

WALTER STEENBOCK
FABIANE MACHADO VEZZANI
ILUSTRAÇÕES DE CLAUDIO LEME

AGROFORESTERIE

**Apprendre à cultiver
avec la nature**

 **BAMBUAL**
editora

**Walter Steenbock
Fabiane Machado Vezzani**

Agroforester

Apprendre à cultiver avec la nature

Traduit du portugais brésilien¹

Titre originale :

Agrofloresta aprendendo a produzir com a natureza

Première édition :2018

¹ Traduction par Jean-Luc Galabert

Table des matières

Présentation.....	5
Partie 1 Systèmes vivants.....	8
Les systèmes agroforestiers comme systèmes vivants.....	14
Le rôle de la photosynthèse.....	17
Recherche de l'efficacité photosynthétique dans les systèmes agroforestiers.....	21
Le rôle de la succession écologique.....	25
Espèces pionnières.....	27
Espèces secondaires.....	27
Espèces climaciques.....	28
Implication de l'existence d'une succession écologique.....	28
Genèse de la pratique d'élagage.....	33
Sol, résultat des pratiques agroforestières.....	34
Gestion des sols en agroforesterie.....	42
Les voies de la biodiversité.....	46
Gestion de la biodiversité dans les systèmes agroforestiers.....	49
Partie 2 Directives générales pour la pratique agroforestière.....	56
1. Identifier l'espace de pratique agroforestière.....	56
2. Mise en œuvre d'un système agroforestier.....	60
3. Gestion initiale des graminées et des espèces à cycle court.....	75
4. Gestion des agroforêts matures.....	77
4.1 Taille de stratification.....	80
4.3 Taille des arbres fruitiers.....	81
4.4 Taille d'élimination.....	82
4.4 Entretien de la taille.....	83
5. « Compléter » les agroforêts.....	83
6. Renouvellement agroforestier.....	83
Références citées.....	85

Présentation

Au sens large, les systèmes agroforestiers sont des combinaisons d'éléments arborés avec des éléments herbacés et/ou animaux, organisés dans l'espace et/ou dans le temps. La législation brésilienne, dans différents instruments juridiques², a défini les systèmes agroforestiers comme « des systèmes d'utilisation et d'occupation des sols dans lesquels des plantes ligneuses pérennes sont gérées en association avec des plantes herbacées, arbustives, arboricoles, agricoles et fourragères dans une même unité de gestion, selon une disposition spatiale et temporelle, avec une grande diversité d'espèces et d'interactions entre ces composants ».

Lorsqu'ils se caractérisent par une grande diversité d'espèces et par l'occupation verticale de plusieurs strates, les systèmes agroforestiers sont communément appelés, dans la littérature, systèmes agroforestiers multi-strates³.

Bien que différentes définitions des systèmes agroforestiers caractérisent ces zones, en gros, comme des consortiums entre arbres et cultures agricoles, il est important de souligner, dans ces systèmes, le soin apporté à la gestion de la luminosité, de la productivité primaire, de la succession naturelle, du recyclage des nutriments et des relations écologiques.

En d'autres termes, plutôt que d'identifier les composants d'une agroforêt – arbres, arbustes et cultures agricoles –, il est important de caractériser les interventions ou les pratiques de gestion qui sous-tendent cette structure. À titre d'exemple, on peut caractériser une place comme un lieu qui contient des jeux pour enfants, tels que des toboggans, des balançoires et des bascules. Cependant, ce sont les enfants qui se balancent, jouent dans le sable, tournent avec leur grand-père, jouent au ballon, montent ou descendent du toboggan ou font du vélo qui font la place publique.

De la même manière, si nous ne tenons pas compte des éléments qui définissent la structure agroforestière, nous courons le risque de maintenir la même logique productive d'artificialisation des agroécosystèmes, courante dans l'agriculture conventionnelle, pour la production agroforestière.

Dans l'agroforesterie, il ne s'agit pas d'artificialiser les conditions de germination et de croissance des espèces d'intérêt, mais de potentialiser les processus naturels pour optimiser la production, tant des espèces d'intérêt que de la biodiversité dans son ensemble. C'est précisément dans cette différence d'orientation du processus de production que la pratique agroforestière peut contribuer à la durabilité de la production alimentaire.

Pour Götsch (1995), « les systèmes agroforestiers, menés selon les principes de l'agroécologie, transcendent tout modèle prêt à l'emploi et suggèrent la durabilité en partant de concepts fondamentaux de base, en tirant parti des connaissances locales et en concevant des systèmes adaptés au potentiel naturel du lieu ». À partir de cette définition, Götsch propose qu'« une intervention est durable si le bilan énergétique complexe et le bilan de vie sont positifs, tant dans le sous-système où cette intervention a été réalisée que dans l'ensemble du système, c'est-à-dire dans le macro-organisme qu'est la planète Terre ; la durabilité ne sera réellement atteinte que lorsque

2 Brésil, 2009 ; Brésil, 2011

3 Angel-Pérez & Mendoza, 2004 ; Benjamin et al., 2001 ; Caja-Giron & Sinclair, 2001 ; Staver et al., 2001 ; Granados, 2005 ; Silveira, 2005 ; Holguin et al., 2007

*nous aurons des agroécosystèmes similaires dans leur forme, leur structure et leur dynamique à l'écosystème naturel et original du lieu d'intervention (...) ».*⁴

Cette conception s'inscrit dans la pensée contemporaine en matière de conservation de l'environnement, qui accorde de plus en plus d'importance à l'utilisation durable de la biodiversité comme paradigme et, dans ce paradigme, à l'implication de la dynamique de la biodiversité associée à la dynamique de l'utilisation humaine.

De plus en plus, la nature est conçue non pas comme une image statique, dans laquelle la durabilité de l'utilisation représente quelque chose comme la possibilité de prélever un petit morceau de cette image sans compromettre son intégrité – ce qui serait en fait impossible. L'utilisation durable n'est possible que dans la pratique de la contribution de cette utilisation aux processus naturels, dans le sens croissant de l'intégration, de l'échange et de l'augmentation de la biodiversité et de la productivité.

La conception géologique, climatique, biogéographique, évolutive et écologiquement dynamique de la biodiversité indique que, plus que la préservation des espèces ou des communautés de manière isolée, l'objectif central de la conservation biologique est de permettre la continuité des processus évolutifs et écologiques⁵. Richard Primack, l'un des représentants les plus éminents de la biologie de la conservation actuelle, décrit, avec d'autres collègues, que si nous pensons métaphoriquement que la vie est comme la musique et que nous espérons que la musique continue à vibrer, alors nous ne devons pas chercher à conserver les instruments de musique dans des vitrines et empêcher les êtres humains de les jouer, mais plutôt encourager les musiciens à pincer délicatement les cordes d'un quatuor, à faire résonner les tambours et à respirer avec les flûtes, en maintenant le mouvement musical adapté au tempo. C'est dans cette perspective que la biodiversité sera abordée au niveau des gènes, des populations, des espèces, des communautés biologiques, des écosystèmes et des régions⁶.

Dans cette métaphore, pratiquer l'agroforesterie, c'est percevoir et jouer la musique. La pratique agroforestière consiste à saisir et à comprendre comment les processus vitaux, les cycles biogéochimiques et les relations écologiques se déroulent, en identifiant comment les optimiser pour augmenter la fertilité, la productivité et la biodiversité dans cet espace.

Cette identification doit sans aucun doute s'appuyer sur les connaissances accumulées, tant dans le domaine académique que dans celui de la production, c'est-à-dire sur l'utilisation des connaissances scientifiques et du savoir écologique local. Mais cette identification implique également, et tout aussi important, de « demander » à l'environnement ce qu'il fait pour accroître la fertilité et la biodiversité. Ainsi, pratiquer l'agroforesterie consiste à apporter les outils de la connaissance pour les utiliser dans les processus naturels de cet espace, à ce moment précis, dans un mouvement constant et équilibré entre perception et pratique. En d'autres termes, pratiquer l'agroforesterie, c'est maintenir un dialogue constant avec l'environnement naturel, discuter avec ses processus et

4 Götsch, E. Break-through in agriculture. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1995. 22 p.

5 Pickett, S.T.A.; Rozzi, R. The ecological implications of wolf restoration: contemporary ecological principles and linkages with social processes. In: SHARPE, V. A.; Norton, B.; Donnelley, S. (Eds). Wolves and human communities: biology, politics, and ethics. Washington, DC: Island Press, 2000. p. 171-190.

6 Rozzi, R.; Feisinger, P.; Massardo, F.; Primack, R. Que Es La Diversidade Biológica? In: Primack, R.; Rozzi, R.; Feisinger, P.; Dirzo, R.; Massardo, F. Fundamentos de conservación biológica. México DF, México: Fondo de cultura económica, 2001. 797 p.

ses relations, demander ce qui est le plus adapté à son flux et, en apportant sa contribution à ce flux, recevoir en retour la production alimentaire.

Ainsi, pratiquer l'agroforesterie, c'est aussi s'éduquer à l'environnement.

Ce livre présente quelques concepts d'écologie et discute de leur application dans la pratique de l'agroforesterie. Il ne part toutefois pas d'hypothèses sur l'application de ces concepts, mais principalement de la « mise sur papier », même de manière fragmentée, de l'applicabilité de ces concepts, expérimentée notamment par des agriculteurs familiaux associés à Cooperafloresta (Association des agriculteurs agroforestiers de Barra do Turvo et Adrianópolis). Depuis près de deux décennies, les agriculteurs et les techniciens de ces municipalités, situées dans la haute vallée du Ribeira, entre le Paraná et São Paulo, produisent des aliments tout en améliorant la fertilité et la conservation des sols, la biodiversité, l'autonomie et la sécurité alimentaire, grâce à l'agroforesterie. Aujourd'hui, dans cette région, plus d'une centaine de familles ont choisi l'agroforesterie comme mode de production et de reproduction familiale, démontrant ainsi la viabilité de cette voie.

La première partie de cet ouvrage présente et discute des concepts écologiques dans le contexte de la pratique de l'agroforesterie. La deuxième partie décrit brièvement comment les familles d'agriculteurs de Cooperafloresta s'y prennent.

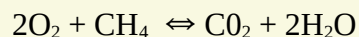
Loin de prétendre détailler en profondeur les concepts, et encore plus loin de prétendre décrire tous les aspects liés à la pratique de l'agroforesterie, ce livre vise à aider les étudiants, les agriculteurs et les enseignants à utiliser l'agroforesterie comme une voie, ou comme une musique.

Partie 1

Systèmes vivants

Les systèmes de production agricole, tels que les systèmes agroforestiers, sont des systèmes vivants. La compréhension des systèmes vivants, de leurs caractéristiques et de leurs principes, est fondamentale pour comprendre le fonctionnement des systèmes de production agricole.

La théorie de Gaïa représente clairement le fonctionnement des systèmes vivants. Cette théorie a été élaborée dans les années 60, alors que le chimiste James Lovelock collaborait au projet de recherche lunaire et planétaire du Jet Propulsion Laboratory à Pasadena, en Californie (États-Unis). L'un des objectifs du projet était de découvrir s'il y avait de la vie sur la planète Mars. Pour cela, Lovelock a étudié le fonctionnement des êtres vivants terrestres et s'est rendu compte que toute forme de vie extrait de l'énergie et de la matière de l'environnement et rejette des sous-produits de son activité. Les sous-produits des plantes, des animaux et des microorganismes sont des gaz (dioxyde de carbone [CO₂], méthane [CH₄] et oxygène [O₂]). Il a ensuite analysé l'atmosphère des planètes Terre et Mars. L'étude a révélé une forte concentration d'oxygène et de méthane et une faible concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre. Une composition tout à fait inattendue, compte tenu de la loi chimique de forte interaction entre l'oxygène et le méthane, qui forment du dioxyde de carbone et de l'eau, selon la réaction :



Cependant, l'analyse de l'atmosphère martienne a révélé le contraire : une faible concentration en oxygène et en méthane et une forte concentration en dioxyde de carbone, c'est-à-dire conforme à la loi chimique.

À ce moment-là, Lovelock a invité la biologiste Lynn Margulis à interpréter les résultats de cette recherche et, ensemble, ils ont conclu que la différence entre les atmosphères des deux planètes réside dans l'existence de la vie sur Terre ! L'atmosphère terrestre est un mélange instable de gaz. En d'autres termes, les gaz sont continuellement libérés comme sous-produits des systèmes vivants et réagissent entre eux. Ainsi, la concentration des gaz est maintenue grâce aux êtres vivants et, en même temps, la concentration des gaz est favorable à la continuité des êtres vivants. La théorie de Gaïa de Lovelock et Margulis affirme que la vie est le résultat des conditions environnementales produites par les systèmes vivants en interaction avec les systèmes non vivants.

La vie est le résultat de la vie elle-même !

La vie sur la planète Terre est un réseau de relations complexes, et ce réseau est le milieu propice à l'existence de la vie. Comme l'ont affirmé James Lovelock et Lynn Margulis : « L'évolution des organismes est si étroitement liée à l'évolution de leur environnement physique et chimique qu'ensemble, elles constituent un processus évolutif unique, qui est autorégulateur » (Lovelock, 2006). Tout comme la planète Terre, il en va de même pour les systèmes agricoles, en l'occurrence les agroforêts.

Les systèmes vivants sont fermés quant à leur organisation ; ouverts en termes d'énergie et de matière, utilisant un flux constant pour se produire, se réparer et se perpétuer ; et fonctionnent dans un état loin de l'équilibre thermodynamique, un état dans lequel de nouvelles structures et de nouvelles formes d'ordre peuvent apparaître spontanément, ce qui conduit au développement et à l'évolution (Capra, 2005).

