

Vers de nouvelles agroforesteries en climats tempérés et méditerranéens

I. Aspects agronomiques

Charles Baldy, Christian Dupraz, Steven Schilizzi

La redéfinition de la Politique agricole commune européenne conduit à rechercher des modèles de production compatibles avec la réduction des surfaces cultivées. Pour préserver l'avenir, ces modèles devraient être capables de s'adapter aux variations des besoins alimentaires qui se feront jour à long terme, et des remises en culture massives ne sont pas exclues à cet égard.

Deux solutions sont aujourd'hui explicitement envisagées : la jachère, solution parfaitement réversible, et le boisement paysan, affectation irréversible des terres à moyen terme. Une troisième voie semble digne d'intérêt : l'agroforesterie, qui consiste à cultiver ensemble arbres et plantes herbacées sur les mêmes parcelles, avec des itinéraires techniques spécifiques.

Notre objectif est de présenter des éléments de réflexion sur la mise en place d'une telle agroforesterie moderne de diversification des terres cultivées en région tempérée. Cette réflexion s'appuie sur des analyses d'ordre bioclimatique, pédologique, agronomique et socio-économique.

L'agroforesterie utilise les complémentarités écologiques entre espèces qui permettent de mieux valoriser un espace cultivé. Sa gestion moderne nécessite la mise au point de techni-

ques innovantes. Une telle agroforesterie pourrait constituer, sous climat tempéré, un élément de la réforme de la Politique agricole commune européenne, en se substituant aux jachères actuellement préconisées. Les écosystèmes agroforestiers, par leur diversité constitutive, peuvent permettre de mieux gérer certains problèmes environnementaux actuels : conservation du patrimoine agronomique des sols cultivés, maintien du potentiel organique des sols, préservation de la diversité génétique, limitation de l'érosion, prévention des incendies, réduction de la pollution par les engrais et les pesticides. Les peuplements agroforestiers sont pratiquement incombustibles pour trois raisons : la culture intercalaire récoltée laisse une parcelle propre, sans végétation sèche en été ; les arbres espacés ne se touchent pas, ce qui limite la propagation des feux de couronnes ; les essences d'arbres utilisées sont essentiellement des feuillus.

Les systèmes de culture agroforestiers pourraient trouver ainsi leur place dans une politique d'aménagement du territoire. Nous discuterons de leur pertinence pour la région méditerranéenne, tout en soulignant les transpositions possibles dans d'autres régions sous climat tempéré.

Cette synthèse comporte deux parties : la première présente le problème et traite des aspects agronomiques et bioclimatiques, tandis que la seconde portera sur les aspects socio-économiques des possibilités d'adoption de ces techniques en milieux tempérés et méditerranéens.

Une agroforesterie pour les terres cultivables

Définition

L'agroforesterie regroupe les pratiques de culture associant des ligneux à des plantes herbacées. Elle s'oppose dès lors aux pratiques agricoles et/ou forestières qui consistent à gérer des cultures soit herbacées, soit ligneuses. Des peuplements plurispécifiques à une seule strate (futaie mélangée sapin-hêtre ou associations fourragères herbacées) ne constituent pas des peuplements agroforestiers.

L'interaction biologique entre ligneux et plantes herbacées caractérise la parcelle cultivée agroforestière [1]. Il s'agit de mettre en valeur des terres cultivables grâce à la présence simultanée d'arbres et de cultures intercalaires pouvant avoir des vocations de production et/ou de protection. Ce type d'agroforesterie est souvent désigné par le terme d'agrosylviculture dans la littérature internationale [2]. En France, le terme d'agro-ligniculture est préconisé pour éviter le terme de « sylviculture » qui évoque un peuplement dense d'arbres : il est mal adapté quand l'arbre n'est pas cultivé pour son bois.

D'autres formes d'agroforesteries existent, en particulier sur les terres non cultivables (sylvopastoralisme). La variété des pratiques agroforestières est moins grande sous climat tempéré que sous climat tropical [3], à l'image de

C. Baldy, C. Dupraz : Inra, groupe de recherches en agroforesterie, unité d'agronomie et écophysologie, place Viala, 34060 Montpellier Cedex, France.

S. Schilizzi : Inra, laboratoire d'études comparées des systèmes agraires, place Viala, 34060 Montpellier Cedex, France.

la diversité des espèces d'arbres présentes dans les écosystèmes forestiers naturels [4].

Plantations forestières et agroforestières

Les boisements de terres agricoles peuvent prendre trois formes principales : — des plantations forestières denses, entre 8 à 15 fois la densité finale, permettant une sylviculture sélective : la parcelle est rapidement occupée entièrement par les arbres ;

— des plantations forestières à densité réduite, entre 4 à 8 fois la densité finale, où il est nécessaire de prévoir un « bourrage » avec des essences ligneuses d'accompagnement, et où une sylviculture sélective est toujours possible ;

— des plantations à large espacement implantées entre 1 à 4 fois leur densité finale, où la pression de sélection par éclaircie sera faible. Il y a alors obligation d'utiliser un matériel génétique amélioré et de soigner individuellement chaque arbre. L'espace couvert par les arbres est très limité durant la première moitié de la rotation et le contrôle de la compétition des adventices constitue un problème majeur.

Pour ces plantations à large espacement, la recherche de solutions peu coûteuses et efficaces pour l'entretien de l'espace intercalaire entre les arbres conduit à distinguer deux options :

— l'une, de type agricole et/ou forestier, comporte un désherbage chimique et/ou mécanique ;

— l'autre, de type agroforestier, comporte l'installation d'une culture intercalaire qui peut être soit une plante de couverture non récoltée, soit une production agricole, récoltée ou pâturée. Dans ce dernier cas, un revenu agricole immédiat peut être tiré de la parcelle boisée.

Les inconvénients du boisement de type forestier sur les terres agricoles sont connus : absence de revenu à court terme, irréversibilité, blocage du foncier, rotations longues et peu compatibles avec une économie d'exploitation agricole, fermeture du paysage, risques d'incendies avec des peuplements résineux en zone sèche, écosystèmes peu favorables à la faune sauvage, productivités aléatoires eu égard au fait que les essences et les techni-

ques forestières sont souvent mal adaptées aux terroirs agricoles (en particulier pour la lutte contre les adventices pendant l'installation du peuplement). L'agroforesterie, en revanche, préserve la trésorerie des exploitations (remplacement progressif des cultures annuelles), produit un paysage ouvert attractif (arbres espacés, essences surtout feuillues), et est réversible par suite du faible ensouchement. La croissance des arbres y sera rapide, car ceux-ci bénéficieront tant de l'absence de compétition entre eux pendant une grande partie de leur vie, que des soins apportés à la culture intercalaire (fertilisation, désherbage, irrigation). On peut s'attendre à des rotations raccourcies, qui rendent cette spéculation plus compatible avec les exigences d'une exploitation agricole ou avec la gestion d'un patrimoine foncier [5].

Exemples d'agroforesteries en zones tempérées et méditerranéennes

La plupart des agroforesteries traditionnelles ont largement régressé, du fait de la diffusion de modèles de développement intensifs basés sur des cultures pures. On mentionnera notamment les cultures de céréales sous oliviers, amandiers, arganiers [6], châtaigniers, chênes fruitiers fourragers, caroubiers, ainsi que la culture de fourrages sous chênes fruitiers fourragers (*dehesa* en Espagne, *montado* au Portugal) (*photo 1*).

Certaines de ces pratiques, cependant, demeurent très vivantes, malgré le manque d'intérêt des organismes de développement agricole. Il s'agit des cultures maraîchères dans des vergers fruitiers (Roussillon en France, Cap Bon et Sahel de Tunisie). En Europe, ces systèmes agroforestiers produisent les plus fortes marges brutes à l'hectare que l'on puisse observer aujourd'hui, cultures sous serre et vignobles de prestige exclus. Il s'agit aussi des grandes cultures dans les plantations de noyers fruitiers du Dauphiné et de Dordogne (*photo 2*), ainsi que de l'enherbement permanent de nombreux vergers irrigués et de certains vignobles [7].

