce capital précieux. Il aura fallu quelques catastrophes écologiques et sanitaires pour que s'amorce une prise de conscience de la nécessité de préserver notre patrimoine.

En 2012, le ministère français de la santé s'est intéressé à la protection des captages pour la production d'eaux potables. Environ 400 captages sont abandonnés chaque année. Dans 41% des cas, la qualité de l'eau est la cause de l'abandon. Dans 19% des cas, l'abandon est dû à des quantités élevées de nitrates et pesticides d'origine agricole, à des seuils interdisant la potabilisation de l'eau (Secrétariat d'Etat chargé de la santé, 2012). La France disposant d'importantes ressources en eau, de nouveaux captages viennent facilement compenser les abandons. Il reste que les coûts directs et indirects de la pollution sont colossaux : selon le Commissariat Général au Développement Durable, entre 1,1 et 2,4 milliards d'Euros par an pourraient être économisés avec des mesures de protection contre les pollutions diffuses d'origine agricole (Commissariat Général au Développement Durable, 2012). L'édition 2014 du rapport sur l'environnement en France pointe une stagnation de la teneur en nitrates dans les eaux, en soulignant leur provenance majoritairement agricole (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2014).

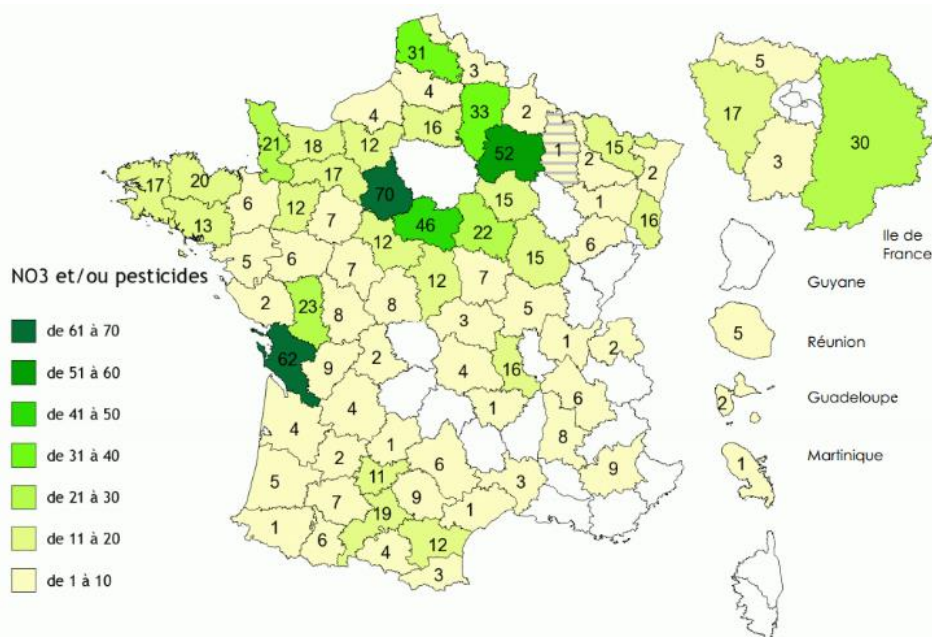


Figure 1: Abandons de captages liés à la présence de nitrates et/ou de pesticides dans la ressource (Secrétariat d'Etat chargé de la santé, 2012)

Comment, de manière rapide, efficace et durable, peut-on résorber ces pollutions ? Reboiser les terres dans les zones vulnérables est une solution efficace : en l'absence d'intrants, un couvert forestier permet de diminuer la pollution des eaux de manière drastique (Dupraz et al., 2011). Mais il est bien sûr inconcevable de stopper toute activité agricole. La conversion de toutes les activités agricoles situées sur les zones de captage en agriculture biologique, pratiquée à Munich par exemple, a permis à cette ville d'assurer une qualité irréprochable de l'eau destinée à la consommation humaine (Lavabre et Andréassian, 2000 ; Dupraz et al., 2011). Et si mixer arbres et cultures permettait une production agricole avec un rendement acceptable, tout en réduisant les impacts sur l'eau ? C'est ce point de vue que défendent les promoteurs de l'agroforesterie.

L'agroforesterie est une pratique qui consiste à associer sur un même espace une production agricole et une production sylvicole. Il s'agit, en fait, de réintroduire l'arbre dans le paysage agricole dont il n'a été chassé que récemment, suite aux remembrements et à la mécanisation du métier. A partir de ce concept, les variantes sont aussi nombreuses que l'imagination le permet, des plus simples (plantations d'arbres en bordures de parcelles, alternance des cultures - on cultive des plants, puis des arbres, ou l'inverse) aux plus complexes (l'agro-sylvo-pastoralisme, qui a l'ambition de faire cohabiter sur un même espace les arbres, les cultures et le bétail).

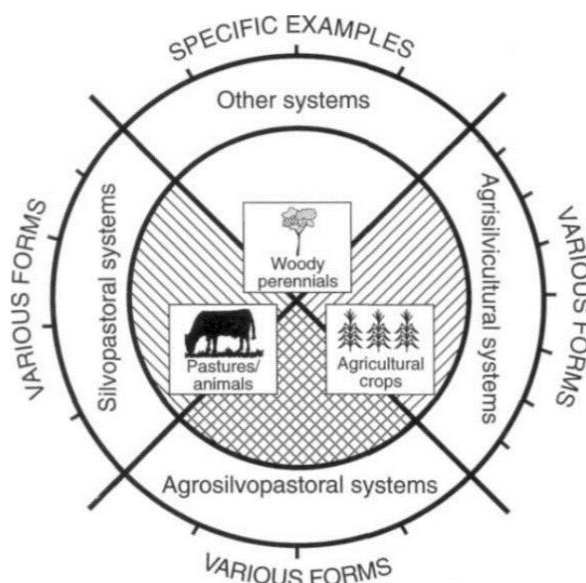


Figure 2: Classification des systèmes agroforestiers selon le type de composants (Nair, 1993)

Le schéma dominant est celui de la culture intercalée, où des lignes d'arbres sont utilisées en délimitation de corridors de grandes cultures. Ce type d'implantation a l'avantage de s'adapter facilement au travail agricole mécanisé, ce qui rend cette pratique plus facilement acceptable pour les agriculteurs. C'est sur ce type d'implantation que cette synthèse est orientée.

Dans une première partie, nous étudierons les services rendus par l'agroforesterie vis-à-vis de la protection de la ressource en eau. Dans la seconde partie, nous évoquerons les conséquences d'une conversion à l'agroforesterie pour les agriculteurs. Enfin, nous balayerons l'état des pratiques, en France et dans le monde.

QUELS SONT LES IMPACTS DE L'AGROFORESTERIE SUR LA RESSOURCE EN EAU ?

Chassé des champs par le remembrement, le retour de l'arbre en milieu agricole semble aujourd'hui incongru, voire contre-nature. L'idée persiste que l'arbre se trouvera forcément en compétition avec les cultures, puisqu'ayant besoin des mêmes ressources (eau, lumière et matières nutritives). Pourtant, les grandes capacités épuratoires des arbres en font des atouts précieux pour la protection de la ressource. Quelle est l'efficacité des systèmes agroforestiers sur la protection de la ressource en eau ?

IMPACTS SUR LE BILAN HYDRIQUE

Effet de pompage des racines : impact sur le niveau de la nappe

Une des réticences les plus fortes des agriculteurs vis-à-vis de la présence d'arbres à proximité de leurs champs provient d'une crainte de l'accaparement des ressources (eau, lumière et nutriments) par les arbres au détriment des cultures (Pointereau et Bazile, 1995).

Effectivement, dans un milieu où les ressources seraient rares (milieux arides et appauvris, sans apports extérieurs de nutriments), la compétition pour la ressource serait inévitable, et une telle association ne profiterait ni aux arbres ni aux cultures. Au contraire, si la ressource n'est pas limitante, la cohabitation est tout-à-fait possible (Dupraz et Liagre, 2008).