En ce qui concerne l'aspect des systèmes vivants fermés quant à leur organisation, réfléchissons à ceci : de la cellule aux poissons, aux oiseaux, aux herbes, aux bovins, aux arbres... tous les organismes vivants ont une limite physique. Et, à l'intérieur de cette limite physique, il existe une organisation spécifique de leurs composants, qui les caractérise comme une cellule, un poisson, une herbe, un bovin, un arbre. Ce qui se passe, c'est que cette organisation des composants suit un modèle de réseau, c'est-à-dire que tous les composants sont interconnectés dans un réseau de relations complexes et non linéaires. Si nous observons attentivement, nous remarquons que le modèle de réseau se répète dans tout le monde vivant. Bertalanffy, en 1950, a affirmé dans sa Théorie générale des systèmes que « le modèle en réseau est commun à toutes les formes de vie » ⁷

Le schéma ci-dessous, illustre comment un réseau de molécules constitue une cellule ; un réseau de cellules constitue un organisme ; un réseau d'organismes constitue un écosystème. Ce sont des réseaux à l'intérieur de réseaux, et c'est dans cette organisation que se forme le « réseau alimentaire » de la planète (et de l'Univers...).

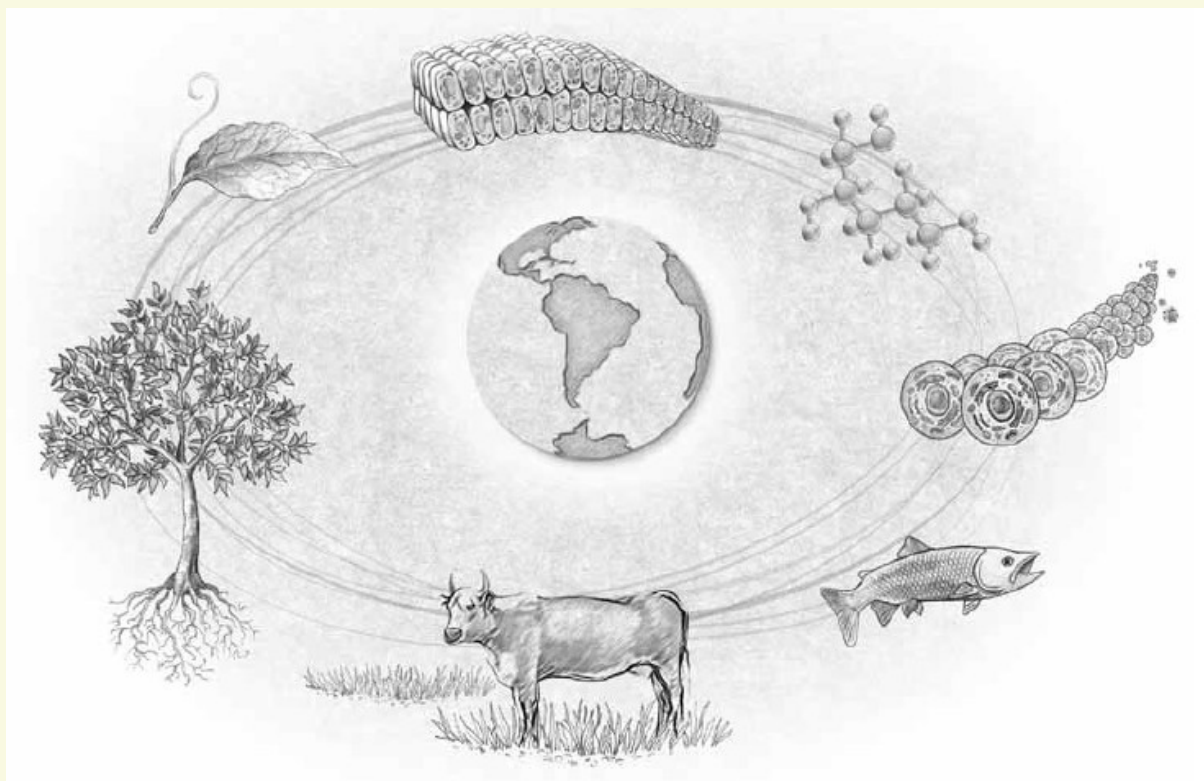


Fig.1. Représentation du modèle de réseau, des molécules aux organismes supérieurs.

Le caractère ouvert des systèmes vivants repose sur le fait que les organismes, pour rester en vie, doivent se nourrir d'un flux continu d'énergie et de matière assimilées à partir de l'environnement. C'est ainsi que les systèmes vivants sont ouverts du point de vue énergétique et matériel, utilisant un flux constant d'énergie et de matière pour se produire, se réparer et se perpétuer. Tous les organismes vivants produisent continuellement des déchets, et ce flux d'énergie et de matière

7 von Bertalanffy. The theory of open systems in physics and biology. Science, 111: 23 – 29, 1950.

(nourriture et excréments) détermine la place qu'ils occupent dans le réseau alimentaire. En d'autres termes, dans ce flux, ce dont chacun a besoin et ce qu'il libère définit sa place dans la chaîne alimentaire, comme le montre le schéma infra. En ce sens, on peut dire en paraphrasant avec Fritjof Capra que « les limites entre chacun de ces systèmes n'est une séparation absolue, mais une frontière identitaire ; tous les systèmes vivants communiquent entre eux et partagent leurs ressources, transcendant les limites. Dans un écosystème, les échanges d'énergie et de matière sont soutenus par une coopération généralisée »⁸.

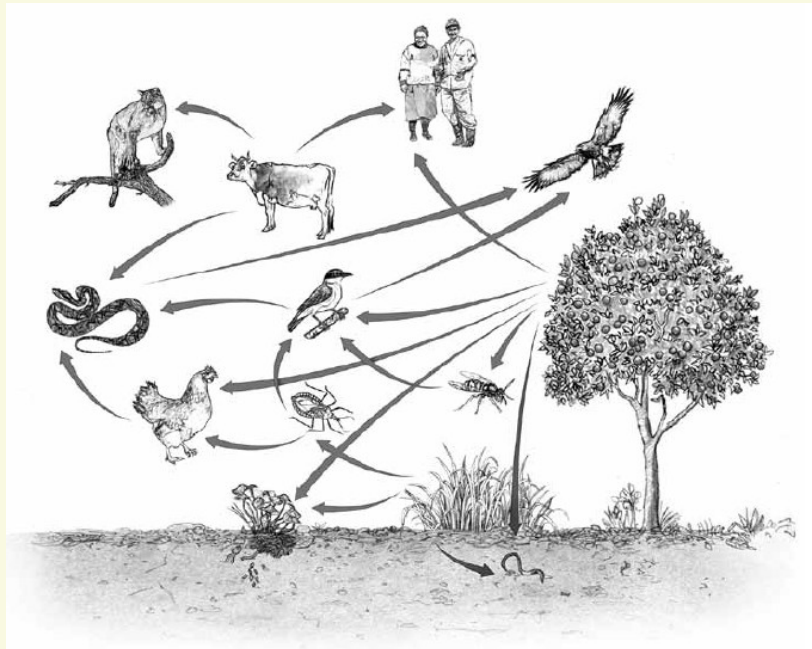


Fig. 2. Représentation schématique d'un réseau alimentaire.

Le flux constant d'énergie et de matière qui caractérise les systèmes vivants fait que ces systèmes sont toujours loin de l'équilibre thermodynamique.

Si l'on se réfère à la thermodynamique classique, les systèmes sont classés en systèmes isolés, ceux qui n'échangent ni énergie ni matière avec leur environnement ; systèmes fermés, ceux qui échangent de l'énergie, mais pas de matière avec leur environnement ; et systèmes ouverts, ceux qui échangent à la fois de l'énergie et de la matière avec leur environnement. La définition de l'« équilibre » d'un système provient de la thermodynamique classique et est considérée comme le point de production minimale d'énergie libre qu'un système fermé atteint. Observez le schéma 3, qui représente l'énergie libre d'une réaction chimique (énergie libre de Gibbs), définie comme un système fermé en thermodynamique classique. Le point d'« équilibre » est atteint lorsque tous les réactifs ont réagi et produit les produits. L'énergie libre était maximale au début de la réaction, avant que les réactifs ne soient mélangés, et a atteint une valeur minimale lorsque tout le produit a été formé. À partir du point d'équilibre, la réaction cesse. Par conséquent, l'équilibre thermodynamique est un état caractéristique des systèmes fermés, dans lequel le système, après avoir reçu une quantité d'énergie et de matière, tend vers un état stationnaire, où il n'y a plus de changements dans les concentrations des réactifs ou des produits. Comme les systèmes ouverts reçoivent en permanence un flux d'énergie et de matière, l'équilibre dans les systèmes vivants n'est jamais atteint.

8 Fritjof Capra, *The Tao of Physic* (1975), *Le tao de la physique*, Editions Sand, 1985, pour la traduction française.

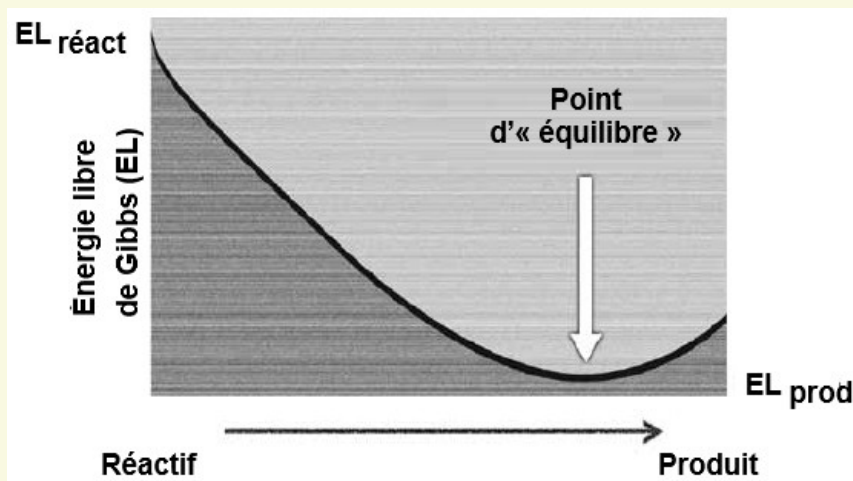


Fig. 3. Représentation schématique de la variation de l'énergie libre de Gibbs (EL) pendant la réaction entre les réactifs (reag) se transformant en produits (prod) et indiquant le point d'« équilibre » dans un système fermé (une réaction chimique). Source : adapté de Russel (1994).

Ainsi, les systèmes vivants fonctionnent dans un état éloigné de l'équilibre thermodynamique. C'est dans cet état de non-équilibre que les systèmes vivants ont la capacité de s'auto-organiser et de produire de nouvelles structures et de nouvelles formes d'ordre, se développant et évoluant. L'auto-organisation se produit parce que les systèmes sont configurés selon un modèle de réseau de relations, qui ont un lien de cause à effet. Si l'on observe le schéma 4, proposée par Capra (1996) pour représenter la configuration des systèmes ouverts, les cercles représentent la limite physique des éléments qui composent un système donné, et les lignes droites représentent les relations.

Nous constatons que les limites des éléments n'ont pas d'importance ; ce qui importe, ce sont les relations à l'intérieur et entre eux. Les éléments eux-mêmes sont le résultat d'un réseau de relations, et c'est à travers les relations entre eux que les éléments sont interconnectés, ce sont les « réseaux dans les réseaux », comme l'a appelé Capra (1996).

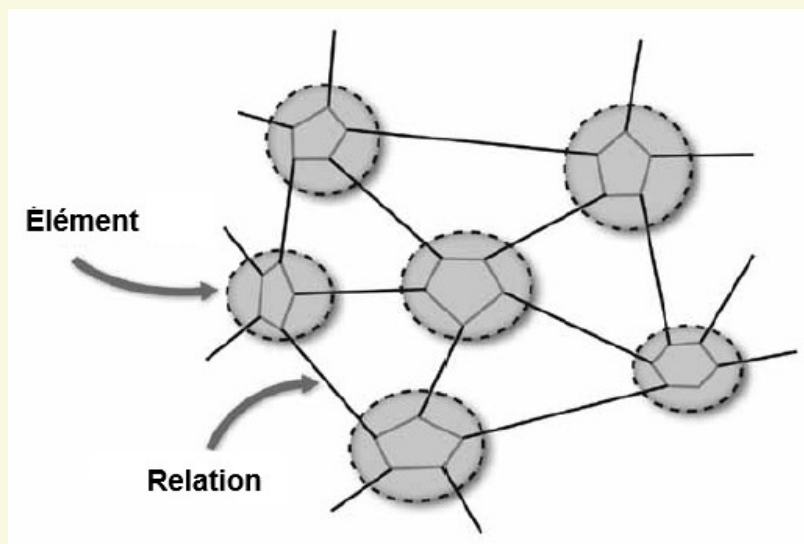


Fig. 4. Configuration d'un système ouvert. Les cercles en pointillés représentent les éléments ; les lignes continues représentent les relations au sein des éléments et entre eux. Source : F. Capra (1996). éléments relations.

Ainsi, tout message reçu à un certain point de ce système parcourra tout le réseau de relations, et le système s'auto-organisera en fonction de ce nouveau message reçu, comme le montre le schéma 5.

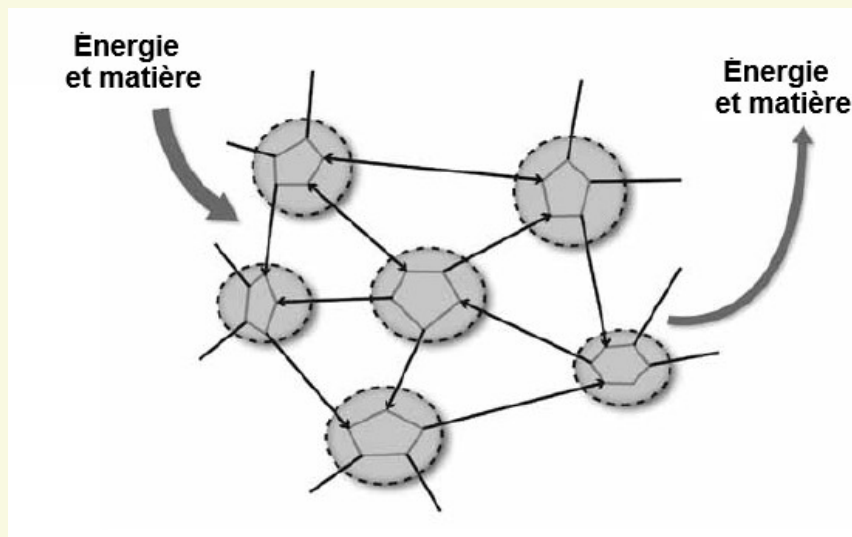


Fig. 5.Représentation schématique de la configuration du modèle de réseau d'un système ouvert, indiquant le passage du flux d'énergie et de matière. Source : adapté de Capra (1996).