D'autres agroforesteries ont fait l'objet d'une mise au point récente et d'une diffusion spectaculaire dans certains pays. On citera notamment les cultures

de céréales entre des *Paulownia* et jujubiers en Chine tempérée (*photo 3*) qui représentent 2,5 millions d'hectares aujourd'hui [8], la culture de céréales et d'oléagineux entre des résineux à feuilles caduques (*Taxodium ascendens* Brongn) en Chine [8], et la culture de fourrages sous pins et eucalyptus en Australie et Nouvelle-Zélande [9, 10], au Chili et aux Etats-Unis [11].

En zone méditerranéenne, le principe général est d'associer des arbres à développement printanier et estival avec des herbacées à développement hivernal. Nous ne prendrons pas en compte ici les systèmes irrigués ou alimentés en été par des remontées capillaires d'eau, pour lesquels les contraintes de choix des espèces à associer ou des modes de gestion à adopter sont beaucoup moins fortes.

Cycle de l'eau et des éléments nutritifs dans des associations agroforestières

En associant des arbres et des plantes herbacées sur la même parcelle, on constitue un agrosystème original, intermédiaire entre les cultures pures intensives et les écosystèmes naturels complexes. Ce peuplement à deux strates exploite les ressources du milieu en modifiant les cycles fondamentaux de l'eau et des éléments minéraux et en agissant principalement sur les propriétés physiques des sols.

Effets sur les propriétés physiques des sols

Les sols méditerranéens cultivés sont particulièrement pauvres en matière organique. Les pratiques de désherbage total des cultures pérennes (vignes, vergers) aggravent souvent la situation. Les sols sont déstructurés, avec des conséquences défavorables sur le bilan hydrique (faible infiltration), la capacité d'échange et les profils d'enracinement.

Par rapport à un sol nu, une plante de couverture sous un peuplement d'arbres modifie l'état de la matière organique dans les horizons de surface.

Mais l'augmentation du taux de matière organique dû à un enherbement et à l'enfouissement de ses résidus dans le sol est très irrégulière [12] : l'effet disparaît quelques mois après la fin de l'enherbement. On obtient de la sorte des accroissements temporaires de la matière organique totale, mais on recrée difficilement une structure stable et durable. A l'inverse, un enherbement permanent améliore notablement la structure du sol, sa

résistance au poids, et facilite l'accès aux parcelles après les pluies (figure 1). Dans une association agroforestière, les arbres contribuent à augmenter les retours de matière organique au sol par les litières et par la décomposition *in situ* des racines. Il en résulte une amélioration de la structure et une augmentation de la macroporosité ; les courbes de rétention en eau du sol sont nettement meilleures sous le couvert des arbres [13].

Recharge des réserves en eau du sol sous un peuplement associé

Dans un peuplement associé d'arbres et de plantes herbacées, deux systèmes racinaires sont superposés dans le sol. L'infiltration des fortes pluies, prépondérantes sous climat méditerranéen, est facilitée :

— par l'augmentation de rugosité de surface qui freine le ruissellement et permet des stockages transitoires de l'eau en excès ;

— par la réduction de l'hydrophobie des horizons de surface, grâce au développement de racines superficielles de la plante herbacée à l'ombrage du sol qu'elle génère ;

— par l'infiltration profonde permise par le système racinaire des arbres, et notamment par les voies préférentielles d'infiltration que fournissent les racines mortes. Ce dernier aspect est primordial, car le facteur limitatif majeur de croissance des arbres est la quantité d'eau mobilisable entre mai et septembre : elle doit atteindre 300 mm au moins et ne peut être satisfaite que par les horizons profonds du sol. Une agrofôret méditerranéenne a donc besoin de sols profonds ou fissurés. En zone tempérée et méditerranéenne, l'infiltration des pluies d'hiver dans les horizons profonds est indispensable à cet égard. Les terres sensibles à la battance et au tassement sont particulièrement délicates, même si le bilan hydrique global paraît favorable, comme c'est le cas des plaines de grande culture de la moitié nord de la France [7]. Dans ces conditions, le recouvrement du sol et l'activité des plantes de couverture pendant le semestre « froid » facilitent l'infiltration.

L'efficacité des pluies estivales pour la recharge des horizons profonds dépendra de l'activité de la plante herbacée associée : on recherchera des espèces thermophobes à dormance estivale ou des cultures intercalaires récoltées en début d'été telles que le colza et certaines céréales d'hiver précoces.

L'interception des pluies par la végétation arborée pourrait, en limitant la recharge en eau des horizons profonds, constituer un facteur limitatif de l'agroforesterie, surtout sous les climats à pluies fréquentes mais de faible intensité. Cet effet sera cependant

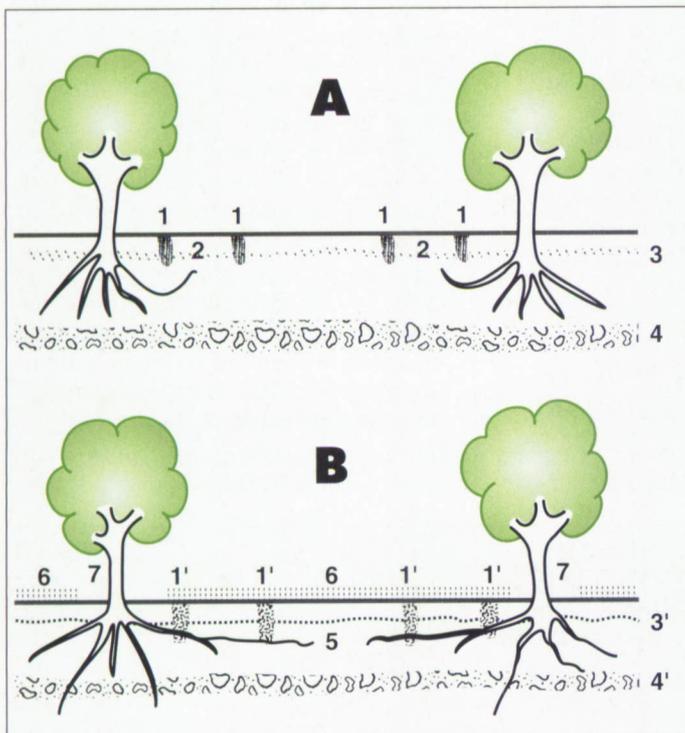


Figure 1. Modifications de la structure et de la résistance du sol dues à un enherbement.

A : verger sur sol nu ; B : système agroforestier.

- (1) Passages de roues des tracteurs ; (1') réduction de l'effet de tassement après quelques années d'enherbement.
- (2) Volume de sol peu exploré par les racines des arbres.
- (3) Semelle de labour, qui disparaît (3') après enherbement.
- (4) Semelle de défoncement, réduisant la perméabilité du sol en profondeur. (4') Elle peut évoluer du fait des transferts de matière organique en profondeur par lessivage sous enherbement.
- (5) L'enherbement facilite la colonisation des interbandes par les racines des arbres en supprimant les obstacles physiques dus au compactage du sol par les outils.
- (6) L'enherbement peut être gyrobroyé et laissé en place, pâturé ou récolté.
- (7) Un désherbage sélectif peut être réalisé au pied des arbres.

Figure 1. Soil structure and carrying capacity as affected by a grassing down.

A : interrows with bare soil ; B : interrows with a cover crop.

- (1) Tractor wheel prints ; (1') reduced compaction.
- (2) Poor tree root colonization.
- (3) Plough pan, disappearing under a permanent cover crop (3').
- (4) Subsoiling pan, reducing deep infiltration, reduced by deep organic migration under a permanent cover crop (4').
- (5) A permanent grassing down helps tree roots to invade interrows : the soil is less compacted.
- (6) The cover crop may be slashed and left, grazed or harvested.
- (7) Spot weeding under the trees.

réduit compte tenu des faibles densités d'arbres [13].

Cycles biogéochimiques en agroforêts

La strate arborée permet une remontée biologique de nutriments *via* sa litière ; elle peut être gérée comme une véritable fertilisation. Les humus issus des litières de feuilles d'arbres sont souvent d'excellente qualité. Leur incorporation au sol par des façons culturales appropriées nécessite l'étude d'itinéraires techniques spécifiques aux systèmes agroforestiers.

Cette remontée biologique peut avoir deux origines : la capture en profondeur d'éléments mobiles entraînés par lixiviation ou lessivage (c'est notamment le cas, sur sols filtrants, de l'azote lors des pluies orageuses d'été) et la mobilisation de cations issus de l'altération de la roche-mère en profondeur. Cette remontée est particulièrement importante dans le cas des sols acides ou à faible capacité d'échange cationique ; elle paraît bien expliquer l'amélioration des rendements céréaliers sous les *Faidherbia albida* africains.