L'impact des systèmes agroforestiers sur la disponibilité de la ressource en eau a fait l'objet d'études pour comparer le niveau des nappes au droit de parcelles agricoles, forestières et agroforestières dans des conditions similaires. Les résultats montrent un assèchement plus profond de la nappe en milieu agroforestier en fin de période sèche (Liagre, 2008). Les arbres contribuent donc à assécher plus fortement le terrain en allant puiser l'eau en profondeur. L'étude du système racinaire a montré que les racines des arbres en contexte agroforestier s'installent plus profondément que celles des arbres forestiers. La plasticité des racines des arbres, capables de s'adapter aux conditions de cultures, est ainsi mise en avant (Dupraz et Liagre, 2008).

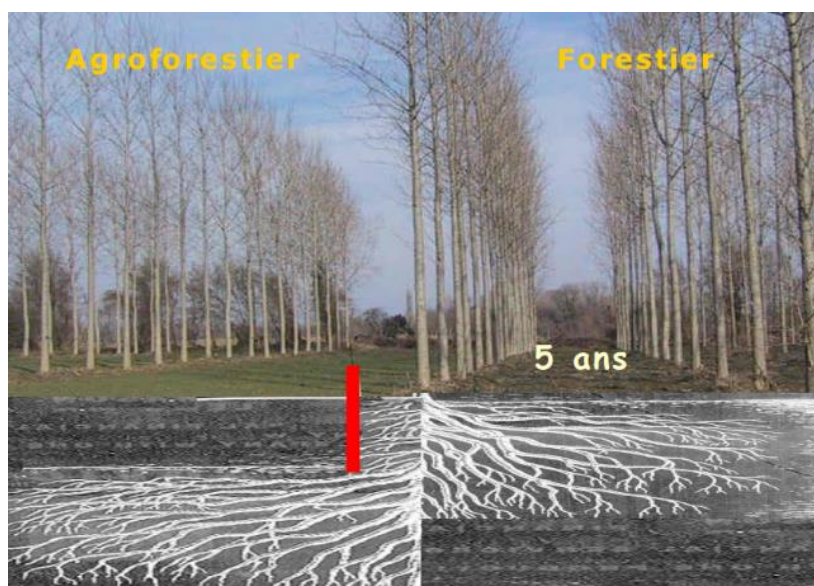


Figure 3 : Mode d'enracinement observé de peupliers agroforestiers et forestiers sur la parcelle de Vézénobres (Gard).
L'enracinement profond des peupliers est dû à la compétition des cultures de céréales d'hiver
(Liagre, 2008)

Les meilleurs enracinements s'obtiendront avec l'association d'une culture d'hiver (type blé) avec des arbres à croissance tardive. Les cultures s'installeront de manière précoce et développeront leur système racinaire avant que les arbres ne démarrent leur période de croissance. Une fois la terre colonisée et asséchée en surface par les racines des cultures, les arbres n'auront plus d'autre choix que de développer des racines dans les couches inférieures du substrat afin d'aller puiser la nappe en profondeur.

Ce phénomène est décrit dans la littérature comme un « ascenseur hydraulique » : l'eau que les arbres vont chercher dans les nappes profondes remonte dans les racines pendant la nuit, et est ainsi rendue disponible pour les racines superficielles le jour (Caldwell et Richards, 1989; Dawson, 1993; Ong et Swallow, 2003; Bleby et al., 2010).

Si les arbres ont tendance à abaisser la nappe pendant la saison sèche, cela devient un bénéfice pendant la saison humide. Le terrain asséché présentera une capacité de rétention plus élevée juste avant les épisodes pluvieux. Par conséquent, la recharge de la nappe sera plus efficace. Le ruissellement s'en trouvera également limité, l'infiltration étant d'autant plus efficace que des bandes enherbées auront été conservées au pied des arbres.

A contrario, on ne recommandera pas d'implanter des arbres sur des parcelles fortement irriguées. En effet, produire des racines profondes demande beaucoup plus d'énergie aux arbres que les racines superficielles. Sur un terrain gorgé d'eau, l'arbre ira donc à la facilité : la présence d'eau abondante et facile d'accès le poussera à développer des racines même sur un terrain colonisé par les cultures, entrant en compétition avec elles. Les racines restant superficielles, l'arbre sera par ailleurs moins bien implanté, le rendant vulnérable en cas de tempête, ou de sécheresse prolongée.

Limitation de l'évapotranspiration

Un autre effet positif de l'agroforesterie est la limitation des pertes d'eau par évapotranspiration des cultures. La présence du couvert forestier induit effectivement un abaissement des températures au sol et donc une diminution des besoins en eau des cultures (Dupraz et Liagre, 2008; Dupraz et al., 2011).

Toutefois, l'agroforesterie en milieu tempéré privilégie une densité de plantation des arbres plutôt faibles (100, voire 50 arbres par hectare) ainsi qu'un élagage des branches basses pour faciliter le passage des machines. Malgré ces contraintes, l'impact sur l'évapotranspiration des cultures est pourtant loin d'être négligeable, représentant une réduction de la demande en eau des cultures de l'ordre de 30% en plantation d'arbres peu dense (Dupraz et Liagre, 2008).

Au final, les systèmes agroforestiers induisent une meilleure exploitation de la nappe, en créant un microclimat plus doux, en limitant l'évapotranspiration, et en augmentant les capacités de recharge de la nappe. La ressource en eau est ainsi mieux exploitée, au profit des arbres et des cultures. On peut toutefois s'interroger sur les impacts sur les cours d'eaux avoisinants, dont les débits d'étiage peuvent potentiellement s'aggraver dans le cas d'une conversion agriculture vers agroforesterie. Peu d'études se sont penchées sur ce problème, qui nécessiterait des années de recherche complémentaires.

IMPACTS SUR LA QUALITE DE L'EAU

La communauté scientifique et les pouvoirs publics fondent de grands espoirs sur la capacité épuratoire des arbres pour protéger les eaux de captage et améliorer l'état des masses d'eaux. Cette capacité serait un argument pour la conversion des parcelles agricoles vers l'agroforesterie, puisqu'elle permettrait de maintenir une activité agricole tout en réduisant fortement les impacts sur l'environnement. Les principaux impacts attendus sont la réduction des nitrates et des pesticides, majoritairement responsables des pollutions diffuses d'origine agricole.

S'il existe de nombreuses études sur les relations entre les arbres (en situation champêtre ou non) et la teneur en nitrates dans le sol (Palma et al., 2007), l'impact sur la qualité de l'eau, en revanche, est un thème moins exploré. Une récente étude de l'INRA a cependant mis en évidence un probable impact positif de l'arbre agroforestier sur la teneur en nitrates dans l'eau (Dupraz et al., 2011).

Plusieurs mécanismes peuvent être à l'œuvre dans l'obtention de ces résultats.

Pompe à nutriments

On a vu que les arbres, au milieu des cultures, étaient conduits à tracer de longues racines profondes afin de capter l'eau sans avoir à la disputer aux cultures. De la même manière, ces racines vont pouvoir capter les nutriments dans le sol, dans les couches inaccessibles aux cultures. Les nitrates, transformés en composés azotés, sont assimilés par les arbres. Les arbres limitent ainsi les risques de lessivage des nitrates vers les cours d'eau et les nappes. L'azote ainsi exploité réintègrera les couches superficielles du sol, grâce aux litières aériennes et racinaires constituées par la dégradation, en surface des feuilles tombées au sol, et sous terre par la dégradation des racines du chevelu des arbres.