Représentation schématique de la configuration du modèle de réseau d'un système ouvert, indiquant le passage du flux d'énergie et de matière. Source : adapté de Capra (1996).

Dans un premier temps, l'énergie et la matière reçues par le système se dissipent entre le réseau de relations et provoquent une instabilité ; cependant, c'est avec cette même énergie et cette même matière que le système s'auto-organise dans un autre état d'ordre à un niveau de complexité différent, évoluant et se développant en fonction des caractéristiques du flux d'énergie et de matière.

Le schéma 6 illustre ce processus. Si l'ampleur du flux d'énergie et de matière qui passe par les relations non linéaires entre les éléments augmente, de nouvelles structures et formes de comportement émergent spontanément à des niveaux énergétiques successivement plus élevés, qui se caractérisent par une diversité et une complexité croissantes de la structure et de ses formes de comportement, résultat de relations complexes entre les éléments et de la grande quantité d'énergie et de matière retenues. Le système tend vers le développement.

D'autre part, la modification du flux peut générer de l'énergie et de la matière, de l'énergie et de la matière en décomposition, lorsque l'ampleur de l'énergie et de la matière qui traverse le système diminue et, à travers le courant de relations non linéaires entre les éléments, un nouvel état d'ordre émerge, mais avec une quantité moindre d'énergie et de matière retenues.

Lorsque cela se produit, le déroulement du flux entraîne l'apparition d'états d'ordre à des niveaux énergétiques successivement plus bas, qui se caractérisent par une simplicité croissante de la structure et de ses formes de comportement, résultat de relations simples entre les éléments et d'une faible quantité d'énergie et de matière retenues.⁹

9 Fabiane Machado Vezzani João Mielniczuk, O Solo como Sistema, edição Curitiba, 2011. Voir plus récemment, Anghinoni I and Vezzani FM. Systemic Soil Fertility as product of systems self-organization resulting from management. Rev Bras Cienc Solo. 2021;

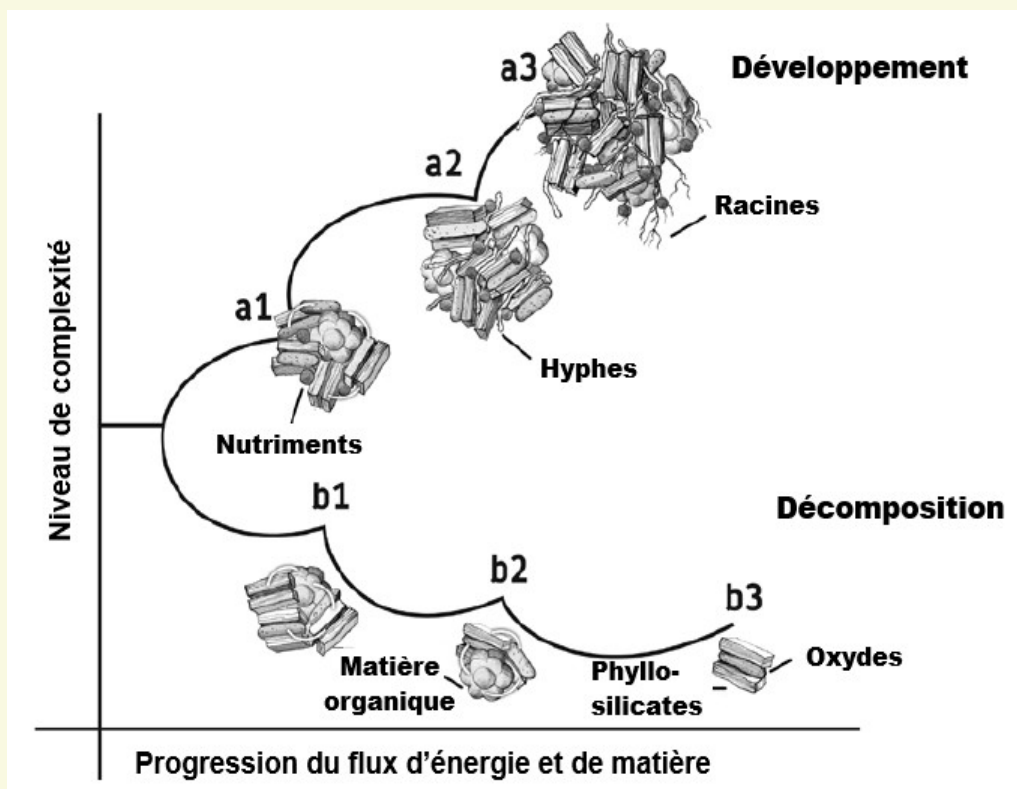


Fig. 6. Représentation schématique du chemin suivi par le système (ligne continue), qui s'auto-organise en états d'ordre (indiqués par des lettres et des chiffres) à différents niveaux de complexité en fonction du flux d'énergie et de matière. Cette représentation illustre également le comportement du système sol-plantes-organismes, où les particules minérales, la matière organique et les racines forment des agrégats de structure de plus en plus complexe (état d'ordre a3) ou de plus en plus simple (état d'ordre b3), comme cela sera détaillé plus loin (voir schéma 20). Source : Inspiré de Prigogine (1996).

À chaque état d'ordre aux différents niveaux de complexité correspondent des propriétés émergentes. Les propriétés émergentes du système sont la manifestation des relations non linéaires entre les éléments qui composent chaque état d'ordre. À mesure que le niveau de complexité augmente, la structure devient plus diversifiée et complexe, et une plus grande quantité d'énergie et de matière est retenue (voir l'état d'ordre a3 dans le schéma 6). L'augmentation du nombre d'éléments du système entraîne une augmentation des relations non linéaires, ce qui se traduira par une augmentation de ses propriétés émergentes.

Par conséquent, à un niveau de complexité élevé, les propriétés émergentes sont plus nombreuses, ce qui permet au système de fonctionner dans diverses situations et, ainsi, de maintenir son intégrité face aux perturbations. D'autre part, dans les systèmes de structure plus simple (état b3, schéma 6), le nombre et la fonction des propriétés émergentes sont faibles, et le système a une capacité moindre à maintenir son intégrité.

En comprenant ces trois aspects du fonctionnement des systèmes vivants – fermés dans leur organisation, ouverts dans leur flux et capables d'auto-organisation –, la définition de Ilya Prigogine devient claire lorsqu'il affirme que les systèmes vivants sont des structures dissipatives¹⁰, car la même énergie qui dissipe le système (celle qui passe par le réseau de relations non linéaires à travers le flux) est l'énergie qui génère l'ordre. L'ordre et le désordre sont constamment présents dans les systèmes vivants, générant développement ou décomposition.

10 Ilya Prigogine, 1996 ; 2002 ; Ilya Prigogine & Isabelle Stengers, 1992 ; 1997

Par conséquent, les réseaux vivants se créent ou se recréent continuellement par la transformation ou le remplacement de leurs composants (Capra, 2005). Ce processus d'autogénération ou d'autocréation a été défini par Maturana & Varela (2001) comme l'autopoïèse, dans laquelle la définition systémique de la vie trouve ses principaux fondements. Les systèmes vivants subissent des changements structurels continus tout en préservant leurs modèles d'organisation en réseaux de relations et en se constituant eux-mêmes. La caractéristique d'autopoïèse des systèmes vivants est ce qui les différencie clairement des systèmes non vivants, c'est-à-dire que les systèmes vivants ont la capacité de se reproduire eux-mêmes !

C'est pourquoi le phénomène de la vie doit être compris comme une propriété du système dans son ensemble (Capra, 2005). La vie n'existe que grâce aux relations entre ses composants, chacun remplissant sa fonction, ce qui permet aux autres composants de rester actifs également. Et cette caractéristique s'étend à la relation entre le système vivant et son environnement. L'environnement est le résultat des relations avec les systèmes vivants, et les systèmes vivants sont le résultat des relations avec l'environnement, comme nous l'expliquent Lovelock et Margulis dans la théorie de Gaïa.

Les systèmes agroforestiers comme systèmes vivants

À partir de ce qui précède, il apparaît clairement que les systèmes vivants, organisés dans les différents écosystèmes et communautés comme nous l'avons vu ci-dessus, sont le résultat d'un long processus évolutif, guidé par l'apprentissage et l'échange entre les êtres vivants.

Dans ce processus, les structures de la vie, à leurs différents niveaux (cellules, tissus, organes, individus, communautés, écosystèmes, etc.), se sont organisées de manière à rendre possibles les processus vitaux. Ceux-ci, à leur tour, permettent l'existence des formes structurelles au niveau individuel et collectif.

Pour que cela soit possible, la vie a créé des mécanismes d'organisation, de complexification et d'échange, dans des structures dissipatives et des systèmes autopoïétiques.

Dans une cellule, par exemple, les membranes établissent non seulement les limites des différents organites cytoplasmiques, spécialisés dans différents processus vitaux, mais créent également les conditions appropriées à ces processus, à partir de l'absorption et de la transformation de substances. Au cours des processus vitaux, d'autres substances sont formées, libérées à l'extérieur de l'organite, qui sont utilisées dans d'autres processus, comme le montre le schéma 7, en prenant comme exemple le fonctionnement de la mitochondrie, organite responsable de la respiration cellulaire.

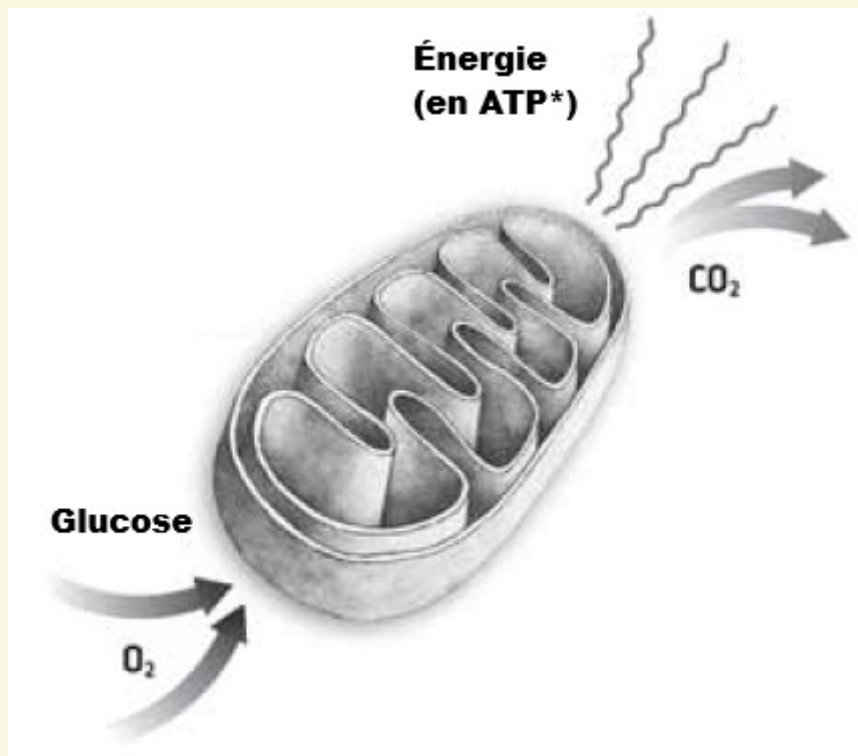


Fig. 7. Fonctionnement des mitochondries à l'intérieur d'une cellule. *¹¹

Dans un organisme multicellulaire, ce mécanisme est plus facile à percevoir. Un arbre, par exemple, possède des structures spécialisées, chacune ayant une fonction spécifique et chacune dépendant des processus vitaux assurés par les autres. La racine est limitée par des tissus résistants, qui permettent à la plante de pénétrer dans le sol ; en même temps, des tissus plus fins en partent, qui permettent l'absorption d'eau et de nutriments.

L'un des principaux produits de cette organisation est la sève brute, acheminée vers la tige afin que celle-ci remplisse sa fonction de transport vers les feuilles, où elle sera traitée. Mais outre la sève brute, le produit de cette organisation est la structure même de la racine, qui ne se maintient qu'en comptant sur le glucose et l'oxygène produits dans les feuilles, lors de la photosynthèse. Dans ce processus, l'un des réactifs est l'eau de la sève brute. Ainsi, la racine, la tige et les feuilles, en existant et en fonctionnant, permettent le fonctionnement et l'existence les uns des autres.

Dans une communauté d'organismes, cette logique reste valable. En reprenant l'exemple d'un arbre, il est possible d'identifier, à partir de celui-ci uniquement, plusieurs interrelations avec d'autres organismes. Le processus vital de la photosynthèse, en libérant de l'oxygène dans l'atmosphère, permet la respiration de plusieurs autres organismes ; la pénétration des racines dans le sol contribue à l'infiltration de l'eau, permettant la germination d'autres espèces végétales et garantissant l'humidité nécessaire à la micro et mésofaune du sol ; la relation des racines avec les bactéries fixatrices d'azote ou avec les mycorhizes favorise l'existence de ces êtres, en leur fournissant du glucose et, en même temps, l'augmentation de l'absorption d'eau ou de nitrates que ces organismes favorisent, contribuant ainsi à la croissance et au métabolisme de l'arbre ; les fleurs

11 L'ATP (Adénosine Triphosphate) est la molécule énergétique clé de toutes les cellules, agissant comme une "monnaie d'échange énergétique". Elle stocke l'énergie libérée par la digestion des aliments (comme le glucose) et la libère sous forme de chaleur et de travail cellulaire, par exemple pour la contraction musculaire, le fonctionnement du système nerveux et le transport de molécules. Lorsque l'ATP libère son énergie, il se transforme en ADP (Adénosine Diphosphate) et un phosphate, puis est régénéré grâce à l'énergie du métabolisme énergétique, tel que la respiration cellulaire.

et les fruits sont une source de nourriture pour la faune, qui à son tour favorise la pollinisation et la dispersion des graines ; la cime de l'arbre contribue à la protection du sol, en évitant l'érosion due à l'impact de la pluie, ce qui permet la structuration du sol et favorise la vie de divers organismes. La liste des interrelations est longue et variée ! Ainsi, que ce soit au niveau cellulaire, individuel, communautaire ou écosystémique, chaque structure, tout en se maintenant, produit des substances ou des conditions propices au fonctionnement et à l'existence d'autres structures. C'est la vie qui fonctionne ! Au cours de l'évolution, les différentes espèces ont appris à « se situer » dans ce processus.