L'influence directe des plantes herbacées de couverture sur le développement et l'activité des systèmes racinaires des arbres commence à être mise en évidence [14]. L'interconnexion des mycorhizes des arbres et des plantes herbacées peut permettre des transferts efficaces de nutriments (notamment du phosphore) entre systèmes racinaires. Lorsque les parcelles agroforestières sont pâturées, le stationnement des animaux sous les arbres conduit à d'importants transferts de fertilité minérale par accumulation des déjections sous les arbres, mais provoque un tassement des horizons de surface. L'enracinement profond des arbres peut limiter les pertes par infiltration et lixiviation de ces déjections : le recyclage des éléments minéraux est ainsi amélioré par rapport à des aires de repos non arborées. Ceci est possible car il y a concomitance entre l'activité de l'arbre et l'accumulation des déjections : les animaux ne recherchent pas l'abri d'un arbre défeuillé. Lors de très fortes charges animales, telles que les parcours pour volailles, la réduction de la pollution par les nitrates résultant de l'activité de capture en profondeur par les arbres pourrait être intéressante.

Modifications bioclimatiques du milieu naturel par des systèmes agroforestiers

Tous les paramètres du climat aux échelles locale et zonale sont affectés par l'agroforêt [15]. Ces modifications ont des conséquences sur le fonctionnement et la production de chaque strate du peuplement et, donc, sur l'efficacité agronomique de l'association agroforestière.

Pour comprendre ces interactions, des méthodes d'analyse particulières à ces systèmes tenant compte de leur hétérogénéité spatiale tridimensionnelle ont été mises au point [16, 17].

Modification des composantes du vent au sol par une agroforêt

La vitesse du vent dépend, à l'échelle d'espace locale, de la rugosité du pay-

sage, phénomène qui a été bien analysé dans le cas des brise-vent (*figure 2*) [15]. La présence de végétaux de grandes dimensions (bosquets ou arbres isolés, mais assez nombreux) joue un rôle analogue à celui d'un brise-vent perméable continu et provoque des réductions notables de la vitesse et de la turbulence du vent (c'est-à-dire des échanges verticaux entre le sol et les basses couches de l'atmosphère). La présence des cimes modifie le coefficient Z_0 (niveau théorique d'annulation du vent, qui est de l'ordre des $2/3$ de la hauteur du couvert) (*figure 2*). Ceci a deux conséquences : localement, les échanges de masse et d'énergie entre la végétation herbacée et l'atmosphère sont réduits ; au delà, les terrains adjacents bénéficient d'un « effet de brise-vent perméable » très efficace [15].

Pour les plantes associées aux arbres dans les parcelles agroforestières, les dilacérations de feuilles, les niveaux de photosynthèse nette et les migrations des photosynthétats sont modifiés dans un sens généralement positif [18].

Les zones agroforestières auront un impact sur le climat régional. Il sera

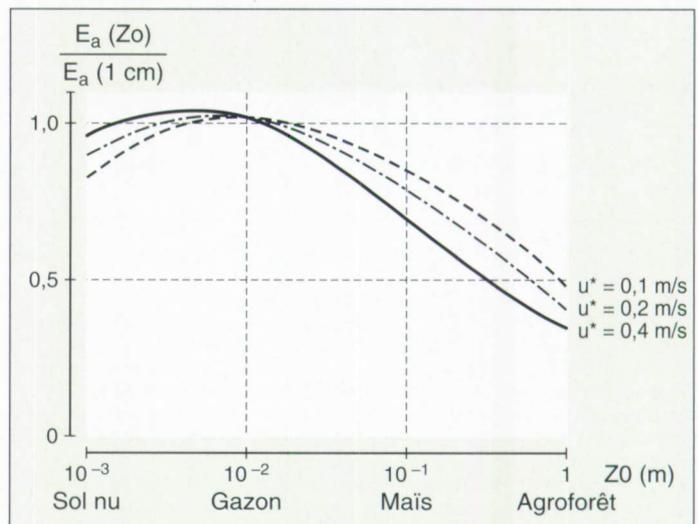


Figure 2. Modifications du pouvoir évaporant de l'air (E_a) par la réduction de la vitesse du vent (u^*) dans un système agroforestier. Z_0 : paramètre de rugosité (10^{-2} m = gazon ras ; 1 m = système agroforestier avec des arbres de 10 m de haut et 10 m d'écartement). u^* : vitesse du vent au-dessus du peuplement herbacée. On voit que le système agroforestier peut réduire de plus de 50 % le pouvoir évaporant de l'air.

Figure 2. Air evaporating capacity (E_a) is reduced with lower wind speeds in an agroforestry plot. Z_0 : roughness parameter (turf : 10^{-2} m ; agroforestry plot with 10 m high trees, spaced at every 10 m : 1 m). u^* : wind velocity above the herbaceous stand. Within the agroforestry plot, E_a is reduced by more than 50 %.

proportionnel à leur importance relative par rapport aux zones de cultures basses. Tout se passe comme si la zone supportait en moyenne des vitesses du vent plus faibles [19].

Répartition du rayonnement solaire entre les strates arborées et herbacées

La disposition des arbres à la plantation a une grande influence sur la compétition pour la lumière entre les arbres et les cultures intercalaires. Une plantation au carré ou au rectangle sera toujours plus favorable aux cultures qu'une plantation en quinconce car les couronnes des arbres seront jointives moins rapidement. Lorsque les lignes de plantation sont très espacées, comme ce sera le cas pour les plantations modernes très mécanisées où des interlignes de 12 à 14 mètres sont nécessaires, on resserre les arbres sur la ligne pour maintenir la densité requise. Des doubles lignes de plantation ne sont possibles que pour les espèces d'arbres capables de pousser droit en condition de compétition unilatérale. Dans le cas de lignes espacées, l'orientation des lignes est généralement imposée par le parcellaire ou par les vents dominants (recherche d'un effet de brise-vent), mais si le choix est encore possible, des lignes orientées nord-ouest/sud-est favoriseront l'éclairage des cultures intercalaires en fin de matinée, période la plus favorable à une photosynthèse active en période de stress hydrique.

L'albédo régional est fortement modifié par la présence de systèmes agroforestiers (figure 3) qui agissent comme des pièges plus efficaces pour le rayonnement solaire que les forêts ou les cultures basses pures (effet d'alvéoles). De ce fait les mouvements verticaux de l'air sont stimulés.

Dans un peuplement agroforestier, l'interception du rayonnement direct par les couronnes des arbres est proportionnelle à leur projection au sol : celle-ci croît continuellement au cours de la vie du peuplement. Pour des raisons géométriques, l'insolation directe arrivant au sol est faible lorsque le soleil est bas sur l'horizon, mais est importante lorsque le soleil est haut dans le ciel (photo 4). Elle peut être forte avec un soleil bas si les effets de lisière sont prépondérants, ce qui cor-

respond à des parcelles agroforestières de faible dimension, insérées dans des parcelles non boisées.

Le rayonnement global comprend aussi une fraction diffuse, d'importance variable selon le type de temps, également interceptée par la végétation dominante, mais moins fortement absorbée, car elle est anisotrope. Plus l'atmosphère est brumeuse, plus le pourcentage de rayonnement diffus augmentera dans le rayonnement global et plus la fraction du rayonnement transmis sous les couronnes des arbres sera élevée.

Le rayonnement photosynthétiquement actif

Il faut distinguer la continuité, la densité et la qualité de l'ombre d'un arbre, pour prévoir les performances photosynthétiques d'une plante de sous-étage.

De la continuité de l'ombre dépend la quantité de lumière directe reçue sous les arbres. On distingue les plots de lumière, d'une dimension de l'ordre

du cm^2 , résultant des discontinuités dans l'agencement des feuilles des arbres, et les taches de lumière, d'une dimension de l'ordre du m^2 , provoquées par des trous dans l'agencement des houppiers. Les arbres à cimes « timides », c'est-à-dire dont les couronnes ne se touchent pas, laissent ainsi passer des rais de lumière importants.