Limitation des intrants

Les racines profondes puisent les nutriments dans des sources autrement inexploitées, et favorisent l'aération des sols. Les litières aérienne et racinaire améliorent la fertilité des sols par la production d'un humus de bonne qualité. Les bandes arborées ne subissant en général ni traitement (fertilisant ou phytosanitaire), ni travail profond de labour, c'est toute une activité microbienne qui se réinstalle au profit des arbres et des cultures adjacentes.

Lefroy et Stirzaker ont observé que le rendement agricole, s'il chute à proximité immédiate des lignes d'arbres, est égal voire supérieur au témoin agricole à partir de 6 mètres des lignes d'arbres, jusqu'à stabilisation au niveau du témoin (Lefroy et Stirzaker, 1999). L'arbre contribue donc d'une certaine manière à contrecarrer l'épuisement des sols induit par les activités agricoles continues.

Le même bénéfice peut éventuellement conduire à la réduction des besoins en produits phytosanitaires. Les bandes enherbées au pied des arbres servant de refuge à une faune diversifiée qui, si elle peut héberger certains ravageurs des cultures, attire en général également leurs prédateurs. L'arbre redevient le refuge de toute une biodiversité qui avait peu à peu déserté les paysages agricoles.

Filet de sécurité racinaire

L'une des grandes hypothèses communément reprises en agroforesterie est la théorie du filet de sécurité racinaire. Cette théorie suppose que les racines des arbres, présentes sous les cultures, captent les fertilisants et phytosanitaires déversés en grande quantité sur les cultures. En effet, une partie seulement de ces produits est mise à profit par les cultures, le reste étant généralement lessivé par les pluies. De nombreuses études ont été menées en ce sens, et montrent effectivement que, si les lignes d'arbres ne sont pas trop éloignées, les racines des arbres vont pouvoir constituer un filet de sécurité très efficace qui va capter les nutriments apportés aux cultures (Allen et al., 2004 ; Dupraz et al., 2011). Le filet est d'ailleurs d'autant plus efficace que le risque de lessivage par les pluies est important (Dougherty et al., 2009).

Comparée à l'agriculture conventionnelle, l'agroforesterie semble bien avoir un effet bénéfique sur la qualité de la ressource en eau. Le bureau d'études Agroof Développement a comparé différentes solutions de réduction des pollutions azotées, (traitement de l'eau, agroforesterie, foresterie, agriculture biologique). De toutes les alternatives étudiées, l'agroforesterie est la plus efficace d'un point de vue technico-économique, chaque euro investi en rapportant 29 en réduction du traitement des pollutions (Dupraz et al., 2011). L'effet sur les pesticides, en revanche, n'a pas encore fait l'objet d'études approfondies.

L'agroforesterie se montre donc efficace pour contrer les pollutions diffuses d'origine agricole. Il reste que rien ne peut se faire sans la volonté de l'exploitant. La deuxième partie de ce document nous servira à examiner les impacts de l'agroforesterie sur la conduite d'une exploitation.

QUELLES SONT LES CONTRAINTES DU MODELE AGROFORESTIER DE CULTURES INTERCALEES SUR LA CONDUITE D'UNE EXPLOITATION AGRICOLE ?

IMPACTS « TECHNIQUES » : CHOIX DES TYPES DE CULTURES, CHOIX DE L'IMPLANTATION

Si par le passé l'arbre était naturellement présent au sein des cultures, la réintroduction de l'arbre en milieu agricole nécessite aujourd'hui quelques précautions. L'agriculture moderne a bouleversé les paysages mais aussi les pratiques, dans le but de faciliter le travail de l'exploitant. Un retour calqué sur les pratiques ancestrales ne serait ni possible ni souhaitable. L'agroforesterie, en s'adaptant au monde moderne, se doit d'être la moins contraignante possible. Mais l'exploitant se doit aussi d'adopter de nouveaux réflexes.

Choix des espèces à associer

La réussite d'une plantation agroforestière repose essentiellement sur trois critères : le choix de l'essence ; le choix d'une implantation ; le soin apporté aux arbres pendant leur croissance. Le type de cultures que l'exploitant souhaite développer (ou conserver) sur le terrain ne sera pas critique, à l'exception des cultures fortement irriguées.

Pour ce qui est des arbres, la décision de planter telle ou telle essence doit se décider à la parcelle, en fonction du climat, de la nature du sol et de la proximité plus ou moins immédiate de la nappe. Quelles que soit les essences et les conditions de culture, si l'on s'évertue à planter un arbre dans des conditions qui ne lui conviennent pas, le résultat ne pourra être que médiocre. L'agriculteur qui souhaite se lancer aura donc tout intérêt à se rapprocher d'un technicien forestier pour le conseiller sur les essences adaptées aux conditions locales, ainsi que celles qui auront le plus de valeur marchande. Les choix peuvent se porter sur des fruitiers, qui auront le double avantage de produire des fruits assez rapidement en attendant la coupe de l'arbre, et de fournir un bois d'ornement recherché (arbres « double-fin »).

Il est bien sûr possible d'associer différents types d'arbres afin d'échelonner les prélèvements, mais aussi de limiter la transmission d'éventuels parasites ou maladies.

Concernant la nature des cultures intercalaires, comme vu précédemment, la préférence ira aux cultures d'hiver, qui auront le temps de développer un système racinaire avant que les arbres ne reprennent leur période de croissance. Sauf exception, les cultures irriguées sont à éviter : la fragilité des arbres irrigués peut s'avérer désastreuse pour la survie de l'exploitation si les arbres disparaissent avant d'avoir pu être récoltés.

Dans les zones tropicales, le choix se porte souvent sur des arbres fixateurs d'azote (qui ont la capacité de capter l'azote de l'air) dans le but d'améliorer le rendement en apports azotés ; cependant les espèces d'arbres fixatrices d'azotes sont plutôt rares en climat tempéré, et ont de plus un intérêt limité pour la production de bois. Il est par contre possible de cultiver des légumineuses herbacées (fixatrices d'azote) en culture intercalaire.

Implantation de la parcelle

L'arbre a disparu des cultures du fait de la mécanisation, afin de faciliter le travail de la terre et augmenter la productivité humaine. On peut légitimement se poser la question de l'impact que va générer le retour de l'arbre dans un contexte fortement mécanisé.

Sur des parcelles sur lesquelles on va introduire l'agroforesterie, partant d'une feuille blanche, l'exploitant aura le loisir de configurer la position des arbres en fonction de son matériel et de la facilité avec laquelle il va évoluer autour des arbres.

C'est pourquoi la majorité des parcelles associant arbres et grandes cultures sont implantées en alignement d'arbres, de manière à permettre le passage des machines entre les lignes d'arbre. Ces lignes peuvent ne pas être strictement droites de façon à rompre la monotonie et le côté quelque peu artificiel du paysage planté.

Les paramètres importants à définir sont l'orientation des lignes d'arbres et la distance entre les lignes. L'orientation des lignes d'arbres est importante pour assurer aux cultures un apport de lumière suffisant pour assurer leur croissance. Quand elle est possible, une implantation Nord-Sud des lignes d'arbres est préférable, car elle assurera davantage de lumière aux cultures intercalaires. Cependant, sur des terrains présentant du relief, les lignes d'arbres seront plutôt disposées en courbes de niveau, de façon à limiter l'érosion due au ruissellement.

La distance entre les lignes sera du choix de l'exploitant, en multiple de la largeur de ses équipements, et en gardant une marge plus ou moins réduite autour des lignes d'arbres. Plus la marge sera faible, plus la surface cultivée sera importante, mais plus la conduite des machines demandera de précautions pour éviter de blesser les arbres au risque d'annuler leur valeur marchande. Il faut également garder à l'esprit que les largeurs cultivées vont décroître à mesure que l'arbre prend de l'ampleur, de manière à conserver un rendement agricole correct. Dans cette optique, les travaux de l'INRA préconisent une implantation peu dense (100, voire 50 arbres par hectare) (Dupraz et Liagre, 2008).