Chacune a son niche écologique, c'est-à-dire un espace où la lumière, la température, l'humidité, la relation avec d'autres espèces et tant d'autres conditions lui conviennent. En étant là, à son tour, « fonctionnant », chaque individu de chaque espèce produit des substances et des conditions adaptées à d'autres organismes. Cela permet la vie collective, la création constante de nouvelles formes d'adaptation et, par conséquent, l'élargissement de la biodiversité.

Faire de l'agroforesterie, c'est identifier les structures et les mécanismes de fonctionnement de la vie sur le lieu de production agricole, « occuper la niche » humaine par le biais de la gestion agroforestière et orienter le système vers la production d'aliments et d'autres produits au milieu de la production de biodiversité et de l'échange entre les êtres vivants. le schéma 8 illustre cette logique.

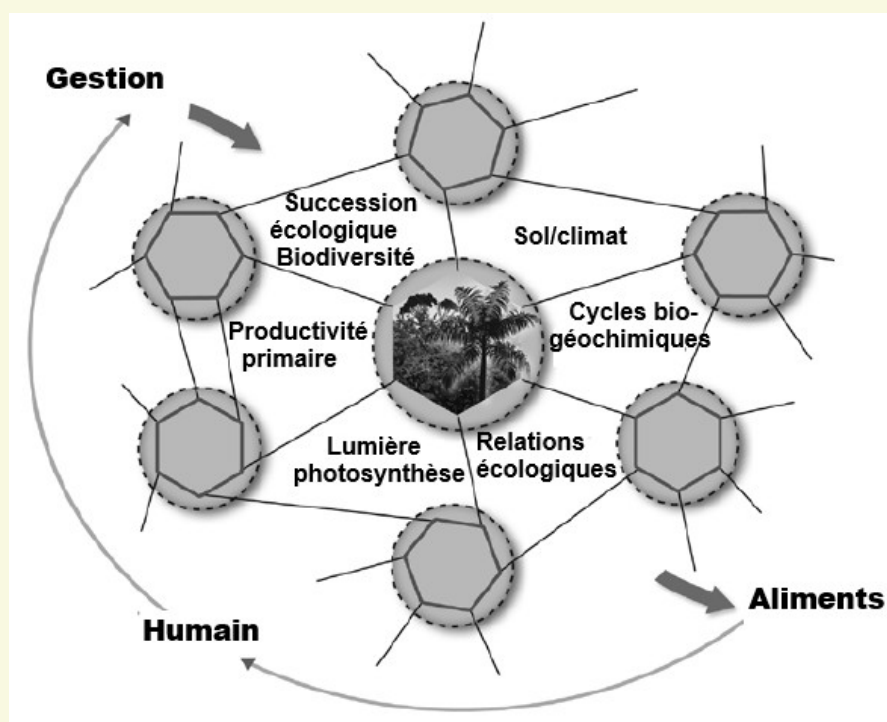


Fig. 8. Représentation schématique de la configuration d'un système agroforestier.

Le système agroforestier est donc un système vivant et, en tant que tel, sa configuration se présente sous la forme de réseaux imbriqués les uns dans les autres, où s'opèrent des flux d'énergie et de matière, alimentés par l'énergie solaire ; où les éléments qui composent le système coopèrent de manière généralisée, reliés entre eux par des alliances et des partenariats ; où la diversité confère une plus grande capacité de fonctionnement et oriente vers le maintien d'un état stable, en préservant (et même en améliorant) le fonctionnement de l'écosystème.



Le rôle de la photosynthèse

Comme nous l'avons vu, tout système vivant possède un flux continu d'énergie et de matière. Ce flux commence par la photosynthèse.

La photosynthèse est le processus par lequel les plantes (et certaines bactéries) utilisent l'énergie lumineuse provenant d'une partie du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre et la transforment en énergie chimique. Au cours de ce processus, les plantes captent le CO_2 de l'atmosphère et absorbent les nutriments et l'eau du sol, produisant ainsi leur matière. Ainsi, la production de matière végétale à partir de la partie aérienne des plantes (troncs, branches, feuilles, fruits et graines), des racines et des exsudats (composés organiques libérés par les racines) provient de l'énergie solaire, qui favorise le démarrage des chaînes alimentaires de la planète Terre.

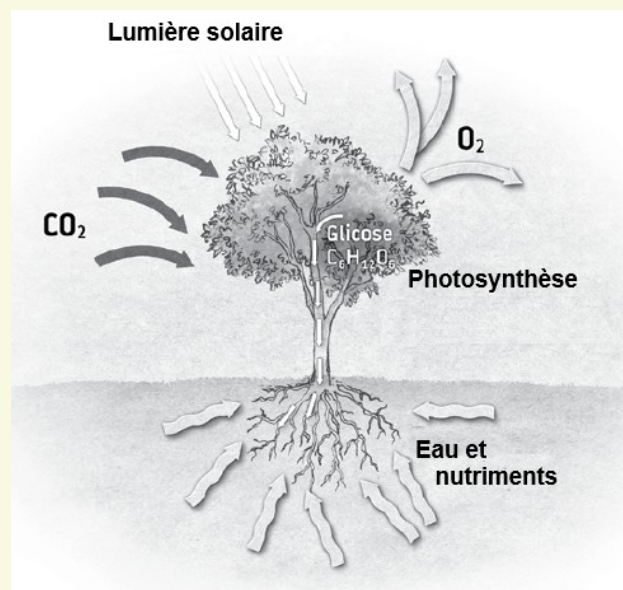


Fig.9. Représentation schématique du processus de photosynthèse.

Lorsque nous, êtres humains, pensons, marchons ou faisons de l'exercice, nous dépensons essentiellement de l'énergie solaire, qui a été transformée en énergie chimique dans le glucose produit par la photosynthèse ; le glucose, chargé de cette énergie, a été transformé par les plantes, entre autres substances, en amidon ; lorsque nous mangeons l'amidon, nous le transformons à nouveau en glucose lors de notre digestion, nous transportons le glucose jusqu'à chacune de nos cellules et, dans les mitochondries, à l'intérieur des cellules, nous en extrayons l'énergie pour notre métabolisme. Tous les animaux font cela.

Étant donné que la photosynthèse est le processus fondamental pour la génération de la matière végétale et le fonctionnement des êtres vivants – y compris les végétaux que nous produisons pour nous nourrir –, il est important de stimuler la photosynthèse afin qu'elle se déroule de manière satisfaisante, car cela nous permettra d'obtenir une productivité agricole élevée. C'est pourquoi un ancien proverbe chinois dit que « l'agriculture est l'art de conserver le soleil ».

Bien que nous puissions avoir l'impression que la photosynthèse est un processus si naturel qu'il se produit partout où il y a de la lumière, il est important de considérer que, pour optimiser le taux de photosynthèse – et donc la quantité de biomasse produite –, il faut disposer d'eau, de dioxyde de carbone et de lumière en quantités suffisantes.

C'est sous les tropiques que les effets de la photosynthèse sont les plus notables. La productivité primaire, c'est-à-dire la matière végétale produite par la photosynthèse, y est beaucoup plus élevée que dans les régions tempérées. La plus grande quantité d'énergie solaire reçue sous les tropiques contribue à expliquer cette différence. La plus grande quantité de lumière, combinée à une humidité plus élevée, génère une plus grande quantité de ressources énergétiques, ce qui reflète la capacité des tropiques à abriter un plus grand nombre d'espèces. Plus de lumière et d'humidité génèrent donc une plus grande diversité, ce qui constitue l'une des principales hypothèses expliquant la plus grande biodiversité de ces régions¹².

Comme prévu, dans une forêt tropicale, il existe des mécanismes permettant de maintenir l'eau, essentielle à la photosynthèse, dans le système. L'un d'eux est la canopée forestière. Cette canopée empêche la lumière directe du soleil d'atteindre le sol, ce qui réduit sa température et, par conséquent, l'évaporation de l'eau directement à la surface du sol.

Le couvert forestier ne se compose cependant pas uniquement de la canopée (ou « toit » de la forêt). Différentes strates, disposées verticalement, sont occupées par les cimes d'arbres, d'arbustes et de graminées de différentes espèces. Ces différentes strates agissent comme des barrières empêchant l'échappement de grandes quantités de vapeur d'eau évapotranspirée, maintenant ainsi une humidité relative élevée au sein de la forêt et réduisant les variations de température ambiantes. Il est toutefois important de noter que cela n'empêche pas les cimes des arbres de la canopée, en particulier, de transférer constamment de grandes quantités d'eau du sol vers l'atmosphère, conférant aux forêts un rôle important dans le refroidissement atmosphérique planétaire.

De plus, le couvert forestier multicouche empêche les gouttes de pluie d'atteindre directement le sol : dans une forêt tropicale, seulement environ 1 % des gouttes de pluie atteignent le sol directement. La majeure partie de la pluie atteint la canopée, ruisselant lentement, prévenant l'érosion et contribuant ainsi au maintien de la structure du sol. Cette structuration est également une conséquence de l'action des racines et des microorganismes du sol. Un sol bien structuré permet à l'eau de s'infiltrer et de rester dans ses micropores et les eaux souterraines.

Par conséquent, lors d'une période pluvieuse, une partie de l'eau est retenue par les plantes elles-mêmes et une autre s'accumule dans le sol. En période de déficit hydrique, cette eau accumulée peut être utilisée par les plantes, maintenant ainsi le processus de photosynthèse, ou libérée dans l'atmosphère¹³.

La structure de la forêt influence également la forme de l'incidence lumineuse, déterminant l'efficacité photosynthétique. L'intensité lumineuse varie avec la hauteur de la forêt. Les grands

12 PIANKA, E. R. *Evolutionary ecology*. New York: Harper Collins College Publishers, 5 ed., 1994. 486 p.

13 Idem

arbres, dont la cime est située dans la canopée, reçoivent la totalité du rayonnement solaire, tandis que les arbres et arbustes plus petits reçoivent progressivement moins de lumière. Comme pour les précipitations, dans les forêts très denses, moins de 1 % de la lumière solaire atteint directement le sol (Schéma 10).

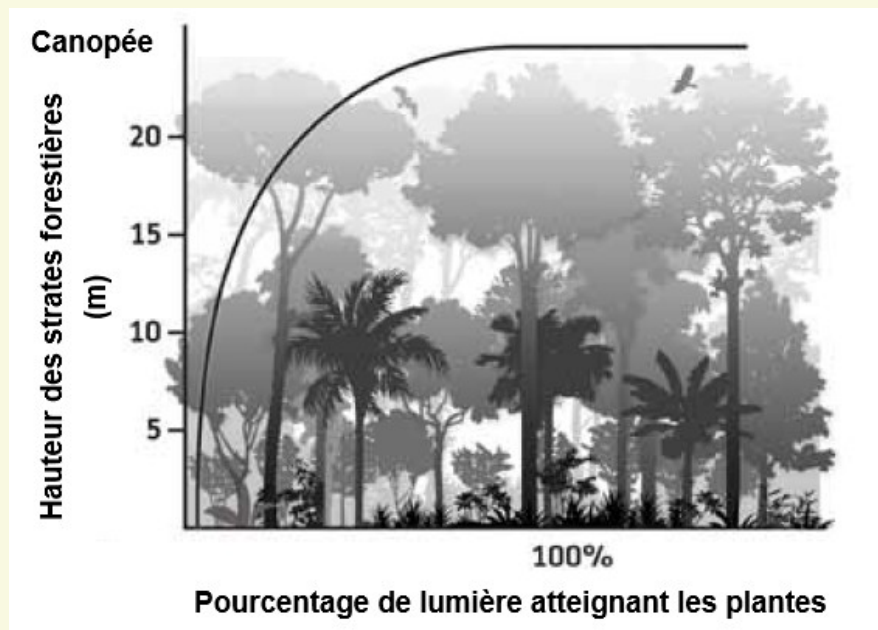


Fig.10A. Pourcentage de lumière atteignant les plantes. Source : Adapté de Pianka (1994).

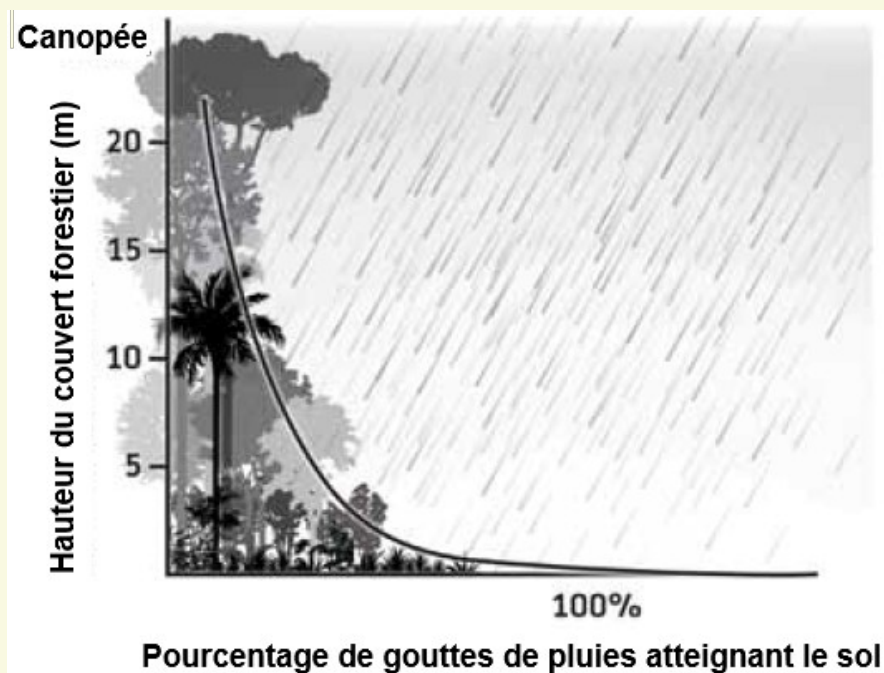


Fig. 10B. Pourcentage de précipitation atteignant directement le sol en milieu tropical.