La densité et la qualité de l'ombre dépendent de l'indice foliaire du houppier et des propriétés optiques de ses feuilles. La figure 4 compare les transmittances et les réflectances spectrales des feuilles d'olivier et de blé. Le rayonnement visible, photosynthétiquement actif (RPA), est presque entièrement absorbé par les organes chlorophylliens. Quelques pour-cent au plus sont réfléchis ou transmis à travers la feuille, surtout en jaune-vert. Par ciel clair, l'ombre portée d'un arbre feuillu est donc pauvre en RPA. Par temps brumeux ou couvert, la composition spectrale du rayonnement atteignant la strate inférieure de végé-

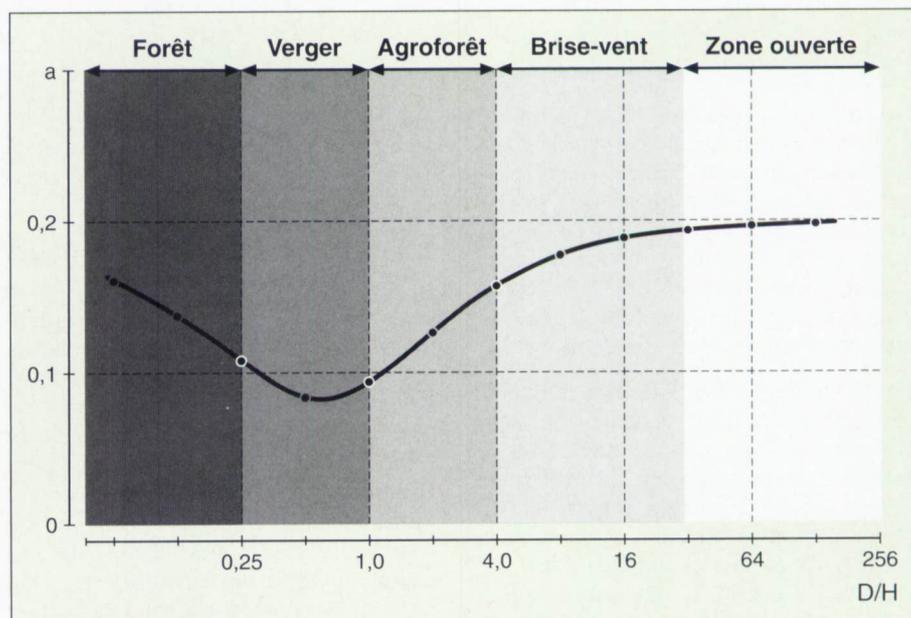


Figure 3. Effet de la densité de plantation des arbres sur l'albédo régional. Albédo (a) : fraction de l'énergie solaire réfléchie. D : espacement des rangs d'arbres ; H : hauteur des arbres. Les valeurs minimales sont atteintes pour des rapports D/H voisins de 1.

Figure 3. Tree density and local albedo. Albedo (a) : percentage of reflected solar energy. D : distance between tree rows ; H : tree height. Minimum values fit D/H ratios near to 1.

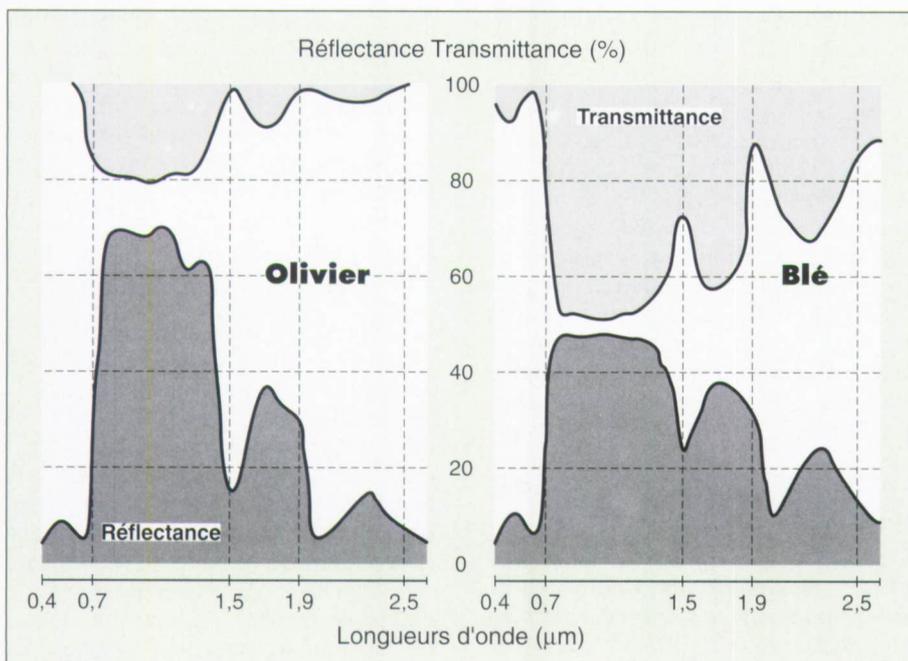


Figure 4. Réflectances et transmittances comparées des faces supérieures de limbes d'olivier et de blé.

La réflectance est très faible dans le visible (fortement absorbée par les pigments chlorophylliens de la feuille, sauf le jaune-vert), elle est très importante dans le proche infrarouge (entre 0,8 et 1,4 µm), surtout pour les sclérophytes. Les transmittances évoluent en sens inverse des réflectances. Le limbe d'olivier est opaque jusqu'à 0,75 µm.

Figure 4. Comparison of light reflexivity and transmissivity of the upper face of olive tree leaves and wheat leaves.

Reflexivity is extremely low in the visible range, but high in the near infra-red range. This is particularly true for sclerophytes. Transmissivity has an opposite pattern. Olive leaves are opaque up to 0.75 µm.

tation est, en revanche, plus riche en bleu et rouge et la photosynthèse y est meilleure quand le rayonnement global incident y reste suffisant. Cependant, les arbres ne sont pas tous équivalents : ainsi l'ombre d'une rosacée (pêcher, merisier) est-elle beaucoup plus riche en RPA que celle d'un olivier ou d'un noyer.

En phase défeuillée, l'ombre du bois, opaque au rayonnement solaire, est « bleue », ce qui signifie que sa composition spectrale est peu différente de celle du soleil. L'énergie arrivant au sol est réduite en proportion de la surface projetée des troncs et des branches. Par ciel clair, l'ombre n'agira sur la photosynthèse des plantes de couverture que pendant les brèves périodes où elle les couvrira.

Pour concevoir des associations agroforestières efficaces, on choisira donc plutôt des arbres à feuillage caduc, à indice foliaire faible, à cimes timides et à ombre portée riche en RPA.

L'éclaircissage des houppiers est une technique importante pour permettre de maintenir de bonnes performances de croissance sous les arbres.

• Les rayonnements énergétiques

Le rayonnement solaire infrarouge, peu absorbé par la végétation chlorophyllienne, est fortement transmis et réfléchi. Il est transformé en chaleur latente par la transpiration et en chaleur sensible par échauffement des tissus et du sol. Plus de 90 % du rayonnement atteignant la végétation herbacée à l'ombre d'un arbre par ciel clair est constitué d'infrarouges solaires. Par ciel brumeux, cette proportion dépend du taux de recouvrement du sol par la végétation dominante. Plusieurs modèles de calcul existent à cet égard [20] mais on dispose encore de peu de données sur les rapports entre les rayonnements direct et diffus dans des peuplements agroforestiers méditerranéens. Celles-ci seraient nécessaires pour les valider.

• Le rayonnement net

Le bilan de tous les rayonnements électromagnétiques d'origine solaire et terrestre, arrivant au sol ou émis par celui-ci, constitue le rayonnement net de la surface considérée. Il est de sens positif le jour (en raison de l'apport solaire) et négatif (par ciel clair) ou quasi nul (par ciel couvert) la nuit. Ses valeurs diurnes sont d'autant plus faibles (par rapport au rayonnement global incident) que la végétation est mieux alimentée en eau et que l'évapotranspiration est plus voisine de son optimum.

Sous un couvert agroforestier, le bilan du rayonnement net au sol est modifié par la présence d'une strate supérieure discontinue. A l'inverse d'une forêt continue [21], des « piégeages » importants d'énergie se produisent sous les arbres, surtout si la strate herbacée est desséchée. Au niveau de cette strate, le rayonnement net est fortement réduit, ce qui limite la consommation en eau. Pour la couronne des arbres, le bilan est encore mal connu, mais sera généralement augmenté, compte tenu des piégeages évoqués précédemment.