Entretien des arbres

Une fois les arbres plantés, il faut les entretenir. Deux raisons à cela : maximiser le revenu de la production du bois (ou la plus-value foncière, si l'exploitant envisage de revendre ses terres) ; faciliter la production agricole, en limitant l'ombrage et en facilitant le passage des machines.

Afin de tirer avantage de la production forestière, le bois produit doit avoir le maximum de valeur. Outre la qualité intrinsèque de l'essence concernée, il existe différentes qualités de bois, en fonction de l'utilisation qui va pouvoir en être faite : tranchage (bois d'ornement, placage), sciage (1^{re} et 2^e qualité), bois industriel ou de chauffage.

Plus la grume de l'arbre est longue et régulière, plus la valeur du bois sera élevée. C'est pourquoi l'agriculteur devra élaguer régulièrement les arbres afin de favoriser le développement du tronc.

L'élagage va également dans le sens de la facilitation d'exploitation : les branches basses étant éliminées, le travail des machines en sera d'autant facilité. De plus, les cultures bénéficieront d'un meilleur ensoleillement grâce à l'éclaircie du houppier. En général, les arbres sont élagués jusqu'à 6 mètres de hauteur.

Ces pratiques ne sont pas dans les habitudes des exploitants agricoles ; il faut pourtant s'y tenir si on souhaite produire un bois de qualité. Ceci étant, l'arbre en milieu agricole nécessitera moins d'entretien qu'en milieu forestier.

En effet, l'arbre poussant de manière relativement isolée, il aura tendance à développer un tronc plus droit et régulier ; les éclaircissements seront réduits, voire éliminés, puisqu'on a prévu à la plantation un nombre réduit d'individus. Enfin, l'espace dont on dispose autour de l'arbre facilitera l'accès, et les travaux d'entretien en seront facilités.

Les coupes d'élagage profiteront aux cultures sous forme de litière, réintégrant dans le sol l'azote contenu dans le bois de l'arbre.

De plus, l'exploitant étant nécessairement tous les jours dans ses champs, il pourra détecter beaucoup plus rapidement les maladies, les tailles à effectuer ... qu'un exploitant forestier qui visite sa parcelle beaucoup plus occasionnellement. Le surcroît de travail occasionné est estimé à 20 heures de travail par hectare et par an, voire moins (PIRAT, 2007).

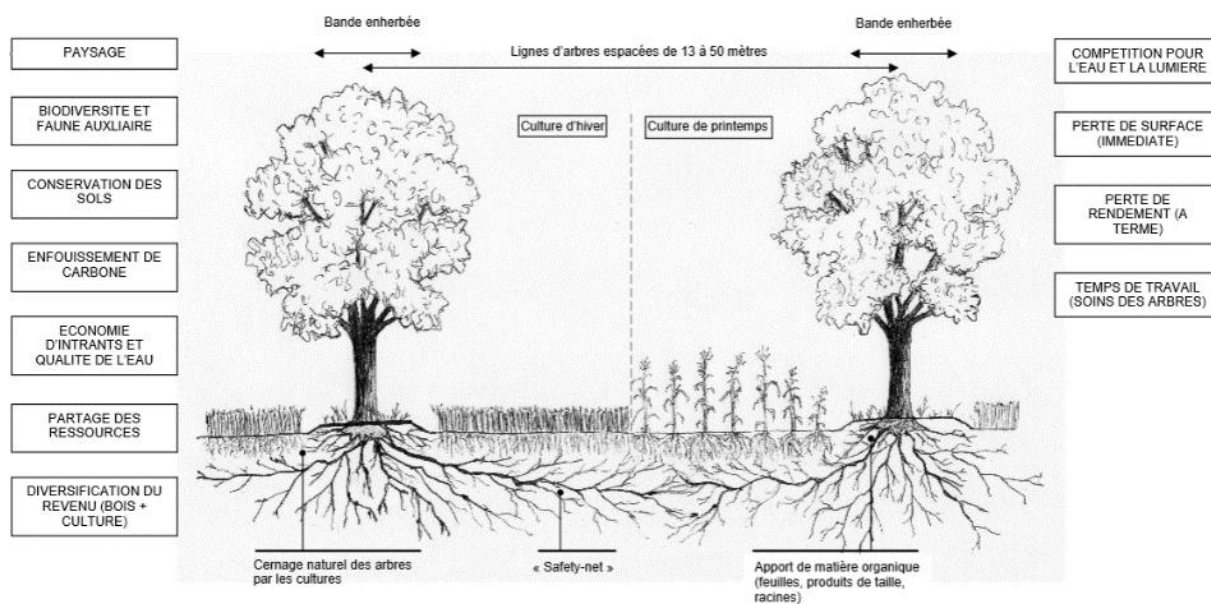


Figure 4: Intérêts (à gauche) et contraintes (à droite) des systèmes agroforestiers modernes en couloir.
Adapté de C. Dupraz (INRA) (Hamon, 2007)

IMPACTS FINANCIERS

La première préoccupation de l'agroforesterie est de s'assurer de la rentabilité financière de l'exploitation. Celle-ci dépend des deux sources de revenus apportés par l'exploitation : la production agricole d'une part, la production forestière d'autre part. Il convient d'observer la rentabilité financière au travers de ces deux prismes. Le cycle de croissance et de maturité des arbres s'étalant sur plusieurs décennies, les revenus d'une parcelle agroforestière peuvent être négatifs, jusqu'à la première coupe des arbres.

Rendements agricoles

Il faut tenir compte du fait que les lignes d'arbres diminuent la surface agricole exploitable pour la culture. Sur la surface restante, le rendement agricole sera dépendant de la configuration de la parcelle, telle que vue dans la première partie. Une parcelle bien dimensionnée, avec des arbres entretenus de manière à limiter l'ombrage sur les cultures, devrait permettre de conserver des rendements des cultures proches du témoin agricole, à l'exception de la ligne la plus proche des arbres, où le rendement agricole chute généralement. Une manière de limiter cette compétition consiste à cerner (c'est-à-dire couper) les racines jusqu'à un mètre de profondeur ; mais l'effet sera temporaire, et un cernage annuel serait contre-productif : la colonisation de la zone de surface finira par s'effectuer depuis les racines profondes ; de plus, amputer les racines risque de compromettre le bon développement des arbres.

On aura donc plutôt intérêt à réduire la largeur des lignes cultivées au fur et à mesure de la croissance des arbres, de manière à conserver un rendement agricole au-dessus du seuil de rentabilité. Il se peut même que la production agricole doive être abandonnée lors des dernières années du cycle des arbres, si la densité des arbres est trop importante (Dupraz et Liagre, 2008).

Rendements sylvicoles

La part arborée de la parcelle ne sera productive financièrement qu'au moment de la récolte des arbres, ce qui prendra généralement plusieurs décennies, selon l'essence concernée. C'est donc un investissement sur le long terme ; exception faite des cultures de fruitiers « double-fin » (voir la partie « Choix des espèces à associer »).

Les rendements apportés par les arbres en milieu agroforestier sont à comparer à une organisation forestière classique. L'environnement éclairci de l'agriculture bénéficie aux arbres de nombreuses manières.

Premièrement, du point de vue de l'investissement à la plantation. Les plantations agroforestières sont peu denses et nécessitent donc l'achat de moins de plants. L'éclaircissement sera moins sévère puisque le nombre de plants est déjà réduit. En milieu forestier, on plante beaucoup pour ne garder que les plus beaux spécimens (en moyenne un arbre sur 3). En agroforesterie, le taux d'éclaircissement est beaucoup plus faible : au maximum 2 arbres sont plantés pour en garder un, et l'élimination de la pousse la moins prometteuse a lieu dans les premières années après la plantation.