La variation de la lumière atteignant chaque plante influence également l'énergie nécessaire pour la recevoir. Bien qu'un arbre de la canopée dispose de plus d'énergie solaire qu'une herbe près du sol, il doit dépenser beaucoup plus d'énergie pour les tissus de soutien (bois) que l'herbe. Parallèlement, les plantes du sous-bois sont souvent beaucoup plus tolérantes à l'ombre et capables de photosynthèse à des taux d'incidence lumineuse plus faibles. Ainsi, chaque espèce végétale, avec sa stratégie de croissance et son mode de vie, présente ses propres coûts et avantages (Pianka, 1994).

Dans une forêt tropicale, outre le gradient vertical d'incidence lumineuse et de précipitations, il existe également une variation spatiale, ou horizontale, de ces facteurs. Cela s'explique par la formation naturelle très fréquente de clairières dans ces forêts. Ces clairières sont généralement formées par des chutes d'arbres naturelles et, parfois, par des incendies. Dans ce cas, l'apport de lumière dans la clairière est plus important que dans le reste de la forêt. De manière générale, cela augmente le taux de productivité primaire dans les clairières, c'est-à-dire la vitesse à laquelle le carbone atmosphérique est transformé en matière végétale. Cela se produit parce que la fixation du carbone atmosphérique sous forme de tissu végétal est plus importante que la production de dioxyde de carbone par les plantes, via la respiration. C'est à ce stade que de nombreux semis, auparavant peu éclairés, commencent à pousser plus rapidement, et que de nombreuses graines présentes dans le sol sont stimulées à germer grâce à l'augmentation de la température du sol.

La formation de trouées est le principal moteur de la fixation du carbone, via la photosynthèse, dans les forêts tropicales. À mesure que de nouvelles forêts s'établissent, une grande quantité de dioxyde de carbone est fixée sous forme de tissus végétaux (matière végétale). Certaines parties des forêts matures présentent un équilibre quasi nul entre la quantité de carbone fixée et la quantité de carbone émise par la respiration. Dans une étude menée sur 25 forêts tropicales matures, Clark (2002) a constaté que cet équilibre n'est en moyenne que de $0,3 \text{ mg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Bien que la taille des trouées varie, leur localisation au cœur d'une forêt permet, malgré l'augmentation de la lumière et des précipitations sur le sol de la clairière, le développement du couvert forestier, préservant ainsi les caractéristiques forestières à une échelle spatiale plus large.

À partir des dernières décennies du XXe siècle, plusieurs études ont commencé à identifier que la formation de clairières dans les forêts tropicales est en fait beaucoup plus fréquente qu'on ne le pensait auparavant, occupant de larges pourcentages de zones forestières et avec des périodes de rotation relativement courtes (le temps nécessaire pour qu'une clairière redevienne une clairière) (Brokaw, 1985 ; Martínez-Ramos et al., 1988 ; Oliveira, 1997). Depuis lors, le concept de forêts tropicales comme mosaïques de clairières d'âges et de tailles différents est devenu de plus en plus accepté. Cela contribue significativement à l'augmentation de la biodiversité à l'échelle régionale, compte tenu de la variation des adaptations des espèces aux différentes conditions de lumière, de température, d'humidité et d'autres caractéristiques variables entre les clairières de différentes tailles.

La relation entre humidité et lumière, facilement identifiable dans les forêts tropicales, est perturbée lorsque la forêt est défrichée pour la production de monocultures. Dans une grande plantation de soja, par exemple, l'ensoleillement direct, l'un des composants de la photosynthèse, est fortement présent. Cependant, les températures élevées du sol (dûes à cet ensoleillement direct), combinées à l'absence de couvert forestier dans différentes strates, entraînent une évaporation accrue de l'eau à la surface du sol, qui est dépourvu de système de stockage d'eau forestier.

De plus, à des températures élevées, la plupart des plantes ferment leurs stomates (pores par lesquels s'effectuent les échanges gazeux et la transpiration) afin d'éviter la déshydratation. Avec ces stomates fermés, l'absorption de dioxyde de carbone nécessaire à la photosynthèse est temporairement interrompue. Le sol, à son tour, directement exposé à la plupart des gouttes de pluie et au soleil, a tendance à se déstructurer, désintégrant les amas qui forment les macro et micropores et réduisant sa capacité de stockage et sa disponibilité en eau.

Recherche de l'efficacité photosynthétique dans les systèmes agroforestiers

« Une intervention est durable si le bilan énergétique complexifié et la vie sont positifs (...) » (Götsch, 1995).

Suivant ce principe, les systèmes agroforestiers associent la production alimentaire et d'autres produits à la complexité croissante du système. À cette fin, les agroforêts utilisent, entre autres, la photosynthèse pour améliorer la production de matière vivante.

L'une des pistes pour y parvenir est l'optimisation de la productivité du profil vertical des agroforêts. Les agriculteurs associés à Cooperafloresta, par exemple, ont mis en place des agroforêts de plus en plus petites en termes de superficie, mais de plus en plus complètes en termes d'occupation des strates verticales. D'autre part, on observe également une tendance à l'augmentation du nombre d'agroforêts au fil du temps sur chaque propriété. La combinaison de la mise en place progressive d'un plus grand nombre d'agroforêts, mais de superficies plus réduites et d'une intensité de gestion accrue, améliore la productivité par zone (Steenbock et al., 2013a).

Au sein de Cooperafloresta, en moyenne, 16 % de la superficie des propriétés (ou unités familiales) est consacrée à l'agroforesterie, mise en œuvre à différentes périodes ; 58 % de la superficie est constituée de forêts en phase initiale ou intermédiaire de régénération ; 13 % de la superficie est constituée de forêts en phase avancée de régénération ; et seulement 13 % de la superficie des unités de production est utilisée à d'autres fins (généralement la superficie de l'exploitation principale et des petites exploitations). Ainsi, bien que l'agroforesterie constitue la base de la production, de la sécurité alimentaire et des revenus des agriculteurs, il est important de noter que l'utilisation des terres la plus courante, en termes de superficie, est le maintien de forêts secondaires en phase initiale et intermédiaire de régénération, qui représentent plus de la moitié de la superficie des propriétés (58 % de la superficie des unités de production, en moyenne).

À première vue, les forêts secondaires peuvent être considérées comme des zones inutilisées. Cependant, selon les rapports des agriculteurs de Cooperafloresta, les agroforêts établies dans des zones auparavant constituées de forêts secondaires ont tendance à être beaucoup plus fertiles et à devenir plus facilement « complètes ». En effet, les forêts secondaires accumulent de la matière végétale issue de la production primaire, ce qui, bien géré, peut améliorer la productivité des agroforêts établies ultérieurement dans ces zones.

La gestion agroforestière de Cooperafloresta a mis en place un système d'utilisation des terres dans lequel quatre hectares de forêt secondaire sont maintenus pour chaque hectare d'agroforesterie (les agroforêts représentent 21,5 % de la superficie totale de l'agroforesterie et de la forêt secondaire). Ainsi, dans le système agroforestier pratiqué par les membres de Cooperafloresta, il existe deux mécanismes : l'un pour l'agroforesterie et l'autre pour la forêt secondaire. Ces mécanismes, alternés au fil du temps entre les propriétés, occupent actuellement 74 % du paysage des familles d'agriculteurs (Steenbock et al., 2013a).

La similitude de ce système de gestion avec la dynamique de défrichement – le principal processus d'optimisation de la productivité primaire (matière végétale produite par la photosynthèse) dans les forêts tropicales – est notable. Brokaw (1985) a identifié que dans les forêts tropicales, les trouées causées par la chute d'une partie d'un arbre, soit par un ou plusieurs arbres, représentaient 25 % de la superficie forestière totale (tableau 1).

Tableau 1. Superficie et fréquence des types de trouées dans les forêts tropicales, adapté de Brokaw, 1985.

Type de clairière	Fréquence %	Superficie forestière %
Partie d'arbre	23	10
Un seul arbre	51	38
Arbres en domino	14	16
Arbres superposés		36

Oliveira (1997), passant en revue diverses études, a caractérisé la durée moyenne de rotation (période pendant laquelle une clairière tend à redevenir une clairière après la croissance forestière) à 125 ans dans les forêts tropicales. Par conséquent, la rotation entre les clairières et les forêts aux stades de succession plus avancés, dans les forêts tropicales et les systèmes agroforestiers, est un élément déterminant des deux formations. Associée à la rotation des agroforêts au sein des zones forestières, la gestion agroforestière, pour être productive dans les différentes strates verticales de la forêt, implique des plantations très denses, ce qui améliore la photosynthèse et la productivité. Dans ces plantations, les agriculteurs associés à Cooperafloresta ont utilisé la méthodologie de création de planches agroforestières, séparées par des bandes destinées à la culture de graminées, qui captent l'énergie solaire aux premiers stades de la succession écologique, lorsque la structure forestière elle-même n'est pas encore formée. La taille fréquente de ces graminées et le dépôt de matériel de taille dans les planches favorisent l'accumulation d'énergie et de matière végétale dans le système.

À mesure que les espèces plantées se développent, d'autres espèces des forêts voisines s'installent dans l'agroforêt, absorbant également le dioxyde de carbone atmosphérique. Afin de garantir l'ensoleillement des différentes strates de l'agroforêt, des tailles fréquentes sont pratiquées, tant pour les espèces plantées que pour celles issues de la régénération naturelle. La taille favorise ainsi la croissance des espèces du sous-bois, encore plus intensément que dans les forêts indigènes. En assurant une couverture adéquate du sol, que ce soit par une répartition et un dépôt soigneux des matériaux de taille au sol ou par le maintien de plantations denses et étagées, le sol est protégé du rayonnement solaire direct et des gouttes de pluie. De plus, la promotion de la structure multicouche de l'agroforêt crée un environnement propice au maintien d'une humidité relative élevée et à la réduction des vents. Cette gestion permet d'optimiser l'eau, le dioxyde de carbone et la lumière – c'est-à-dire la photosynthèse et la productivité primaire (matière végétale) – dans le système agroforestier.

Les agroforêts gérées selon ce type de gestion, dans le cadre de Cooperafloresta, fixent dans les plantes et le sol, en moyenne, 6,6 tonnes de carbone atmosphérique par hectare et par an (Steenbock et al., 2013c). Des agroforêts de quinze ans gérées de manière similaire depuis 1991 sur la côte nord du Rio Grande do Sul, dans la région de Torres, grâce à l'intervention du Centro Ecológico, avec le soutien de la Pastorale rurale de l'Église catholique, ont accumulé un stock de carbone de 100 tonnes par hectare (MMA/Centro Ecológico, 2013). Il est important d'aborder ici le comportement de l'énergie dans les écosystèmes. L'énergie sur la planète Terre obéit à deux lois de la

thermodynamique. La première loi stipule que toute énergie peut être transformée d'une forme à une autre, mais qu'elle ne peut être ni créée ni détruite.

La seconde loi stipule qu'à chaque transformation, l'énergie se dissipe sous forme d'énergie thermique (chaleur). Ainsi, dans les écosystèmes, l'énergie circule constamment d'un endroit à un autre via la chaîne alimentaire et change de forme (Gliessman, 2000). Elle entre sous forme d'énergie solaire et est convertie en énergie chimique par la photosynthèse, puis stockée dans la matière végétale.

Lorsque les organismes utilisent cette énergie pour croître, se déplacer et se reproduire, la majeure partie est transformée en énergie thermique, qui n'est plus utilisable ; autrement dit, elle est perdue sous forme de chaleur. Par conséquent, les systèmes agricoles capables d'optimiser l'utilisation de l'énergie sont plus efficaces.

On sait que plus l'utilisation de l'énergie biologique est importante, plus l'efficacité énergétique des systèmes de production agricole est élevée. Gliessman (2000) a classé les sources d'énergie pour la production alimentaire, comme le montre le schéma 11.