Profils de température et d'humidité de l'air dans une agroforêt

La superposition de deux strates végétales, dont la supérieure est discontinue, modifie profondément l'état thermique et hygrométrique de l'air au voisinage du sol. Les modèles établis pour les sous-bois forestiers ne s'appliquent pas à l'agroforêt, pour laquelle il convient de bien distinguer l'espace situé entre les arbres de celui situé sous les arbres.

On observe une accentuation des amplitudes thermiques jour/nuit de 2 à 4 °C entre des arbres espacés (figure 5), alors que ces amplitudes diminuent sous des couverts arborés fermés [21]. Cet effet peut être très bénéfique pour des cultures intercalaires céréalières ou protéagineuses, qui ont besoin d'amplitudes thermiques suffisantes pour stimuler les migrations d'assimilats vers les organes de réserves. Il est encore accentué par des végétations herbacées hautes et hétérogènes (cas des adventices sur friches). En revanche, un sol humide et un

réseau dense de racines superficielles facilitent les transferts thermiques entre l'air et le sol, ce qui peut limiter les amplitudes thermiques nyctémérales [17].

Pour l'humidité de l'air, les interactions entre la culture herbacée et la strate arborée sont complexes, et l'état hydrique du sol doit être pris en compte. L'arbre jouera des rôles différents selon qu'il est feuillé ou non : en phase non feuillée, il a peu d'effet sur les profils thermique et d'humidité,

mais il freine les échanges verticaux ; en phase feuillée, il se crée un niveau d'échanges thermiques très important situé à plusieurs mètres au-dessus de la végétation herbacée, ce qui modifie considérablement les relations entre le sol et l'atmosphère libre. De façon générale, on observe une augmentation de l'humidité absolue moyenne de l'air sous le couvert des arbres, ce qui peut modifier localement le développement des brouillards et rosées.

Évapotranspiration dans une agroforêt

Les évapotranspirations réelles des deux strates de végétation sont interdépendantes [16, 22, 23].

Sous les arbres, il y a un découplage partiel entre l'évapotranspiration des plantes herbacées et la demande climatique générale (figure 6). Ceci induit un découplage parallèle des évapotranspirations réelles des arbres et de la strate herbacée sous-jacente.

Entre les arbres, on observe simultanément une réduction de l'advection (effet brise-vent) et une augmentation de la convection (effet d'albédo conduisant à une augmentation de l'effet de continentalité). En fonction du climat général et de l'extension des arbres, il en résultera, pour la strate basse, des demandes climatiques moyennes, à l'échelle de la parcelle, qui seront réduites (climats à forte advection, tels les climats méditerranéens ventés), ou stimulées (climats à forte convection de type continental). Lors d'une séquence de dessèchement, la strate herbacée non couverte par les arbres est généralement la première à souffrir. La modification du bilan énergétique global qui en résulte se traduit immédiatement par une augmentation de la demande évaporatoire sur les arbres : l'ETR (évapotranspiration réelle) peut largement dépasser l'ETM (évapotranspiration maximale) pour des couronnes d'arbres isolés au-dessus d'une végétation intercalaire desséchée. Individuellement, les arbres transpirent plus en agroforesterie que ceux de volume équivalent au sein d'un peuplement forestier continu. Mais, globalement, la consommation en eau de la strate arborée y est plus faible que dans le cas d'une forêt, par suite de la faible densité des individus ligneux. En situation de bonne alimentation hydrique, les transpirations des deux strates végétales se renforcent mutuellement et limitent la demande évaporative dans l'espace situé entre le sol et les houppiers.

Globalement, l'association arbres-cultures transpire plus que les peuplements purs. Ainsi, on a mesuré pour la seule strate herbacée un gain de 41 % d'ETR sous la couronne de chênes verts de la Sierra Norte d'Andalousie, par rapport à l'extérieur de la couronne [13]. L'augmentation de la

Summary

Towards new agroforestry schemes in temperate and mediterranean climates. I. Agronomical aspects

C. Baldy, C. Dupraz, S. Schilizzi

Mixed cultivation of interacting trees and herbaceous crops are characteristic of agroforestry schemes. Such practices prevailed on arable lands in Mediterranean areas until the late 19th century, but have been progressively replaced by monocrops.

Agroforestry plantations are an alternative proposal to farm forestry plantations. They may have economic and environmental advantages, and the tree/crop association may be very effective if properly designed.

In a two-layer ecosystem (trees and undercrops), interactions between trees and undercrops include competition and facilitation. The following aspects are discussed: impact on the soil's physical properties, water budget at the plot level, and recycling of nutrients. The increase in soil water resources under an agroforestry stand, which is essential in a Mediterranean environment, may result from improved water infiltration during heavy rain.

Micrometeorological, hydrological and agronomical aspects of tree/crop interactions are discussed with a view to assessing their profitability in a Mediterranean climate with severe droughts in the summer, while the impact of a network of agroforestry plots on local climates is analysed.

Agroforestry practices comply with the present requirements for intensified, sustainable and environmentally-friendly agriculture in the European Mediterranean area. Therefore, new agroforestry schemes are proposed. They include grass cultivation in vineyards and orchards, together with new ideas for associations of trees and herbaceous crops. The herbaceous crops may be cover or harvested crops. New schemes are being designed with trees that produce high quality timber, fruit with a high feed value for ruminants, and flowers for bee-keeping. The trees involved, deciduous hardwoods, are more compatible with intercrops than resinous species are. Criteria for matching tree species to herbaceous species in order to achieve effective tree/crop associations are discussed.

The economical aspects of these new agroforestry schemes will be studied thoroughly in a second part to be published soon.

Cahiers Agricultures 1993 ; 2 : 375-86.

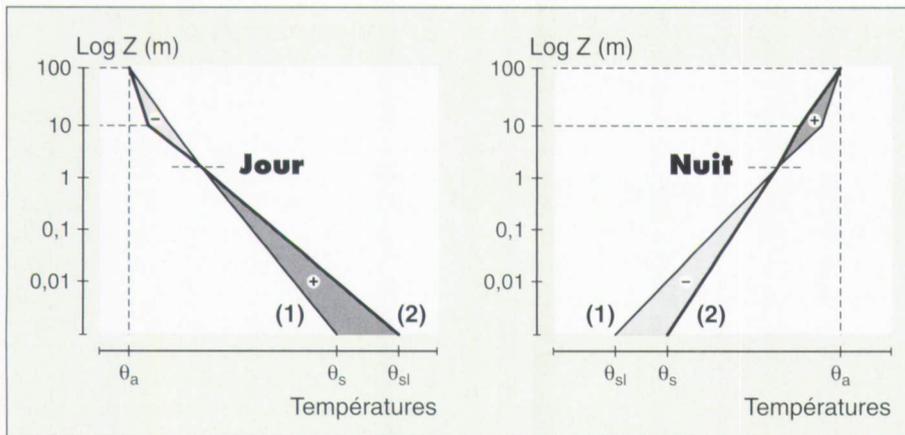


Figure 5. Modifications des échanges thermiques entre le sol et l'air dans une parcelle agroforestière de jour et de nuit.

Les altitudes au-dessus du sol sont exprimées en log.

(1) Profil de température au-dessus d'un champ ouvert.

(2) Profil dans un système agroforestier, entre les arbres. θ_a : température de la masse d'air. θ_s : température de surface dans la zone ouverte. θ_{sl} : température de surface dans la zone protégée.

(+) Effet positif du système agroforestier au voisinage du sol de jour.

(-) Effet négatif la nuit. On provoque une accentuation de l'amplitude thermique nyctémérale.

Figure 5. Thermal transfers between air and soil in an agroforestry plot. Night and day profiles.

Elevations above soil level are on a logarithmic scale.

Temperature profiles on an open field (1) and between tree rows on an agroforestry plot (2).

θ_a : air mass temperature. θ_s : soil surface temperature in an open field. θ_{sl} : soil surface temperature in the agroforestry plot, between tree rows.