Enfin, l'arbre agroforestier pousse de manière plus régulière et plus rapide qu'en milieu forestier. Les arbres agroforestiers ont un tronc mieux développé, avec davantage de bois de cœur, donc ils sont mieux valorisables. On peut leur reprocher une structure moins fine que les arbres forestiers, du fait de la pousse plus rapide. Le prix d'achat sera donc légèrement plus faible, mais sera compensé par un volume de grume accru.

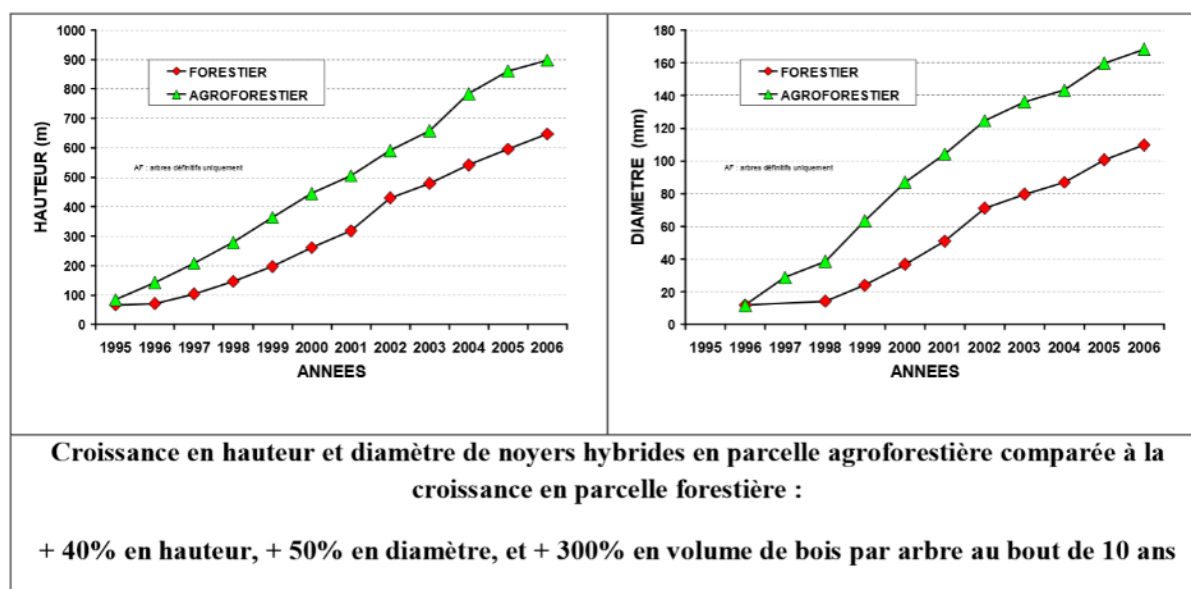


Figure 5: Croissance des arbres sur une parcelle agroforestière du domaine de Restinclières (Hérault) (PIRAT, 2007)

A la vente du tronc lui-même, on peut ajouter la production de taillis qui peuvent être valorisés sous forme de biomasse, ou être réincorporés aux cultures sous forme de paillage. Si l'exploitant agricole décide de revendre les taillis, cela fournira un revenu supplémentaire qui pourra se compter en tant que production vivrière.

Rendement total de la parcelle

Finalement, l'association sur une parcelle d'une production agricole et d'une production arborée a montré des avantages sur la protection de la ressource en eau, avec des contraintes somme toutes acceptables. Mais quel est le résultat en termes de productivité ? Pour le savoir,

il faut calculer la somme des rendements des deux productions. On introduit pour cela la notion de surface équivalente agroforestière (SEA) sur un exemple.

L'INRA possède sur le Domaine de Restinclières, dans l'Hérault, une exploitation expérimentale en agroforesterie depuis 1995. Des parcelles en culture pure et en plantation forestière pure permettent de comparer les rendements des différentes formations, dans des conditions similaires.

Sur les surfaces en agroforesterie, la surface utile à la production agricole étant amputée des surfaces occupées par les arbres, le rendement est inférieur au témoin agricole. Les rendements moyens estimés jusqu'à l'arrachage des arbres s'établissent à 60% du témoin agricole. De même pour la production de ligneux : le rendement comparatif au témoin agricole est d'autant plus faible que la densité de plantation est basse (130 arbres/ha à Restinclières). En revanche, les arbres poussent plus vite en agroforesterie, la récolte pourra donc être anticipée. La production agroforestière est estimée à 85% du témoin forestier.

Donc, un hectare d'agroforesterie fournit, en cultures et produits ligneux, autant que 0,6 hectare agricole + 0,85 hectare forestier. Autrement dit, une parcelle agroforestière d'un hectare produit autant que 1,45 hectare où les productions agricole et forestière seraient séparées (PIRAT, 2007). L'INRA constate en général des SEA de 1,3 à 1,6, soit une productivité globale accrue d'au moins 30% (Dupraz et al., 2005).

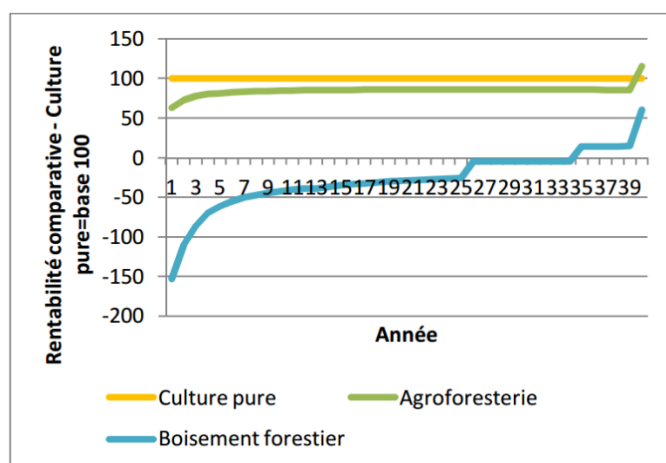


Figure 6: Comparaison relative de 3 scénarios agriculture, boisement et agroforesterie (agriculture = base 100)
(Dupraz et al., 2011)

Sur la durée de vie des arbres, l'agroforesterie, en plus de ses apports en services à l'environnement, est donc une pratique largement rentable pour l'exploitant – sur le long terme. A un horizon plus court, la baisse des revenus immédiate qu'implique la transition vers l'agroforesterie a de quoi freiner les bonnes volontés. Une politique d'incitations économiques apparaît comme nécessaire pour faire basculer les esprits.

COMMENT L'AGROFORESTERIE SE DEVELOPPE-T-ELLE EN FRANCE ET DANS LE MONDE ?

ETAT DES LIEUX DE L'AGROFORESTERIE EN FRANCE

Les surfaces agroforestières en France

Quelques exemples d'agroforesterie traditionnelle perdurent en France. C'est le cas par exemple des noyeraies dans le Dauphiné et le Périgord, qui associent des noyers double-fin à des cultures de blé dur alternées avec du colza. Il se trouve également de nombreuses truffières dans la Drôme, où les chênes sont contreplantés de vigne ou de lavandin (Dupraz et Liagre, 2008). En 2008, environ 170 000 ha exploités par 45 000 agriculteurs ont été recensés. Selon le même recensement, l'agroforesterie « moderne » couvre 2500 hectares, mis en place par 400 exploitants. On estime que 3000 hectares supplémentaires sont mis en place par année (Agroforesterie et Conseils, 2014). En 2013, l'Association Française d'AgroForesterie (AFAF) estime que les surfaces en agroforesterie moderne représenteraient 6 à 10000 hectares (Campagnes et environnement, 2013).