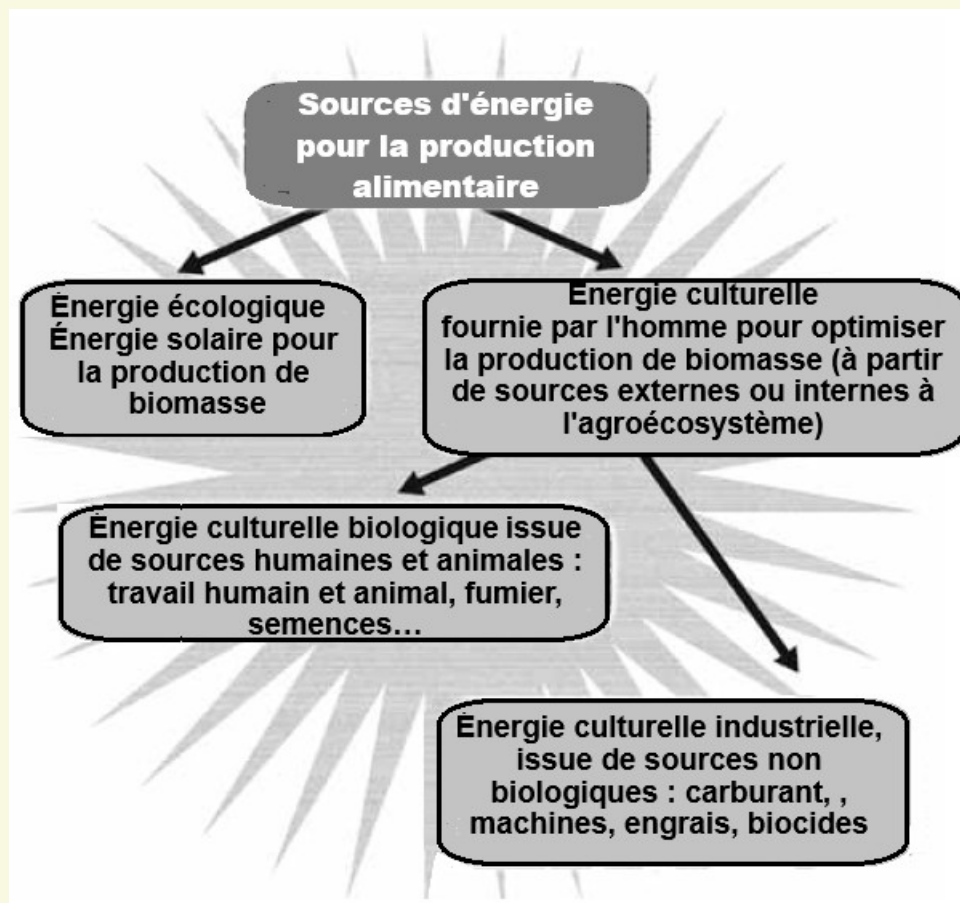


Fig.11. Classification des sources d'énergie utilisées en agriculture.

Adapté de Gliessman (2000).

Outre l'énergie écologique, qui est l'énergie du soleil pour la photosynthèse, il existe l'énergie culturelle, fournie par l'homme. Cette énergie peut être d'origine biologique, c'est-à-dire dérivée de sources humaines et animales, comme le travail et le fumier ; et d'origine industrielle, c'est-à-dire issue de sources non biologiques, comme le pétrole, les machines et les produits agrochimiques. Les énergies classées comme culturelles-industrielles sont celles qui utilisent des énergies antérieures pour leur production (par exemple, les produits agrochimiques nécessitent une grande quantité

d'énergie pour concentrer les éléments dans le produit final). Par conséquent, l'utilisation de sources d'énergie industrielles dans les systèmes agricoles entraîne un apport énergétique considérable. Pour que le système soit efficace, il serait nécessaire d'extraire une quantité d'énergie bien plus importante sous forme de produit, sachant que l'efficacité énergétique est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Efficacité énergétique culturale} = \frac{\text{Quantité d'énergie contenue dans la matière végétale récoltée}}{\text{Quantité d'énergie culturale nécessaire à sa production}}$$

Dans le cas de l'agroforesterie, les principales énergies utilisées sont l'énergie écologique (énergie issue du rayonnement solaire) et l'énergie culturale biologique, constituée du travail humain et des semences et plants insérés dans les systèmes agroforestiers. L'efficacité énergétique est alors très élevée. Gliessman (2000) présente des données provenant d'une plantation de maïs sur brûlis au Mexique, où 90 % de l'apport énergétique provenait du travail humain (énergie culturale biologique) et présente une efficacité énergétique culturale de 12,5. D'autre part, il présente un système de production de maïs aux États-Unis dans les années 1980, dans lequel 26,5 % de l'apport énergétique provenait d'engrais azotés, 21 % du pétrole et 11 % des pesticides. L'efficacité énergétique des cultures, dans ce cas, était de 2,9.

Le flux d'énergie s'accompagne d'un flux de matière, composée de carbone et de nutriments. Lors de la photosynthèse, comme nous l'avons vu, le carbone et les nutriments sont incorporés à la matière végétale. Lorsque cette matière est utilisée dans la chaîne alimentaire, le carbone et les nutriments traversent le système.

Lorsque la matière organique se décompose à différents niveaux de la chaîne alimentaire, une partie du carbone est transformée par le microbiote en CO₂ et retourne dans l'atmosphère, où elle est ensuite absorbée par une autre plante grâce à la photosynthèse. Les nutriments, une fois libérés lors du processus de décomposition, deviennent utilisables par les organismes du sol ou par une nouvelle plante en phase d'absorption. Ce « chemin » des nutriments caractérise le flux de matière dans les écosystèmes agricoles.

Dans ce flux, si l'on considère l'agroécosystème cible, des pertes de nutriments peuvent se produire lorsque le carbone et les nutriments sont libérés sous forme de produits destinés aux ménages et à la vente ; ou lorsque les nutriments sont présents dans l'eau du sol et s'infiltrent à des profondeurs supérieures aux racines absorbantes ; ou encore, lorsque les nutriments sont disponibles, mais que les plantes ne sont pas en phase d'absorption (pendant le vieillissement végétal, par exemple). Dans ces cas, le nutriment quitte l'agroécosystème que nous gérons et se dirige vers les écosystèmes environnants.

À cet égard, on peut considérer que la matière a tendance à suivre un cycle au sein de l'écosystème terrestre, car même après avoir quitté l'écosystème cible, le carbone et les nutriments sont utilisés dans d'autres écosystèmes. À la différence de l'énergie, qui entre sous forme d'énergie solaire (rayonnement solaire) et, après transformation en chaleur, n'est pas récupérée par les écosystèmes.

L'efficacité du flux de matière dans les systèmes agroforestiers est due à la complexité des relations non linéaires entre les composants (minéraux du sol, plantes et organismes). Dans cette relation complexe, la matière est transférée d'un composant à un autre. Par conséquent, plus la structure d'un système de production agricole est complexe et diversifiée, plus il comporte de composants, ce qui crée des conditions permettant aux nutriments de rester plus longtemps dans le système. Il

convient de noter que, dans le cas de l'agroforesterie, cette complexité résulte d'une gestion favorisant la richesse des espèces végétales et optimisant la fixation du carbone et de l'azote atmosphériques (comme la plantation dense, la taille et l'augmentation de la biodiversité du sol), ce qui se traduit par des propriétés permettant au système de mieux utiliser l'énergie et la matière.

Par conséquent, la structure et le fonctionnement des systèmes agroforestiers génèrent des propriétés émergentes qui favorisent une efficacité photosynthétique élevée dans l'utilisation de l'énergie et des nutriments. De plus, il est essentiel de souligner que les propriétés émergentes des systèmes agroforestiers leur permettent de fournir des services écosystémiques.

Selon le Conseil d'évaluation des écosystèmes pour le millénaire, les services écosystémiques sont « les bénéfices que les populations tirent des écosystèmes » (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Autrement dit, notre santé et notre bien-être dépendent des services fournis par les écosystèmes. Ceux-ci incluent l'approvisionnement en nourriture, en eau, en fibres et en bois ; la régulation du climat, des inondations, des maladies, des déchets et de la qualité de l'eau ; les services culturels, qui procurent des bienfaits récréatifs, esthétiques et spirituels ; et les services de soutien tels que la formation des sols, la photosynthèse et le cycle des nutriments. Le Conseil conclut lui-même que « l'espèce humaine est fondamentalement dépendante du flux de services écosystémiques » (Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Au sein de ce flux, différents processus jouent des rôles fondamentaux qui cherchent à être valorisés dans les pratiques agroforestières.

Le rôle de la succession écologique

Grâce à la photosynthèse, technologie biologique de production de matière végétale, la vie s'est adaptée et s'adapte constamment à différents espaces, avec des combinaisons variées de conditions de lumière, de température, d'humidité, de disponibilité des nutriments, de relations écologiques, et bien d'autres.

Chaque espèce s'adapte au mieux à chaque combinaison de ces conditions. Ces combinaisons sont appelées niches écologiques. En milieu naturel, si une niche écologique particulière existe, les espèces qui l'occupent adéquatement trouveront les conditions propices à leur développement.

Le bracinga (*Mimosa scabrella* Benth.), par exemple, est un arbre qui s'est adapté aux conditions de clairière de l'écosystème de la forêt mixte ombrophile, ou forêt d'*Araucaria*. Lorsqu'une clairière se forme dans les forêts de cet écosystème, la température du sol augmente, ce qui lève la dormance des graines de l'espèce présentes dans le sol. L'arbre pousse rapidement, contribuant à la fermeture rapide de la clairière et créant les conditions propices au développement d'autres espèces forestières. En quelques années de vie, l'arbre produit d'intenses floraisons annuelles, fournissant de la nourriture à un grand nombre d'insectes qui, arrivant dans la clairière, pollinisent également d'autres espèces. Chaque année, de nombreuses graines sont produites, constituant la réserve de graines du sol. Les bracingas meurent entre vingt et vingt-cinq ans, mais la réserve de graines créée durant cette courte période permettra, à l'ouverture d'une nouvelle clairière, même des décennies plus tard, au bracinga de trouver sa place et de remplir son rôle dans les relations écologiques et les processus vitaux de cette forêt, c'est-à-dire d'occuper sa niche écologique (Steenbock, 2009).

Il existe une forte relation entre la biodiversité et la variation des niches écologiques. Plus les espèces coexistent, plus le nombre de niches formées est élevé. Plus la variation entre les niches est importante, plus la pression de sélection pour la génération de variabilité génétique au sein des espèces est forte, et par conséquent, plus la biodiversité est importante (Fig. 12). Ainsi, l'hétérogénéité environnementale permet aux espèces de coexister au sein de la biodiversité, car elles peuvent se spécialiser dans différentes parties de l'espace de la niche (Ricklefs, 2003). D'autre part, les substances produites par les espèces, les conditions différentielles d'humidité, de lumière et d'autres caractéristiques générées par leur présence dans l'environnement déterminent la formation de nouvelles niches.

Pour reprendre l'exemple de la bractéacée, le fait que l'espèce produise des floraisons abondantes peu après l'hiver (période de ressources trophiques réduites pour les insectes pollinisateurs) contribue à l'établissement de niches écologiques pour ces insectes, parmi de nombreuses autres relations. Le fait que les racines de l'espèce présentent des associations avec des bactéries fixatrices d'azote crée des conditions propices à plusieurs espèces de la micro et de la mésofaune du sol ; et ainsi de suite.

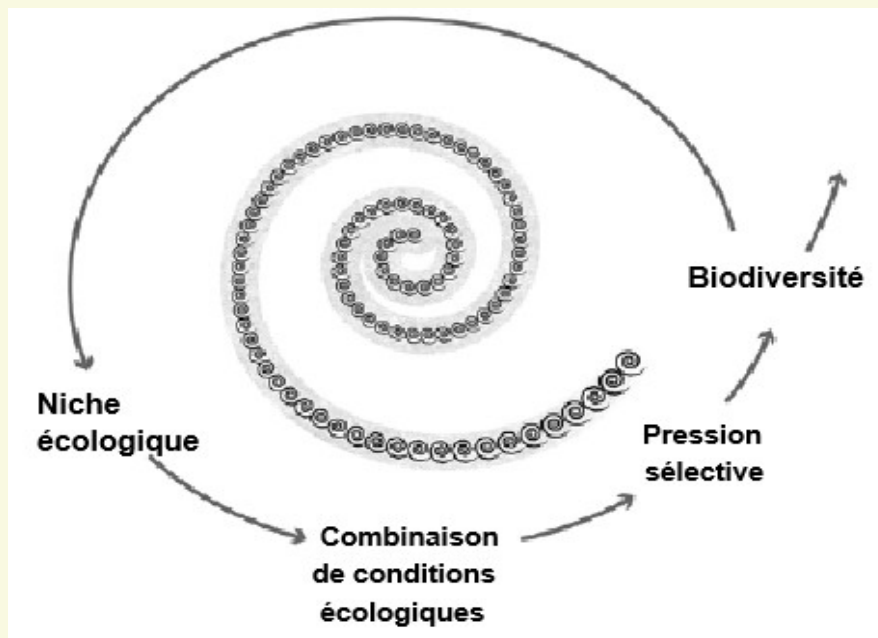


Fig.12. Représentation schématique de la relation entre niches écologiques et biodiversité.

En milieu naturel, chaque niche émerge à mesure que l'espace est occupé par différentes espèces. Ce processus est appelé succession écologique, ou succession naturelle. Margalef (1968) a judicieusement défini la succession écologique comme l'augmentation de l'information dans un écosystème, reflétant précisément l'augmentation des relations et de la biodiversité résultant de la succession.

Le schéma 13 illustre cette logique d'interaction dans laquelle l'émergence de nouvelles niches écologiques conduit à la succession écologique, et la succession écologique résulte de la génération de nouvelles niches écologiques.

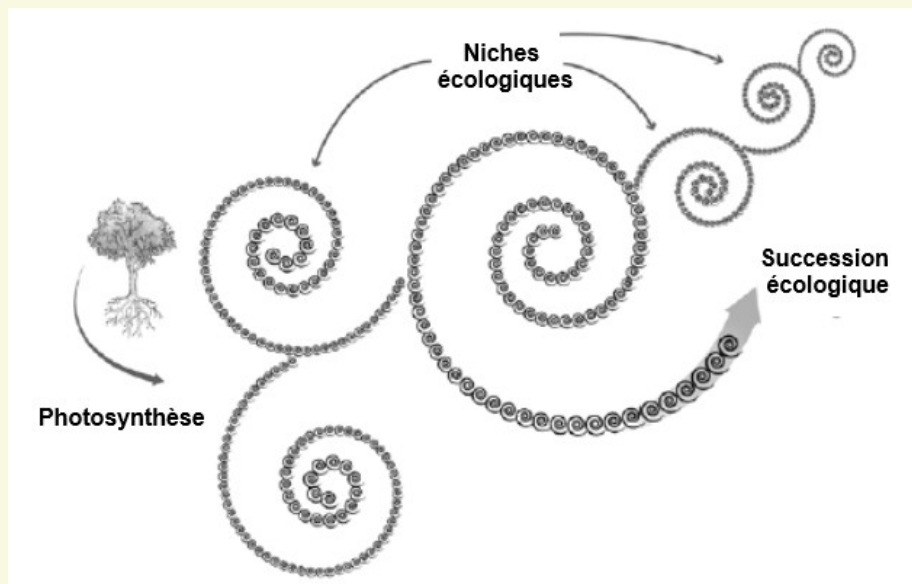


Fig.13. Représentation schématique des niches écologiques comme produit de la succession écologique.