Day positive impact (+) and night negative impact (-) in the agroforestry plot. Day-night temperature amplitudes are higher in the agroforestry plot.

mise en réserve d'eau dans le sol permet, malgré des demandes évaporatoires réduites, des transpirations supérieures : l'activité de la végétation herbacée est prolongée dans le temps et sa productivité en bénéficie.

Une association agroforestière valorise donc mieux la disponibilité en eau pluviale, lorsque celle-ci est limitative pour des peuplements homogènes. Il n'est pas exclu que, grâce aux conditions microclimatiques particulières à l'association, l'efficacité moyenne de l'eau transpirée soit améliorée.

Productivité des agroforêts

L'évaluation globale de la productivité d'une agroforêt nécessite la prise en compte simultanée des arbres et des cultures intercalaires, à l'aide de critères tels que les coefficients de rendements équivalents [17, 24] : ceux-ci expriment le gain relatif obtenu en combinant arbres et cultures intercalaires, par comparaison avec un assole-

ment de peuplements forestiers et de cultures agricoles.

• La strate herbacée

On peut s'attendre à une productivité globale améliorée par la meilleure mise en réserve de l'eau pluviale et par les recyclages des ressources en nutriments. De nombreuses études confirment que les associations agroforestières permettent d'obtenir de meilleurs résultats que des associations de plantes de même type biologique (mélanges fourragers, associations de plantes herbacées vivrières).

Quand les cycles de végétation sont décalés, par exemple si l'arbre est défeuillé lorsque la végétation herbacée est active, l'association est généralement très performante. C'est le cas des associations de blé tendre et *Paulownia* en Chine [8], ou des cultures de céréales sous *Faidherbia albida* en Afrique [25]. On peut observer des effets sur les rendements quantitatifs lorsque, par exemple, la présence des

arbres a limité les dégâts d'échaudage dus à des vents chauds et secs sur céréales. Mais des effets sur la qualité des produits récoltés sont aussi signalés, tels qu'une augmentation significative de la teneur en protéines des céréales mûries sous l'ombrage léger des arbres qui débourent [8]. Inversement, certaines contre-performances de cultures intercalaires peuvent s'expliquer par un choix inapproprié des espèces qui composent le couple agroforestier. Pour les cultures herbacées, tous les efforts d'amélioration des plantes ont en effet porté, pendant de longues décennies, sur l'obtention de cultivars dont les rendements sont optimaux en situation de non-compétition interspécifique.

• La strate arborée

La strate arborée peut avoir plusieurs fins : fruits, feuilles, bois, ou divers services de protection. Elle bénéficie de la fertilisation et de l'entretien du sol consécutifs à la gestion de la culture intercalaire. L'absence de compétition entre arbres pendant la plus grande partie de leur vie permet des croissances individuelles rapides. Cependant, les stratégies de sélection et d'amélioration des arbres ont privilégié des critères forestiers ou fruitiers, peu adaptés aux conditions de croissance d'arbres isolés. « L'arbre objectif » en agroforesterie sera très différent de celui recherché en forêt : pour la production de bois, on visera, par exemple, des arbres avec des billes de pied courtes mais parfaites et un houppier étalé mais peu élané. Le modelage architectural de l'arbre visera à faire travailler les feuilles au profit de la bille de pied, et donc à raccourcir au maximum la distance moyenne feuille-tronc. Un schéma similaire a été adopté en arboriculture fruitière moderne, pour la distance moyenne feuille-fruit.

En production fruitière, la présence d'une culture intercalaire de couverture peut avoir un autre intérêt : en été le paillis formé par la culture desséchée ou les résidus de coupe améliore la coloration des fruits et peut hâter la maturation [7], via une augmentation de l'albédo du sol. Les modifications du régime des températures, en particulier l'augmentation des amplitudes jour-nuit due au paillis, agissent également sur le transfert des assimilats vers les fruits.

Quelques associations agroforestières modernes

Plantes de couverture dans des cultures pérennes

Il s'agit d'associations ligneux-plantes herbacées, où la strate herbacée a une fonction de protection et de fertilisation du sol (fixation d'azote). Le choix des types de végétation herbacée à cultiver en association est fondamental.

On peut envisager des graminées pérennes à développement hivernal (fétuques, dactyles, bromes, ray-grass

méditerranéens), entretenues en passant un gyrobroyeur à intervalles réguliers. La récolte d'une ou plusieurs coupes est envisageable, à condition de compenser les exportations par une fertilisation. Un traitement défanant éventuel évitera des reprises de végétation en fin de printemps, lesquelles induiraient une importante compétition pour l'eau avec la culture pérenne.

On peut utiliser aussi des légumineuses pérennes, dont le type est la luzerne. Un inconvénient notable de cette espèce provient de la faible dormance estivale des cultivars les plus répandus et du risque d'apport automnal d'azote au moment de l'aouètement

des ligneux. On a montré, sur le palmier « Deglet Nour », que la qualité des dattes est fortement affectée par une telle libération automnale d'azote [22].

Le choix d'espèces annuelles conduit à de fréquentes opérations culturales pour l'entretien et la réimplantation du couvert. De plus, ces espèces sont souvent à démarrage très vigoureux, donc très compétitives ; c'est notamment le cas des graminées annuelles telles que les ray-grass méditerranéens. Divers essais avec des céréales, des engrais verts d'hiver (moutarde, colza) et des légumineuses annuelles ont été mis en place. Les luzernes annuelles sont capables de se ressemer, mais

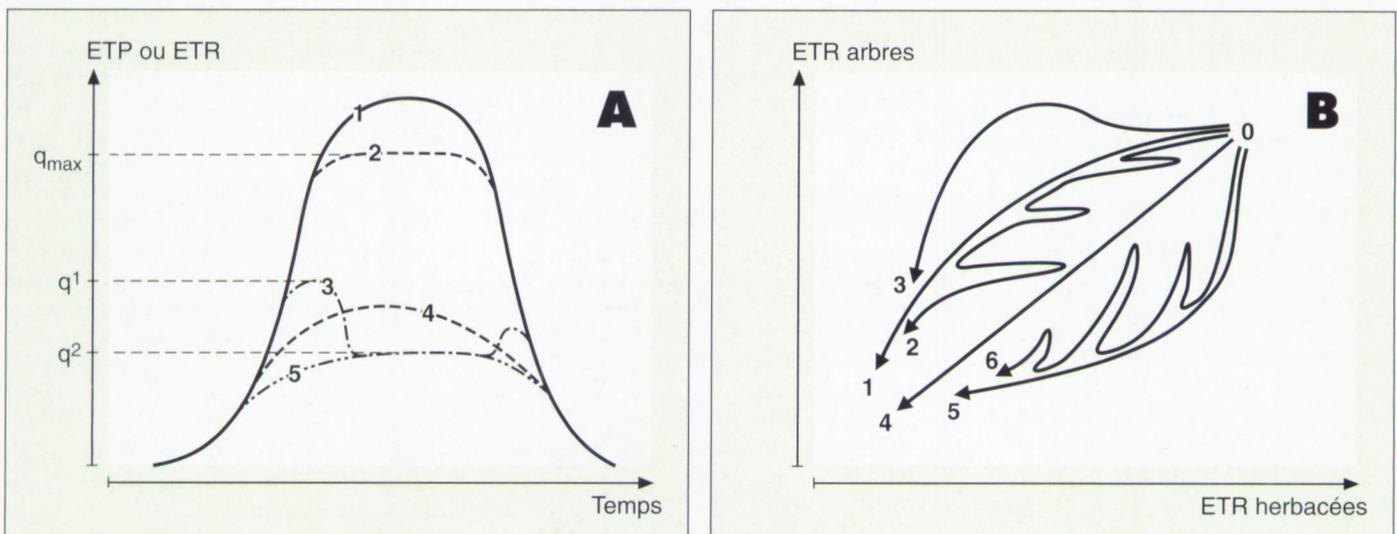


Figure 6. Relations entre les évapotranspirations des strates arborées et herbacées dans une plantation agroforestière.

A. Dynamique diurne de l'évapotranspiration.

(1) Évapotranspiration potentielle (ETP) de la journée considérée.

(2) Évapotranspiration réelle de la strate dominante (ETR), directement exposée au rayonnement, si l'alimentation en eau est suffisante.

(3) ETR de la strate supérieure si l'alimentation en eau est insuffisante.