Les premières parcelles expérimentales françaises sont implantées dans les années 80 en Languedoc-Roussillon, en Auvergne et dans le Pas-de-Calais en collaboration avec l'INRA. Les plus emblématiques sont celles situées sur le Domaine de Restinclières, dans l'Hérault, appartenant au Conseil Général de l'Hérault. Depuis 1995, l'INRA y exploite des parcelles expérimentales associant des noyers hybrides à des cultures de blé dur en rotation avec du colza (Dupraz et al., 2005). Ce domaine constitue la plus ancienne exploitation de recherche en agroforesterie sur le territoire européen, ce qui fait de la France un des pays pionniers en agroforesterie moderne. Sous la forme du projet PIRAT (Programme Intégré de Recherche en Agroforesterie à ResTinclières), l'équipe de recherche publie régulièrement les résultats de ses travaux, qui concernent tous les aspects de l'association des arbres et des cultures : développement racinaire, conservation de la biodiversité, essais de nouvelles associations... (AGROOF, 2013). Cette vaste zone d'expérimentation, figure de proue de l'agroforesterie en zone européenne, s'est pourtant développée sans le soutien de l'Etat français.

Le difficile soutien à l'agroforesterie en France

Les politiques d'aides financières agricoles ont longtemps joué en défaveur de l'agroforesterie. Les parcelles agroforestières ont été tour à tour découragées (soustraction des surfaces arborées de la surface éligible), interdites (inéligibilité des parcelles si la densité d'arbres est supérieure à 50 arbres/ha), tolérées (l'agroforesterie étant alors considérée comme une « particularité topographique ») (Liagre et al., 2011)¹.

Au niveau européen, une mesure décidée en 2004 ouvre droit à des aides communautaires dédiées à l'agroforesterie (mesure 44 du Règlement de Développement Rural 2007-2013). Cette mesure n'est déclinée en France qu'en 2010 avec l'inscription de la mesure 222 au Programme de Développement Rural Hexagonal (PDRH). Le financement est réparti entre le FEADER² et les autorités régionales, à concurrence de 70 à 80% maximum du coût de la plantation. La gestion de ce financement est confiée aux régions qui décident ou non d'activer cette mesure dans leur Document Régional de Développement Rural (DRDR). Seules les régions les plus mobilisées (Aquitaine, Midi-Pyrénées, Nord-Pas de Calais, Pays de Loire, Picardie, Poitou-Charentes) ont intégré la mesure 222 dans leur DRDR dès 2010. En 2011, la mobilisation des aides est très faible (4 dossiers payés pour un montant de 4545€ ; une

¹ Liagre F., Dupraz C., Canet A., 2011. *Key policy changes that made agroforestry accelerate in France*. Athens, NAAC, 90 p. [Diffusé le 06/06/2011].

² Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural

trentaine d'autres dossiers engagés) (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2012). La principale raison invoquée est la crainte de l'exploitant de perdre l'éligibilité aux aides de la PAC, par manque de lisibilité des textes (Association Française d'Agroforesterie, 2012). Les arbres fruitiers d'espèces non forestières sont par exemple exclus du dispositif (Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, 2010).

Pourtant les agriculteurs sont preneurs de ces nouvelles pratiques agricoles. Dans le cadre du programme SAFE³, des sondages ont été réalisés auprès d'agriculteurs dans différentes régions. Près de 30% ont montré de l'intérêt pour des projets agroforestiers, et certains d'entre eux ont entamé d'eux-mêmes des démarches après la réalisation de l'enquête, en vue de démarrer un projet en agroforesterie (Dupraz et al., 2005).

A partir de 2009, un changement de cap s'amorce du côté de l'Etat français : d'abord par l'inscription de la promotion de l'agroforesterie au programme « Objectif Terres 2020 », puis par l'ouverture de la mesure 222 au PDRH (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2009b). Ce soutien de l'Etat aux pratiques agroforestières a été récemment réaffirmé, notamment par la création d'une mission ministérielle devant identifier les freins au développement de l'agroforesterie, et l'organisation le 1^{er} décembre 2014 d'une journée nationale « L'agroforesterie au service du projet agro-écologique sur les territoires ». L'Etat français montre ainsi clairement que l'agroforesterie fait partie des mesures phares devant conduire à une modernisation de l'agriculture et du territoire (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2014a; Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2014b). On notera également l'ouverture en 2014 d'un programme Agr'eau de promotion du couvert végétal et de l'agroforesterie, piloté par l'Association Française d'Agroforesterie et l'Agence de l'Eau Adour Garonne (Association Française d'agroforesterie, 2014), seul programme liant directement les pratiques agroforestières et la qualité de l'eau.

EN EUROPE ET DANS LE MONDE

En raison de l'application de la PAC et des politiques de remembrement, le modèle agricole a suivi le même cheminement en Europe qu'en France, et les systèmes de type agroforestier ont peu à peu disparu du paysage.

Parmi les systèmes d'agroforesterie traditionnelle qui perdurent, le plus répandu est celui de la dehesa, qui s'étend en Espagne et au Portugal sur près de 4 millions d'hectares. Il s'agit d'un système agro-sylvo-pastoral : les plantations de chênes à large espacement (densité 30 à 100 arbres par hectare) sont pâturées, puis mises en culture pendant un ou deux ans pour contrôler le développement des broussailles (Dupraz et Liagre, 2008). Bien qu'encore très répandu, le système de dehesa décline peu à peu, pour des raisons de manque de compétitivité face aux pratiques intensives (Aviles Benitez, 2009). Le surpâturage, l'abandon de la période de culture nécessaire au maintien d'une pâture de qualité et le faible renouvellement des chênes ont fragilisé ce système.

L'agroforesterie moderne quant à elle, se développe essentiellement par le biais des recherches agronomiques, particulièrement dans les pays ayant participé au projet SAFE (Espagne, Italie, Grèce, Suisse, Royaume-Uni notamment). Lors du projet, une évaluation du potentiel de l'agroforesterie a été réalisée, en fonction de différents critères (érosion des sols, réduction du lessivage des nitrates, diversification du paysage). Il en ressort que l'agroforesterie de type culture intercalaire pourrait être implantée de manière profitable sur 56% des terres arables européennes (Reisner et al., 2007).

Pour faire suite au projet SAFE, achevé en 2005, la Commission Européenne a initié un nouveau programme de recherche en agroforesterie : le projet AGFORWARD (AGroFORestry

³ Silvoarable Agroforestry For Europe (<http://www1.montpellier.inra.fr/safe/french/index.htm>)

that Will Advance Rural Development), planifié de 2014 à 2017, avec la participation de l'INRA et de l'Association française d'agroforesterie (AGFORWARD, 2014).

Hors de l'Europe, la Chine fait figure de chef de file de l'agroforesterie moderne en zone tempérée. En raison de son important développement démographique et économique, la Chine a dû faire face à un accaparement des terres agricoles accompagné d'un rythme élevé de déforestation. Le pays a rapidement misé sur l'agroforesterie dans le but de maximiser la productivité des terres agricoles et, dès les années 1990, d'importants moyens sont alloués pour le développement des systèmes agroforestiers (Simard, 2012). Le *Pawlonia* est l'essence la plus utilisée dans la zone tempérée chinoise, avec en culture intercalaire des associations blé tendre et coton, blé tendre et sorgho, ou encore blé tendre, maïs et haricot (Dupraz, 1994). Les agronomes chinois ont mené des expérimentations poussées, étudiant de nombreux paramètres tels que la teneur en protéines du blé, l'impact de la litière aérienne sur les rendements agricoles, l'influence d'un paillage naturel ou artificiel sur les besoins en eau des cultures intercalaires (Dupraz, 1994; Mao et al., 2012). Les recherches sur les densités optimales de plantations concluent sur l'efficacité des systèmes à faible densité d'arbres (environ 50 arbres par hectare), rejoignant en cela les résultats des recherches européennes, bien que conduites sous des climats différents.