Dans une clairière ou une zone cultivée abandonnée, les premières espèces végétales à apparaître sont appelées pionnières, suivies des espèces secondaires, puis des espèces climaciques.

Espèces pionnières

Les espèces pionnières sont présentes dans le sol sous forme de graines, produites en grande quantité lorsque des plantes adultes de ces espèces y étaient présentes. Les graines de ces espèces conservent généralement une viabilité germinative durable, restant dormantes dans le sol jusqu'à ce que des conditions de température et de luminosité adéquates stimulent leur germination, ce qui se produit lorsque des espaces, surtout importants, se forment. Après la germination, les plantes des espèces pionnières poussent très rapidement, à forte densité, et entament rapidement des cycles de production de fleurs et de fruits en grande quantité.

La stratégie de ces espèces consiste précisément à assurer leur survie sous forme de graines viables dans le sol. Chez de nombreuses espèces pionnières, si la plante adulte ne vit pas dix ans, ses graines peuvent persister plusieurs décennies dans le sol. Ces espèces jouent donc un rôle fondamental dans l'augmentation de la biodiversité, que ce soit en favorisant l'humidité de l'air et l'ombre dans la zone, en augmentant la perméabilité du sol (permettant ainsi la vie de divers organismes du sol) ou en attirant, grâce à l'abri et à la grande quantité de nourriture qu'elles fournissent par leurs fleurs et leurs fruits, une grande variété d'insectes, d'oiseaux, de chauves-souris et d'autres animaux. Ces animaux, à leur tour, apportent une grande quantité de pollen et de graines de diverses espèces. C'est par ce transport de graines que de nombreuses espèces secondaires et climaciques arrivent dans la zone.

Espèces secondaires

Les espèces secondaires ne poussent pas à la même densité que les espèces pionnières ; elles sont donc plus rares dans la zone. Bien que les jeunes plants d'espèces secondaires puissent exister en forte densité et former des noyaux, la tendance est qu'une seule ou quelques-unes d'entre elles survivent dans cet espace au fil du temps. La sélection naturelle agit donc sur ces noyaux, favorisant la survie des individus les mieux adaptés à la niche locale. Les graines des espèces secondaires sont

souvent dépourvues de dormance. Ces espèces croissent plus lentement que les espèces pionnières, connaissant généralement des périodes de croissance plus rapide lorsque des branches voisines ou des arbres entiers tombent, permettant une plus grande intensité lumineuse. Souvent, les plantes de ces espèces conservent pratiquement la même taille pendant de nombreuses années, attendant une plus grande intensité lumineuse pour se développer.

Lors de chaque reproduction, le nombre de fleurs et de graines est généralement inférieur chez les espèces secondaires que chez les espèces pionnières. Cependant, ces dernières restent présentes dans la zone pendant des décennies, offrant nourriture et abri à une faune diversifiée. Dans de nombreux cas, la pollinisation et la dispersion des graines sont assurées par des groupes d'espèces. L'architecture et la couleur des fleurs, la forme et la consistance des fruits, entre autres caractéristiques, sont orientées vers la pollinisation et la dispersion des graines par certaines espèces animales, qui finissent par les « préférer » à d'autres plantes.

Ainsi, la stratégie de vie des espèces secondaires repose sur une relation plus étroite avec des espèces animales spécifiques et une adaptation plus fine à la niche végétale dans laquelle chaque plante occupe sa place, restant plus dispersées dans le paysage et occupant, avec leurs populations, des environnements différents.

Espèces climaciques

Enfin, les espèces climaciques sont celles qui ont tendance à s'adapter aux environnements déjà « exploités » par les espèces pionnières et les espèces secondaires. Ainsi, ces espèces vivent dans des environnements ombragés où le sol est plus riche en matière organique.

On les trouve le plus souvent dans les fonds de vallée et les forêts riveraines. Leur croissance est relativement lente, et les arbres matures climaciques atteignent 30 à 45 mètres de hauteur, occupant généralement la canopée (ou « toit ») de la forêt.

Elles peuvent vivre plus d'un siècle et produisent généralement des fruits adaptés à l'alimentation des mammifères et servent de support à un grand nombre d'espèces épiphytes. En général, elles produisent une grande variété de composés secondaires, qui servent de défense contre les parasites ou les prédateurs. De ce fait, elles assurent leur survie à des densités variables et au milieu de populations de parasites et d'herbivores (Budowski, 1965 ; Kageyama et Gandara, 2000).

Implication de l'existence d'une succession écologique

Compte tenu de l'existence d'une succession écologique, une zone forestière présente, à tout moment, certaines plantes d'espèces plus anciennes (généralement celles les mieux adaptées au stade de succession précédent), occupant souvent les strates supérieures, ainsi que des espèces de différentes strates du sous-bois, à différents stades de leur développement. Il existe donc une diversité verticale des espèces dans la forêt.

De plus, les forêts étant constituées de mosaïques de clairières de tailles et d'âges variés, il existe également une diversité horizontale des espèces, générant et résultant d'ensembles de niches différentes au sein de la zone forestière dans son ensemble. La diversité verticale et horizontale est influencée par la diversité des conditions pédologiques, du relief, de l'hydrographie, de la géologie et de nombreuses autres conditions abiotiques. Ces différents facteurs contribuent à l'immense biodiversité des forêts tropicales.

L'existence de niches écologiques est dynamique – c'est-à-dire qu'une niche n'existe pas en permanence ni au même endroit –, les plantes ont évolué pour produire une grande quantité de graines et adopter de multiples stratégies de dispersion. Les angiospermes, la branche végétale la plus évoluée, y parviennent généralement très bien. Cela s'explique par le fait que toutes les graines produites n'atteindront pas le sol, et que toutes celles qui y parviennent ne trouveront pas les conditions immédiates de germination.

Lambers et al. (1998)¹⁴ suggèrent que, pour qu'une espèce puisse apparaître, trois filtres sont importants :

- le filtre historique, qui agit sur les raisons historiques qui déterminent si une espèce peut se disperser dans une zone donnée ;
- le filtre physiologique, qui permet uniquement aux espèces dotées d'un appareil physiologique approprié de germer, de croître, de survivre et de se reproduire dans un environnement donné ;
- le filtre biologique, qui élimine les espèces capables de survivre dans un environnement donné, mais qui ne sont pas capables de supporter les interactions avec le biote local.

Étant donné que les graines possèdent généralement des structures protectrices et sont relativement isolées du milieu extérieur, la banque de graines du sol, en milieu naturel, est généralement très riche en espèces, notamment en espèces pionnières, en attente de niches écologiques propices à la germination.

Hall & Swaine (1980) ont recensé environ cent espèces forestières dans la banque de graines du Ghana, dont 88 % étaient des espèces pionnières. Garwood (1989), passant en revue les travaux menés dans les forêts tropicales de Malaisie, du Costa Rica et du Venezuela, a caractérisé la présence d'une moyenne de 300 graines de différentes espèces par mètre carré de sol. Dans les bracingais du sud du Brésil, Carpanezzi (1997) a identifié 90 à 190 graines de la même espèce par mètre carré. Puisqu'il existe une forte relation entre la présence des espèces et celle de leurs niches, la succession écologique peut également être conçue comme une succession de niches, comme le montre le schéma 13.

Suivant ce raisonnement, puisque la formation des niches est dynamique et dépend de la présence d'assemblages d'espèces, la succession écologique peut également être conçue comme une succession de consortiums d'espèces, ou plus précisément une succession de situations dans lesquelles certaines espèces parviennent à bien coexister les unes avec les autres lors de rencontres interspécifiques. En ce sens, Hurlbert (1971) a proposé que la connaissance des probabilités de rencontres interspécifiques pour chaque espèce constitue un outil fondamental pour comprendre la stabilité et la succession écologique d'une communauté.

Par conséquent, dans les milieux naturels, il n'existe pas de séparation complète entre les stades de succession, si l'on considère ces stades comme des « portraits de groupes » où un ensemble donné d'espèces est présent. En fait, il existe plutôt un flux continu, un « film », dans lequel les espèces jouent différents rôles dans le processus de succession tout au long de leur vie.

Dans une forêt tropicale, par exemple, bien que les espèces pionnières prédominent immédiatement après la formation d'une clairière et occupent ensuite la canopée, on trouve en dessous d'elles des semis d'espèces secondaires et des semis d'espèces climaciques. Après un certain temps, les

14 Hans Lambers F. Stuart Chapin III, Thijs L. Pons, *Plant Physiological Ecology*, Springer-Verlag, 1998

pionnières quittent le milieu, leur niche disparaissant et de nouvelles niches se forment déjà, où elles ont leur rôle à jouer.

Chaque espace forestier abrite un consortium d'espèces, présentant des caractéristiques ou des syndromes adaptatifs différents, à différents âges. Il est essentiel de garder à l'esprit que chaque arbre n'apparaît pas comme un adulte, mais a occupé sa niche (qui peut varier considérablement) tout au long de son développement. Ne pas tenir compte de cette observation peut conduire à des caractérisations et des pratiques erronées.

L'*Araucaria* (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze), par exemple, a parfois été qualifiée dans la littérature d'espèce climacique, car elle pousse dans les forêts à des stades de succession avancés. Le fait qu'elle soit présente à l'état adulte dans ces conditions ne diminue pas sa plasticité, car elle germe et se développe rapidement en plein soleil et dans des conditions de manque d'eau, typiques des champs de haute altitude, par exemple, où l'espèce prédomine dans les capões du sud du Brésil.

De plus, même au sein d'une forêt dense, ses semis peuvent rester plus petits qu'un arbuste pendant plusieurs années, attendant des conditions plus favorables pour pousser. Ainsi, qualifier l'*araucaria* d'espèce climacique, bien qu'indicatrice de son habitat dans les forêts matures, est une classification insuffisante pour prendre en compte son adéquation à la niche écologique à différents stades de développement, ainsi que les consortiums d'espèces dont il fait partie à chaque stade. Chaque consortium d'espèces, à chaque stade de la succession écologique, influence et est influencé par les niches créées au cours de cette succession (Fig. 14).

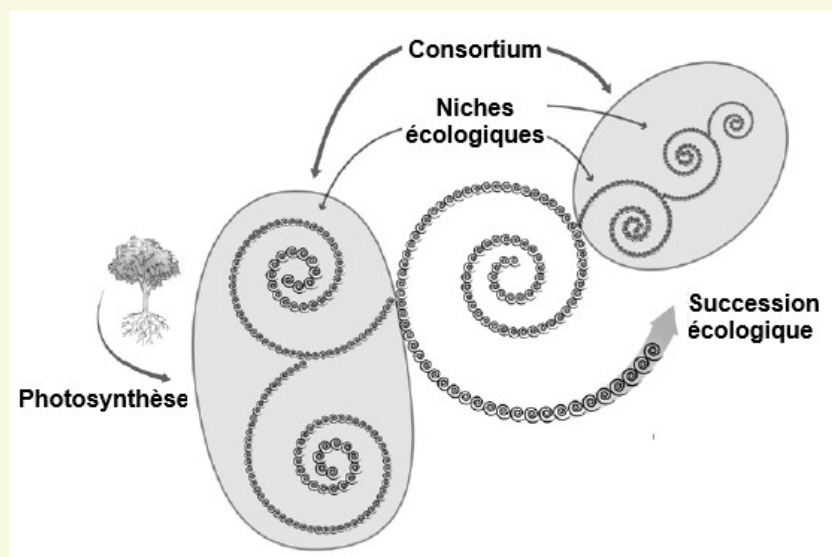


Fig. 14. Schéma de la formation de consortiums d'espèces basés sur des ensembles de niches.

Entre un consortium d'espèces et un autre, les espèces présentant la plus forte probabilité de rencontres interspécifiques sont précisément celles qui contribuent le plus à accélérer le taux de succession au sein d'une communauté (Hurlbert, 1971). Les espèces qui agissent de cette manière, c'est-à-dire qui contribuent le plus significativement à la formation de nouvelles niches, sont appelées « espèces facilitatrices » (Ricklefs, 2003). En utilisant un terme emprunté à la chimie, on peut dire que les espèces facilitatrices contribuent plus fortement au fonctionnement des niches écologiques à des niveaux quantiques plus élevés, d'autant plus que, de fait, plus la succession est avancée, plus les relations écologiques sont complexes et plus la capacité d'auto-organisation de la vie est grande (Fig. 15).

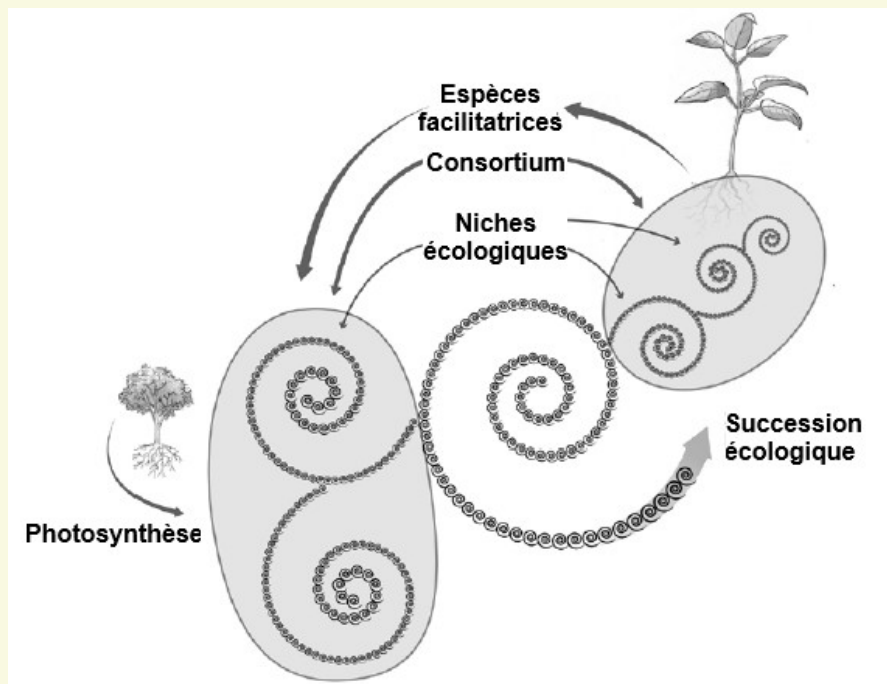


Fig. 15. Représentation schématique du rôle des espèces facilitatrices dans la succession des consortiums d'espèces et la formation de nouvelles niches écologiques.