(4) ETR de la strate inférieure (qui reçoit une énergie solaire réduite) si l'alimentation en eau est suffisante.

(5) ETR de la strate inférieure avec une alimentation en eau insuffisante.

B. Impact de cycles de dessèchement du sol sur les ETR des deux strates.

Arbres et plantes herbacées exploitant des horizons différenciés : période de dessèchement sans pluies (1) ou avec pluies ne rechargeant que les horizons superficiels (2) et impact d'un dessèchement précoce des herbacées sur la demande évaporatoire sur les arbres (3). Arbres et herbacées exploitant les mêmes horizons : espèces ayant des capacités similaires d'extraction de l'eau du sol (4), ou arbres dominés par la concurrence herbacée au cours d'une période de dessèchement sans pluie (5) ou avec pluies rechargeant les horizons superficiels (6).

Figure 6. Relationship between tree and intercrop evapotranspiration in an agroforestry stand.

A. Daily variations of evapotranspiration.

(1) Potential evapotranspiration (ETP).

(2) Real maximum evapotranspiration of the trees (ETR), (no water stress).

(3) ETR of the trees (water stress).

(4) ETR of the intercrop (ETR), (no water stress).

(5) ETR of the intercrop (water stress).

B. Comparison of ETR of trees and intercrops during a soil drying sequence.

Trees and intercrops sucking water from distinct soil layers : no rainy spell (1) or rainy spell with replenishment of superficial water reserves only (2) and effect of an early withering of the intercrop on the real evapotranspiration of the trees (3). Trees and intercrops sucking water from the same soil layers : species with equal soil water extraction capacity (4), or trees dominated by herbaceous species : no rain (5) or with rainy spells (6).

nécessitent un pâturage bien conduit pour se maintenir. Des trèfles souterrains sont également envisageables, selon les types de sol et les conditions climatiques hivernales.

Agroforêts cultivées à vocation fourragère

Cette forme d'agroforesterie fait l'objet d'essais en zone méditerranéenne française depuis 1986 [26]. Il s'agit de cultiver des arbres associés à des cultures fourragères herbacées. Les arbres peuvent fournir divers produits : fruits fourragers, bois de qualité, fleurs d'intérêt apicole, abri pour la culture fourragère intercalaire. Des études analogues sont en cours sous climat tempéré humide [27, 28].

L'installation des arbres, protégés individuellement par des abris résistants, est compatible avec la présence d'animaux. La mise au point de telles protections à des coûts raisonnables a permis de concevoir cette nouvelle forme d'agroforesterie pâturée [29].

L'espace intercalaire peut être valorisé par la culture fourragère pâturée, mais la récolte mécanisée du fourrage est également possible, grâce aux larges espacements des lignes d'arbres qui autorisent une mécanisation quasi normale. Des fourrages pérennes permettent de limiter les interventions culturales dans la plantation d'arbres.

Lorsque l'arbre est lui-même fourragère, l'agroforêt est à vocation fourragère intégrale. C'était le cas des plantations de chênes fruitiers de la péninsule ibérique. Une sélection de variétés fruitières de féviers d'Amérique (*Gleditsia triacanthos* L.), engagée à Montpellier [30], devrait permettre d'obtenir un matériel performant dont le rendement en gousses est considérable. Celles-ci sont riches en protéines, ce qui n'est pas le cas des glands de chênes. Ainsi la ration prélevée par les animaux au sol (gousse de févier sèche + plantes herbacées fourragères) est-elle plus équilibrée.

Cultures intercalaires dans des plantations à large espacement d'arbres à bois précieux

Dans ce cas, l'espace intercalaire entre

les arbres est utilisé par des grandes cultures. Par rapport aux agroforêts à vocation fourragère, on soulignera deux différences majeures : l'absence d'animaux et la fréquence des opérations culturales. L'installation des arbres est moins coûteuse (pas de protection individuelle), mais les contraintes liées à la mécanisation sont plus importantes.

Deux types de cultures intercalaires sont possibles :

— des rotations de grandes cultures ; il s'agira essentiellement de cultures d'hiver telles que blé dur, orge, colza ;
— des cultures délicates nécessitant un abri ; il peut s'agir de cultures maraîchères, horticoles ou de semences.

Dans le cas de parcelles agroforestières irrigables, on peut envisager des cultures d'été (maïs, soja...). Des cultures énergétiques (biocarburants) sont également possibles.

En ce qui concerne les arbres, on s'orientera vers des essences à bois de haute qualité, utilisables en ébénisterie, pour le tranchage, voire le déroulage. L'utilisation d'essences d'arbres inhabituelles en reboisement, adaptées aux larges espacements, capables de valoriser des terres agricoles aux fertilités souvent fortes et produisant du bois de haute qualité est nécessaire. On recherchera un produit que la forêt française, malgré sa grande diversité, n'est pas susceptible de produire dans les cinquante prochaines années.

Dans ce contexte, on a privilégié des essences essentiellement feuillues à croissance rapide, telles que des fruitiers (noyers, merisiers, cormiers, alisiers, poiriers) et des espèces autochtones ou exotiques à bois de qualité (*Paulownia*, érables et frênes, micocouliers, chêne rouge). La qualité du bois de ces espèces n'est pas diminuée lorsque la croissance est rapide [31].

La faible densité de plantation réduit les coûts, permet d'utiliser des plants génétiquement améliorés lorsqu'ils sont disponibles, évite des éclaircies sans rapport financier et, surtout, place les arbres dans une situation de croissance libre (c'est-à-dire sans concurrence entre eux) pendant la plus grande partie de la rotation. On peut ainsi espérer obtenir des croissances rapides, réduire la durée de la rotation et, donc, améliorer l'attrait économique de ces plantations.

Conclusion

Une agroforêt est caractérisée par des interactions multiples entre les strates arborées et herbacées. Les études microclimatiques menées sous couvert forestier ne sont pas transposables aux agroforêts, caractérisées par une hétérogénéité spatiale tridimensionnelle. Des modélisations de la partition des ressources du milieu (eau, lumière, éléments nutritifs) entre les arbres et les cultures intercalaires sont nécessaires pour optimiser la structure et la gestion des agroforêts.

En zone méditerranéenne, l'eau est le premier facteur limitatif de la productivité des associations agroforestières. Le choix des essences d'arbres et des cultures intercalaires doit, dès lors, améliorer l'utilisation de la ressource en eau disponible.

Deux formes modernes d'agroforesteries sur terres cultivables paraissent susceptibles d'être adoptées dans les exploitations agricoles sur les rives européennes de la Méditerranée : l'introduction de plantes de couverture dans des cultures de ligneux pérennes (vignes, vergers fruitiers) ; la plantation à large espacement d'arbres à usages multiples avec des cultures intercalaires. Ces modèles agroforestiers pourraient être transposés à la plus grande partie des régions de grande culture en zone tempérée européenne.

Une étude portant sur les aspects socio-économiques de l'adoption de pratiques agroforestières dans les exploitations agricoles contemporaines, compte tenu des impératifs actuels de la Politique agricole commune, sera présentée ultérieurement ■

Photo 4. Importance de l'éclairage au sol en milieu de journée sous un verger de caroubiers (province de Murcie, Espagne) (cliché C. Dupraz).

Photo 4. Mid-day soil lighting under a carob orchard (Murcia province, Spain).

Photo 1. Association agroforestière de *montado* en Estrémadure (Portugal) : chêne fruitier fourrager et pâturage. Noter l'éclaircissage des houppiers (stimulation de la production de glands et éclaircissement du sol), ainsi que l'effet des arbres sur la couleur de l'herbe en ce début d'été (cliché C. Dupraz).

Photo 1. Agroforestry in Portugal : *montado* in Estremadura Province : fruit fodder oak and sward. Notice the tree crown pruning to stimulate acorn production and provide light to the grass under the tree, as well as the impact of tree crowns on grass productivity and colour at the beginning of summer.

Photo 2. Association agroforestière en France (Grésivaudan) associant noyer fruitier et culture annuelle (ici du soja) (cliché C. Dupraz).

Photo 2. Agrisylviculture in southern France (Grésivaudan) : walnut trees and annual crops (soybean).



Photo 3. Association blé tendre/*Paulownia elongata* en Chine du Nord (District de Woyang, province de Anhui) (cliché Université forestière de Nanjing).