Mais là où l'agroforesterie a connu son essor le plus important, ce sont dans les zones tropicales et subtropicales. S'appuyant sur les systèmes traditionnels de la *taungya* (où les cultures vivrières sont plantées entre les rangs de jeunes pousses d'arbres de reboisement) ou les cultures de café et de cacao, ces pays ont conservé des méthodes de cultures adaptés au climat et à une agriculture encore peu mécanisée (Buttoud, 1994). Dans les systèmes agroforestiers tropicaux, on peut trouver jusqu'à 300 espèces différentes par hectare (Dupraz et Liagre, 2008). Afin de soutenir ces cultures, beaucoup de pays tropicaux ont opté pour un système de paiement pour services à l'environnement (PSE), avec plus ou moins de succès (Zanella et al., 2014).

Le mécanisme des PSE implique un engagement contractuel où un service environnemental est acheté par un bénéficiaire (public ou privé) à un fournisseur (ici les agriculteurs), dans le but de contribuer à la préservation ou l'amélioration de l'environnement (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2009a). Les PSE sont couramment mobilisés aux Etats-Unis ou en Nouvelle-Zélande. En Europe, les Mesures Agro-Environnementales (MAE) prévues dans la PAC, co-existent avec les PSE. Ce dispositif est très peu mobilisé en France, à l'exception notable de Nestlé Waters qui, pour protéger les sources de captage de l'eau de source de Vittel, a engagé un programme de protection de la ressource avec les acteurs locaux (agriculteurs et collectivités territoriales) (Prokofieva et al., 2012; Valette et al., 2012; Pur Projet, 2013). Cependant, identifiés au sein du Conseil économique pour le développement durable comme des mécanismes efficaces en raison de leur effet incitatif, les PSE pourraient être amenés à se développer, en complément aux mesures de financement existantes (Conseil Economique pour le Développement Durable, 2010). Au vu des nombreux services rendus par l'agroforesterie (protection des sols, de l'eau, de la biodiversité, réduction des intrants, préservation des paysages) et de son potentiel de développement sur le territoire, les projets agroforestiers seraient d'excellents bénéficiaires de ce dispositif d'incitation.

CONCLUSION

Face à une dégradation inquiétante de la ressource en eau, conséquence de décennies de pratiques agricoles intensives, une réduction de la pollution à la source est aujourd'hui nécessaire. La nécessité, d'une part de remettre en question les pratiques agricoles intensives, d'autre part d'assurer la subsistance à une population mondiale croissante, amène la communauté scientifique à s'interroger sur un modèle efficace et rentable. La réintroduction de l'arbre dans les champs serait-elle une solution acceptable ?

Les études menées depuis les années 70, et plus récemment les travaux de l'INRA uniques en leur genre, ont permis d'asseoir de manière scientifique les bénéfices de pratiques séculaires oubliées. Le développement racinaire profond des arbres en contexte agroforestier permet une exploitation plus efficace des ressources du sous-sol. La qualité du sol et de l'eau s'en trouve améliorée, de même que la capacité de la nappe à se recharger. Il s'avère par ailleurs que, malgré la compétition attendue entre les arbres et les cultures, l'agroforesterie peut s'avérer très rentable pour l'exploitant, moyennant un minimum de réflexion quant au choix de l'essence et à la disposition des lignes d'arbres.

On notera que la préservation et la restauration de la qualité des eaux est une préoccupation émergente car les études d'un lien entre les arbres et la qualité de l'eau est très peu documentée. La problématique des pesticides est d'ailleurs pratiquement absente du champ des recherches.

On s'étonnera également du fait que l'impact de l'agroforesterie sur le débit d'étiage des cours d'eau proches n'ait pas non plus fait l'objet de davantage d'études. On peut s'interroger sur la possibilité d'adopter les pratiques agroforestières sous tous les climats. Il est vrai que, pour les besoins de cette synthèse, nous nous sommes restreints un certain type d'agroforesterie en milieu tempéré.

Enfin, en soutien à une activité qui a depuis longtemps perdu de son attractivité, il serait intéressant d'évaluer l'impact des pratiques agro-écologiques émergentes sur l'image des métiers agricoles.

ANNEXE

Tableau 1 : récapitulatif des principaux paramètres à prendre en compte pour l'établissement d'une parcelle agroforestière (adapté de Dupraz et Liagre, 2008)

Paramètre	Commentaires
Sols	L'horizon du sol accessible aux racines des arbres doit être plus profond que celui des cultures. Les sols trop superficiels sur substrat imperméable ne sont pas adaptés aux arbres (risque de compétition racinaire avec les cultures, et d'enracinement superficiel).
Caractéristique des sols	L'essence d'arbre choisie doit être adaptée au sol sous peine de voir les arbres végéter.
Profondeur de la nappe	Situation favorable : présence d'une nappe profonde dont le niveau ne remontera pas à plus d'1 mètre de profondeur en hiver Les sols saturés sont peu adaptés à l'agroforesterie car les arbres qui tolèrent les sols saturés (saules, aulnes...) ont un bois de faible valeur marchande.
Essences	A sélectionner en fonction du climat, du sol, de la topographie. Eviter - les arbres à croissance très lente, - les espèces drageonnantes, - les arbres à couvert très dense, à port étalé, à feuilles persistantes.
Mélanges d'essence	Intéressant pour limiter les transmissions de parasites et de maladies, améliorer l'aspect paysager, étaler les arrachages des arbres
Arbres multi-usages	Les arbres fruitiers hautes tiges « double-fin » auront une double valeur marchande (production de fruits, puis de bois)
Distance entre les lignes d'arbres	A adapter en fonction de la largeur des machines, de la largeur de bande enherbée souhaitée ; viser une faible densité de plantation
Bande non cultivée au pied des arbres	Largeur : entre 1 et 4m. Les bandes enherbées sont plus efficaces pour lutter contre l'érosion des sols. En cas de forte pente ou de terrain glissant, réserver une bande large.
Espacement entre les arbres	Généralement entre 4 et 10 mètres.
Densité de plantation des arbres	Maintenir une densité faible (< 100 arbres / ha)
Orientation des lignes d'arbres	A choisir selon : - l'ensoleillement : orientation Nord-Sud préférable ; - la protection contre les vents dominants ; - le risque d'érosion (pente – zone inondable) : plantation en lignes de niveau.
Entretien des arbres	Taille de formation (pour obtenir une bille longue et droite) Elagage (limite la formation de nœuds dans le bois, réduit l'ombrage au sol et facilite le travail avec les machines)
Cultures intercalaires	Si cultures non pérennes : rechercher en priorité des cultures dont le cycle végétatif est décalé par rapport à celui des arbres : les cultures d'hiver favoriseront un enracinement profond des arbres
Irrigation	Pas d'irrigation des arbres (sauf éventuellement pour la période d'installation). Les cultures fortement irriguées sont déconseillées (enracinement superficiel des arbres et risque de compétition avec les cultures).

BIBLIOGRAPHIE

- AGFORWARD, 2014. *AGFORWARD*. Disponible sur Internet: <http://www.agforward.eu/index.php/fr/home.html> [Consulté le 18/01/2015].
- Agroforesterie et Conseils, 2014. *Agroforesterie et Conseils Enjeux et Perspectives*. Disponible sur Internet: <http://www.agroforesterie-conseil.com/> [Consulté le 02/12/2014].
- AGROOF, 2013. *PIRAT - Programme intégré de recherches en agroforesterie à Restinclières*. Disponible sur Internet: <http://www.agroof.net/PIRAT/> [Consulté le 07/12/2014].
- Allen S.C., Jose S., Nair P.K.R., Brecke B.J., Nkedi-Kizza P., Ramsey C.L., 2004. Safety-net role of tree roots: evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)–cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Forest Ecology and Management*, 192 (2-3), pp. 395- 407.
- Association Française d'Agroforesterie, 2012. *Agroforesterie, du global au local*. Montpellier, Association Française d'Agroforesterie, 6 p.
- Association Française d'Agroforesterie, 2014. *Agr'eau actualités*. Disponible sur Internet: <http://www.agroforesterie.fr/AGREAU/agreau-actualites.php> [Consulté le 17/01/2015].
- Aviles Benitez A., 2009. *Gestion soutenable et proximité des ressources naturelles. Le cas de l'agriculture de dehesa en Andalousie*. Thèse de doctorat d'économie appliquée, Grenoble, Université Pierre Mendès France, 352 p.
- Bleby T.M., Mcelrone A.J., Jackson R.B., 2010. Water uptake and hydraulic redistribution across large woody root systems to 20 m depth: Hydraulic redistribution across deep root systems. *Plant, Cell & Environment*, 33 (12), pp. 2132- 2148.
- Buttoud G., 1994. Les systèmes agroforestiers dans les pays en développement: quels enseignements? *Revue Forestière Française*, XLVI (numéro spécial « Agroforesterie en zone tempérée »), pp. 152- 164.
- Caldwell M.M., Richards J.H., 1989. Hydraulic lift: water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots. *Oecologia*, 79 (1), pp. 1–5.
- Campagnes et environnement, 2013. *Quelle est l'importance de l'agroforesterie en France ?*. Disponible sur Internet: <http://www.campagnesetenvironnement.fr/quelle-est-l-importance-de-l-agroforesterie-en-6239.html> [Consulté le 24/09/2013].
- Commissariat Général au Développement Durable, 2012. *Le financement de la gestion des ressources en eau en France: Etude de cas pour un rapport de l'OCDE*. Actualisation de janvier 2012. Paris, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 84 p. Etude et documents.
- Conseil Economique pour le Développement Durable, 2010. *Les « PSE » : des rémunérations pour les services environnementaux*. Paris, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 8 p. Références économiques pour le développement durable.
- Dawson T.E., 1993. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia*, 95 (4), pp. 565- 574.

- Dougherty M.C., Thevathasan N.V., Gordon A.M., Lee H., Kort J., 2009. Nitrate and Escherichia coli NAR analysis in tile drain effluent from a mixed tree intercrop and monocrop system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131 (1-2), pp. 77- 84.
- Dupraz C., 1994. Les associations d'arbres et de cultures intercalaires annuelles sous climat tempéré. *Revue Forestière Française*, XLVI (numéro spécial « Agroforesterie en zone tempérée »), pp. 72-83.
- Dupraz C., Burgess P., Gavaland A., Graves A., Herzog F., Incoll L.D., Jackson N., Keesman K., Lawson G., Lecomte I., Liagre F., Mantzanas K., Mayus M., Moreno G., Palma J., Papanastasis V., Paris P., Pilbeam D.J., Reisner Y., Van Noordwijk M., Vincent G., Werf Van der W., 2005. *Synthesis of the Silvoarable Agroforestry For Europe project*. Montpellier, INRA-UMR System Editions, 254 p.
- Dupraz C., Liagre F., 2008. *Agroforesterie, des arbres et des cultures*. Paris, France Agricole, 413 p.
- Dupraz C., Liagre F., Querné A., Sitraka A., Talbot G., 2011. *L'agroforesterie peut-elle permettre de réduire les pollutions diffuses azotées d'origine agricole?*. Montpellier, INRA, 118 p.
- Hamon X., 2007. *L'agroforesterie en basse plaine de l'Hérault: potentiel d'adoption et perspectives de développement*. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, Lyon, ISARA, 136 p.
- Lavabre J., Andréassian V., 2000. *Eaux et forêts: la forêt, un outil de gestion des eaux?*. Antony, CEMAGREF, 116 p.
- Lefroy E.C., Stirzaker R.J., 1999. Agroforestry for water management in the cropping zone of southern Australia. *Agroforestry Systems*, 45 (1-3), pp. 277-302.
- Liagre F., 2008. *CAS DAR Programme Agroforesterie 2006/08: Compte-rendu final du projet*. Anduze, Agroof Développement, 190 p.
- Mao L., Zhang L., Li W., van der Werf W., Sun J., Spiertz H., Li L., 2012. Yield advantage and water saving in maize/pea intercrop. *Field Crops Research*, 138, pp. 11- 20.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2012. *Rapport annuel d'exécution du programme de développement rural hexagonal. Année civile 2011*. Version acceptée par la Commission le 28 février 2013. Paris, Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 128 p.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2014a. Communiqué de presse du Ministre du 1er décembre 2014 sur les moyens d'encourager l'agroforesterie, notamment à travers la PAC.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2014b. Lettre de mission du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt du 24 juillet 2014 sur l'agroforesterie.
- Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2009a. *La rémunération des services environnementaux rendus par l'agriculture*. Document de travail. Paris, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 25 p. Prospective et évaluation.
- Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 2009b. *Objectif Terres 2020. Pour un nouveau modèle agricole français*. Paris, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 45 p.

- Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, 2010. CIRCULAIRE DGPAAT/SDBE/SDFB/C2010-3035 du Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche du 6 avril 2010 sur l'ensemble des règles qui concernent l'agroforesterie pour faciliter la mise en place de tels systèmes.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2014. *Le rapport sur l'environnement en France. Edition 2014*. Paris, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 25 p.
- Nair P.K.R., 1993. *An Introduction to agroforestry*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 499 p.
- Ong C.K., Swallow B.M., 2003. Water Productivity in Forestry and Agroforestry. In: *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*. Sri Lanka, International Water Management Institute, pp. 217 - 228. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, vol.1.
- Palma J.H.N., Graves A.R., Bunce R.G.H., Burgess P.J., de Filippi R., Keesman K.J., van Keulen H., Liagre F., Mayus M., Moreno G., Reisner Y., Herzog F., 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119 (3-4), pp. 320- 334.
- PIRAT, 2007. *Restinclières 1995 – 2007. Les belles surprises de l'agroforesterie*. Montpellier, PIRAT, 8 p.
- Pointereau P., Bazile D., 1995. *Arbres des champs. Haies, alignements, prés vergers ou l'art du bocage. Pour protéger, restaurer et gérer les arbres « Hors la forêt »*. Toulouse, Solagro, 139 p.
- Prokofieva I., Wunder S., Vidale E., 2012. *Les paiements pour services environnementaux : une opportunité pour les forêts méditerranéennes ?*. Joensuu, European Forest Institute, 16 p. Le cahier sur les politiques de l'EFI.
- Pur Projet, 2013. *Les services écosystémiques. Des arbres pour l'eau*. Paris, Pur Projet, 54 p.
- Reisner Y., de Filippi R., Herzog F., Palma J., 2007. Target regions for silvoarable agroforestry in Europe. *Ecological Engineering*, 29 (4), pp. 401- 418.
- Secrétariat d'Etat chargé de la santé, 2012. *Abandons de captages utilisés pour la production d'eau destinée à la consommation humaine - Bilan Février 2012*. Paris, Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Santé, 22 p.
- Simard J., 2012. *L'agroforesterie, une aventure de développement durable pour l'agriculture québécoise?*. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.), Sherbrooke, Centre universitaire de formation en environnement, 116 p.
- Valette E., Aznar O., Hrabanski M., Maury C., Caron A., Decamps M., 2012. Émergence de la notion de service environnemental dans les politiques agricoles en France : l'ébauche d'un changement de paradigme? *VertigO*, 12 (3), pp. 1- 16.
- Zanella M.A., Schleyer C., Speelman S., 2014. Why do farmers join Payments for Ecosystem Services (PES) schemes? An Assessment of PES water scheme participation in Brazil. *Ecological Economics*, 105, pp. 166-176.



648 rue Jean-François Breton – BP 44494
34093 MONPELLIER CEDEX 5

Tél. : (33) 4 67 04 71 00

Fax. : (33) 4 67 04 71 01

www.agroparistech.fr



*Office
International
de l'Eau*

15 rue Edouard Chamberland
87065 Limoges Cedex

Tél. (33) 5 55 11 47 80

Fax. (33) 5 55 11 47 48

www.oieau.org