Les espacements recommandés sont de 5 × 20 mètres entre les arbres, avec une éclaircie de 50 % des arbres à 7 ans, immédiatement remplacés par de jeunes arbres. On obtient ainsi des parcelles avec deux populations d'arbres d'âges décalés. Les arbres sont récoltés à 12 ans. 1,3 million d'hectares sont maintenant en culture associée avec le *Paulownia* en Chine.

Photo 3. *Paulownia elongata*/wheat intercropping in China (Woyang District, Anhui province). Optimum planting spacings are 5 × 20 meters, with a 50 % thinning in year 7 : thinned trees are replaced by young seedlings, resulting in an uneven two-storeyed structure. Trees are felled in year 12. 1.3 million hectares are now intercropped with *Paulownia* in China.

Références

1. Editors of Agroforestry Systems. What is agroforestry ? *Agroforestry Systems* 1982 ; 1 : 7-12.
2. Nair PKR. Classification of Agroforestry Systems. *Agroforestry Systems* 1985 ; 2 : 97-128.
3. Byington EK. Agroforestry in the temperate zone. In : MacDicken KG, Vergara NT, eds. *Agroforestry classification and management*. New York : Wiley & Sons, 1991 : 228-89.
4. Hallé F. Un système d'exploitation ancien, mais une interface scientifique nouvelle : l'agroforesterie dans les régions tropicales. In : Blanc-Pamard et al. eds. *Milieux et paysages*. Paris : Masson, 1986 : 37-53.
5. Dupraz C. Prospects for easing land tenure conflicts with agroforestry in mediterranean France : a research approach on intercropped timber orchards. *Agroforestry Systems : Proceedings of the Nanjing International Agroforestry Symposium, Nanjing, April 1992*, sous presse ; 10 p.
6. Nouaim R, Chaussod R, El Aboudi A, Schnabel C, Peltier JP. L'arganier : essai de synthèse des connaissances. In : Riedacker A, Dreyer E, Pafadnam C, Joly H, Bory G, eds. *Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides*. Paris, John Libbey Eurotext 1993 ; 377-88.
7. Baldy C. Aspects écologiques de l'enherbement des vergers : recherche d'une politique de protection de l'écosystème en arboriculture. *Bull Soc Fr Ecologie* 1971 ; 2 : 168-77.
8. Zhu Zhaohua, Cail Mantang, Wang Shiji, Jiang Youxu, eds. *Agroforestry Systems in China*. Singapour : Chinese Academy of Forestry and Intern Canada Development Research Center, 1991 ; 216 p.
9. Maclaren P, ed. *New Zealand agroforestry symposium*. Rotorua : Forest Research Center, 1989 ; 299 p.
10. Dupraz C, Auclair D, Guitton JL. Vingt ans de recherches agroforestières en Nouvelle-Zélande : quels enseignements pour l'Europe ? *Rev For Fr* 1992 ; XLIV : 523-38.
11. Lewis CE, Burton GW, Monson WG, McCormick WC. Integration of pines, pastures, and cattle in south Georgia, USA. *Agroforestry Systems* 1983 ; 1 : 277-97.
12. Gras R. Premiers résultats d'un essai d'entretien du sol en arboriculture fruitière. I. Action sur les propriétés physiques du sol. *Ann agron* 1965 ; 16 : 663-700.
13. Joffre R, Rambal S. Soil water improvement by trees in the rangelands of southern Spain. *Acta Oecologica, Oecologica Plantarum* 1988 ; 9 : 405-22.
14. Eason WR, Tomlinson HF. Root-mycorrhizal interaction in an agroforestry system. *Agroforestry Systems : Proceedings of the Nanjing International Agroforestry Symposium, Nanjing, April 1992*, 1992, sous presse, 8 p.
15. Guyot G, Bensalem M, Delecolle R. Brise-vent et rideaux-abris avec référence particulière aux zones sèches. *Cahiers conservation*, FAO 1986 ; 15 : 385 p.
16. Baldy C. Cultures associées et productivité de l'eau. *Ann agron* 1963 ; 14 : 489-534.
17. Baldy C, Stigter CJ. *Agrométéorologie des cultures multiples en régions chaudes*. Paris : INRA-CTA, 1993 ; 250 p.
18. Stigter CJ. Wind protection in traditional micro-climate management and manipulation. Examples for East Africa. *Prog Bioclimatol* 1985 ; 2 : 145-54.
19. Riou C, Piéri P, Valancogne C. Variation de la vitesse du vent à l'intérieur et au-dessus d'une vigne. *Agric For Meteorol* 1987 ; 39 : 143-54.
20. Sinoquet H, Bonhomme R. Modeling radiative transfer in mixed and row intercropping systems. *Agric For Meteorol* 1992 ; 62 : 219-40.
21. Étienne M, Hubert D. Relations herbe-arbre : état des connaissances. *Fourrages* 1987 ; hors série : 153-65.
22. Baldy C. *Agrométéorologie et développement des régions arides et semi-arides*. Paris : INRA, 1986 ; 114 p.
23. Berbigier P, Diawara A, Loustau D. Etude microclimatique de l'effet de la sécheresse sur l'évaporation d'une plantation de pins maritimes et du sous-bois. *Ann Sci For* 1991 ; 22 : 157-77.
24. Willey RW. Intercropping : its importance and research needs. I. Competition and yield advantages. *Field Crop Abst* 1979 ; 32 : 1-10.
25. CTFT. *Faidherbia albida*. Nogent-sur-Marne : Centre technique forestier tropical Éd. 1991 ; 72 p.
26. Dupraz C, Lagacherie M. Culture de feuillus à bois précieux en vergers pâturés sur des terres agricoles du Languedoc-Roussillon : le réseau expérimental APPEL. *Forêt méditerranéenne* 1990 ; 12 : 447-57.
27. Montard FX, Guitton JL, Rapey H. Demain l'association arboriculture-élevage pour la production de bois de qualité. Une nouvelle forme de mise en valeur ? In : *Des régions paysannes aux espaces fragiles*. Clermont-Ferrand : Cerame, 1992 ; 767 p.
28. Guitton JL, De Montard FX, Rapey H. Agroforesterie moderne en Auvergne ; principes et premier bilan d'une expérimentation multilocale. *Cahiers d'Informations Techniques du Cemagref* 1991 ; 81, 7 p.
29. Dupraz C. Aspects techniques des reboisements en terres agricoles. *Forêt méditerranéenne* 1990 ; 12 : 429-31.
30. Dupraz C. Un aliment concentré pour l'hiver, les gousses de *Gleditsia triacanthos* L. In : *Diversification des systèmes d'élevage et gestion forestière en zone de garrigue et de montagne méditerranéenne sèche*. Montpellier : INRA 1990 : 83-8.
31. Nepveu G. L'utilisation des bois de frêne et de merisier : aptitudes technologiques, facteurs de variabilité. *Rev For Fr* 1992 ; XLIV : 142-9.

Résumé

Les pratiques d'agroforesterie consistent à cultiver ensemble arbres et plantes herbacées, en étroite interaction sur les mêmes parcelles. Sous climat méditerranéen, ces pratiques, dominantes jusqu'au XIX^e siècle sur les terres arables, ont été progressivement abandonnées au profit des cultures homogènes. On présente ici une étude synthétique des effets microclimatiques, hydrologiques et agronomiques, à l'échelle de la parcelle, des associations arbres-plantes herbacées sous des climats à forte contrainte hydrique estivale. L'impact des parcelles agroforestières sur les climats zonaux est également abordé.

Il en ressort que les pratiques agroforestières peuvent répondre très favorablement aux impératifs d'extension et de respect de l'environnement, aujourd'hui prioritaires pour l'agriculture européenne.

Dans cette perspective, de nouvelles associations agroforestières modernes sont proposées. Elles vont de l'enherbement permanent des cultures fruitières ligneuses (vignes, arbres fruitiers) aux associations inédites d'arbres à usages variés (bois de qualité, fourrage) avec des cultures intercalaires. Les arbres retenus sont des feuillus décidus, qui se prêtent mieux aux associations de culture que les résineux. On précise les critères de choix des espèces ligneuses et herbacées pour obtenir des associations agroforestières conviviales et performantes sous climat méditerranéen.

Dans une seconde partie à paraître, les aspects économiques de ces nouvelles agroforesteries seront analysés.