Après l'accélération de la succession écologique, les espèces facilitatrices quittent le système, une fois les nouvelles niches créées, sans pour autant les quitter instantanément. Les espèces qui ont facilité la formation de nouvelles niches peuvent y rester plusieurs années, puis les quitter progressivement, sans pour autant influencer fortement la formation de nouvelles niches. Pour illustrer ce point, une autre comparaison, basée sur la chimie, est possible : tout comme en thermochimie, on étudie la « chaleur latente », qui consiste en un maintien constant de la température pendant la transformation d'une substance de l'état solide à l'état liquide, ou de l'état liquide à l'état gazeux. Dans la succession écologique, l'activité des espèces elles-mêmes, en particulier des espèces facilitatrices, disparaît progressivement, tandis que d'autres espèces facilitatrices commencent à agir dans les niches nouvellement formées.

Pour reprendre l'exemple de Bracatinga, on peut dire qu'il s'agit d'une espèce facilitatrice en début de succession, dans une clairière ouverte. Par sa forte densité, sa croissance rapide et sa production abondante de fleurs et de graines, elle contribue à l'établissement de diverses relations écologiques. Après une vingtaine d'années, de nouvelles niches se sont créées, et son rôle d'espèce facilitatrice n'a plus de sens. Elle quitte progressivement le système, par la sénescence et la mort progressive des individus de la population, sur une période pouvant durer une décennie. Durant cette période, d'autres espèces facilitatrices entrent en action ; c'est le départ de la bracatinga, et non les relations écologiques entretenues par ses individus vivants, qui constitue sa contribution à la succession écologique.

Utilisation des connaissances sur la succession écologique dans la pratique agroforestière. En agroforesterie, l'accent est mis sur la gestion des processus nécessaires à son établissement. La gestion de la succession écologique est l'une de ces approches.

Dans son ouvrage de 1992 intitulé « Succession naturelle des espèces en agroforesterie et régénération des sols », Ernst Götsch relate son propre cheminement vers le développement du concept selon lequel le succès d'un système agroforestier réside dans ses mécanismes d'établissement et de gestion, plutôt que dans ses éléments structurels. Cet ouvrage date de plus de

vingt ans et, au cours de cette période, Ernst a développé plusieurs techniques de gestion agroforestière. Cependant, ce document est précieux pour illustrer la prise de conscience croissante de l'importance de l'utilisation des connaissances sur la succession écologique dans la pratique agroforestière. Lors de son séjour au Costa Rica (entre 1979 et 1982), Ernst a développé un programme de reforestation utilisant la stratégie de culture en couloirs. Des rangées d'arbres légumineux, tels que des *Leucaena*, *Inga* et *Erythrina*, ont été plantées en alternance avec des rangées d'arbres fruitiers, tels que des bananiers, des caimitiers (*Chrysophyllum cainito*), des sapotiers (*Pouteria sapota*), etc. L'espace entre les rangées a été utilisé pour les cultures annuelles (maïs, haricots, manioc et légumes). À partir de la deuxième ou troisième année, les besoins en engrais ont freiné la croissance des cultures annuelles, sans toutefois les remplacer en termes de productivité.

Il a donc commencé à combiner quatre arbres fruitiers seulement (bananier, cacaoyer, avocatier et palmier pêcher) avec de l'érythrine, du pois doux (*Inga* sp.) et d'autres légumineuses pour l'ombrage. Si ce système fonctionnait relativement bien sur les sols riches, tant au Costa Rica qu'à Itabuna, dans le sud de Bahia, au Brésil, il échouait sur les sols pauvres des pâturages abandonnés de cette région.

Il a ensuite tenté d'améliorer ces sols appauvris en plantant initialement des espèces pionnières (manioc, érythrine et ingá), qui prospèrent dans les sols pauvres du sud de Bahia. Cependant, seul le manioc s'est implanté, avec très peu de développement. Un grand nombre d'espèces pionnières indigènes, en revanche, ont prospéré dans ces zones. Ernst explique que, pour cette raison, il a commencé à sélectionner les plantes en retirant uniquement les graminées, les herbes et les vignes déjà matures ou remplacées par des espèces cultivées. Toutes les autres graminées, arbres et palmiers indigènes ont pu pousser et jouer leur rôle important dans l'amélioration du sol. Les plantes cultivées ont commencé à bien pousser en présence d'espèces indigènes. Cette constatation a permis le développement de la pratique qu'il a appelée le désherbage sélectif (Götsch, 1992).

Il est important de rappeler ici les filtres proposés par Lambers et al. (1998)¹⁵, décrits précédemment. Bien que les espèces plantées par Ernst dans ce rapport fussent classées comme pionnières, cela ne signifie pas qu'elles se seraient bien développées dans ce sol, dans les niches écologiques existantes à cette époque, et compte tenu de la combinaison de fertilité, de relief, d'ensoleillement et d'autres facteurs abiotiques.

Identifier des espèces pionnières véritablement capables de se développer dans cette zone spécifique, grâce à leurs stratégies de reproduction caractéristiques – c'est-à-dire les espèces ayant passé les filtres de Lambers et al. (1998) – était fondamentale pour enrichir la zone. Dès lors, Ernst a cherché à maximiser le potentiel biologique et génétique de la flore et de la faune spontanées de la région. Si elles sont bien gérées, de nombreuses plantes sauvages indigènes sont d'excellentes plantes compagnes. Lorsqu'elles sont jeunes, elles stimulent la croissance des espèces cultivées et éloignent les ravageurs et les maladies. Elles protègent et améliorent également le sol, ou corrigent indirectement son pH. De plus, ces espèces augmentent la matière organique du sol, constituant une précieuse source d'engrais (Götsch, 1992). Autrement dit, la présence naturelle de populations d'espèces pionnières indigènes dans les zones cultivées favorise la complexification des relations interspécifiques et la formation de nouvelles niches écologiques, propriétés émergentes dans les systèmes agroforestiers. Les espèces cultivées peuvent participer à ces relations et niches, récoltant ainsi les bénéfices mutuels de la complexification de l'auto-organisation du système.

15 Voir description des filtres supra p. 28

Prenons l'exemple de Cooperafloresta : sur le nombre total de plantes actuellement présentes dans les agroforêts d'âges différents, 33 % proviennent de la régénération naturelle, encouragée et gérée dans les agroforêts (Steenbock et al., 2013b).

Genèse de la pratique d'élagage

Dans son rapport Ernst Götsch rapporte qu'après deux ans de désherbage sélectif, on a observé une croissance ralentie des plantes cultivées. On a constaté que la croissance des arbres et arbustes ayant germé dans la zone deux ans plus tôt commençait à inhiber la croissance des cultures. Lorsque ces arbres et arbustes pionniers ont été coupés, en tout ou en partie, la communauté entière a été revigorée et a connu une croissance explosive. C'est ainsi qu'Ernst décrit ses débuts dans la pratique de la taille (Götsch, 1992). D'autre part, dès le départ, Ernst a planté un grand nombre d'espèces capables de prospérer dans ces situations, dans des zones à végétation pauvre ou des espaces ouverts, à forte densité, aux côtés d'espèces fruitières et ligneuses, dans l'objectif d'obtenir des rendements à moyen et long terme.

Cette opération a été très fructueuse, mais uniquement dans les zones où une taille importante de la végétation établie avait été réalisée avant la plantation. Cette constatation a conduit Ernst à penser que le facteur déterminant du taux de croissance et de la productivité du système n'est pas la qualité initiale du sol, mais plutôt la composition et la densité des individus d'une communauté végétale, ainsi que la présence d'une future génération de plantes, ou « espèces du futur »¹⁶.

Comme décrit précédemment et comme l'expérience le rapporte, la succession des espèces reflète la succession des consortiums, insérés dans des ensembles de niches écologiques différentes. Entre un consortium et le suivant, la présence d'« espèces facilitatrices » favorise davantage la détermination des conditions pour le consortium suivant. Une fois cette amélioration des facteurs favorables établie, le rôle de l'espèce facilitatrice est de quitter le système. L'élagage total ou partiel des individus les plus grands ou les plus anciens, précisément ceux qui ont déjà rempli leur rôle de facilitateur, peut accélérer le processus de succession, créant ainsi des conditions propices au consortium suivant. Ainsi, l'élagage, en plus de favoriser l'entrée de la lumière dans les différents « étages » de l'agroforesterie, accélère le processus de succession.

La pratique de l'élagage peut être résumée comme suit : les arbres et arbustes matures sont rajeunis par l'élagage ; Les arbres et arbustes ayant déjà rempli leurs fonctions d'amendement du sol et ayant été remplacés par des individus issus de la culture intercalaire suivante sont coupés. Toute leur matière végétale est soigneusement hachée et répartie uniformément sur le sol, en veillant à ce que les tissus ligneux (branches et troncs) restent en contact direct avec le sol. Outre la maturité de l'individu, d'autres facteurs sont également pris en compte lors de la taille, comme son aptitude à la stratification communautaire. Il convient de prêter attention à la plante existante sous celle à tailler, qui la remplacera lors de la culture intercalaire suivante. Ainsi, tant la plante à tailler que celle qui subira les conséquences de cette taille sont prises en compte, car la taille influence la disponibilité de la lumière, de l'espace et de la matière organique dans le système¹⁷.

16 Ernst Götsch, Natural, succession of species in agroforestry and in soil recovery Autoédition 1992. Document traduit et publié par Gilles Lemieux en 1994 sous le titre *Remise en état des sols par l'utilisation du processus naturel de succession des espèces*, Publication n° 116 du Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux de l'Université Laval. Première édition 1994, deuxième édition, novembre 2003)

17 Ernst Götsch, Break-through in agriculture. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1995. 22 p.

Sol, résultat des pratiques agroforestières

Le sol est un système vivant issu des relations non linéaires entre les minéraux, les organismes du sol et les plantes¹⁸. Ces relations entre les composants du sol s'établissent lorsque l'énergie et la matière contenues dans les plantes servent de nourriture aux organismes du sol. En utilisant cette énergie et cette matière et en excréant des déchets, les organismes provoquent un flux d'énergie et de matière, qui assure le maintien et l'évolution du système pédologique et, grâce à ces relations non linéaires, fournit les conditions nécessaires au maintien et à l'évolution des agroforêts.

En tant que système vivant, le sol reflète les pratiques agricoles et les relations qui interviennent dans la gestion des plantes. En gérant une agroforêt, l'homme gère le flux d'énergie et de matière qui entraîne l'ensemble du système vers une complexité structurelle, augmentant son amplitude et diminuant sa vitesse ; ou, pour simplifier, si cela permet une diminution de l'amplitude et une augmentation de la vitesse de l'écoulement, comme le montre la description dans le schéma 6.

Les organismes du sol, qui comprennent des microorganismes (bactéries, actinomycètes, champignons, algues, protozoaires, virus) et des animaux (acariens, nématodes, araignées, insectes, fourmis, vers de terre, mille-pattes, escargots, souris), sont responsables de l'écoulement. Le nombre d'organismes présents dans le sol est important, comme le montre le tableau 2.

Tableau 2. Nombre estimé et matière vivante de quelques organismes dans un sol non cultivé en conditions tropicales. Données présentées dans Lopes Assad (1997).

Organismes	Nombre estimé d'individus par m ²	Matière vivante estimée en grammes
Bactéries	$10^{13} - 10^{14}$	$10 - 10^2$
Actinomycètes	$10^{12} - 10^{13}$	$10 - 10^2$
Champignons	$10^{11} - 10^{11}$	$10 - 10^2$
Nématodes	$10^8 - 10^{10}$	0,1 - 10
Acariens	$1-3 \times 10^{14}$	0,1 - 10
Collemboles	$0,5-2 \times 10^5$	$1 - 10^2$
Larves de coléoptères	$10 - 10^3$	0,5 - 10
Larves de diptères	$10 - 10^3$	0,5 - 10
Vers de terre	$1-5 \times 10^2$	$0,1 - 10^2$
Termites	$10^2 - 10^5$	0,05 - 50
Fourmis	$10^2 - 10^5$	0,05 - 50

Concernant la taille, il existe trois grands groupes de décomposeurs du sol, ceux qui utilisent les plantes comme source de nourriture. Cette classification a été présentée par Lopes Assad (1997) et est reproduite dans le tableau 3.

18 Vezzani, F.M.; Mielniczuk, J. O solo como sistema. Curitiba: edição dos autores, 2011.

Tableau 3. Classification des décomposeurs du sol selon la taille. Source : adapté de Lopes Assad (1997).

Groupes	Taille
Microfaune	< 0,2 mm
Macrofaune	< 0,2 a 4 mm
Macrofauna e	4 a 80 mm

La fonction principale des trois groupes est de réguler la dynamique du carbone, ce qui se traduit par le flux d'énergie et de matière dans le système. À la manière d'un réseau trophique, certains servent de nourriture aux autres, et ainsi, l'énergie et la matière issues de la photosynthèse traversent le système. Les macroorganismes se nourrissent directement des résidus végétaux et se déplacent dans le sol, créant ainsi des pores. Les mésoorganismes se nourrissent de microorganismes et occupent les espaces poreux du sol, souvent formés par des macroorganismes. Les microorganismes se nourrissent également des microorganismes eux-mêmes et de composés organiques. Ils forment ainsi un réseau trophique, et par conséquent, tous les groupes régulent le flux d'énergie et de matière issus de la photosynthèse.

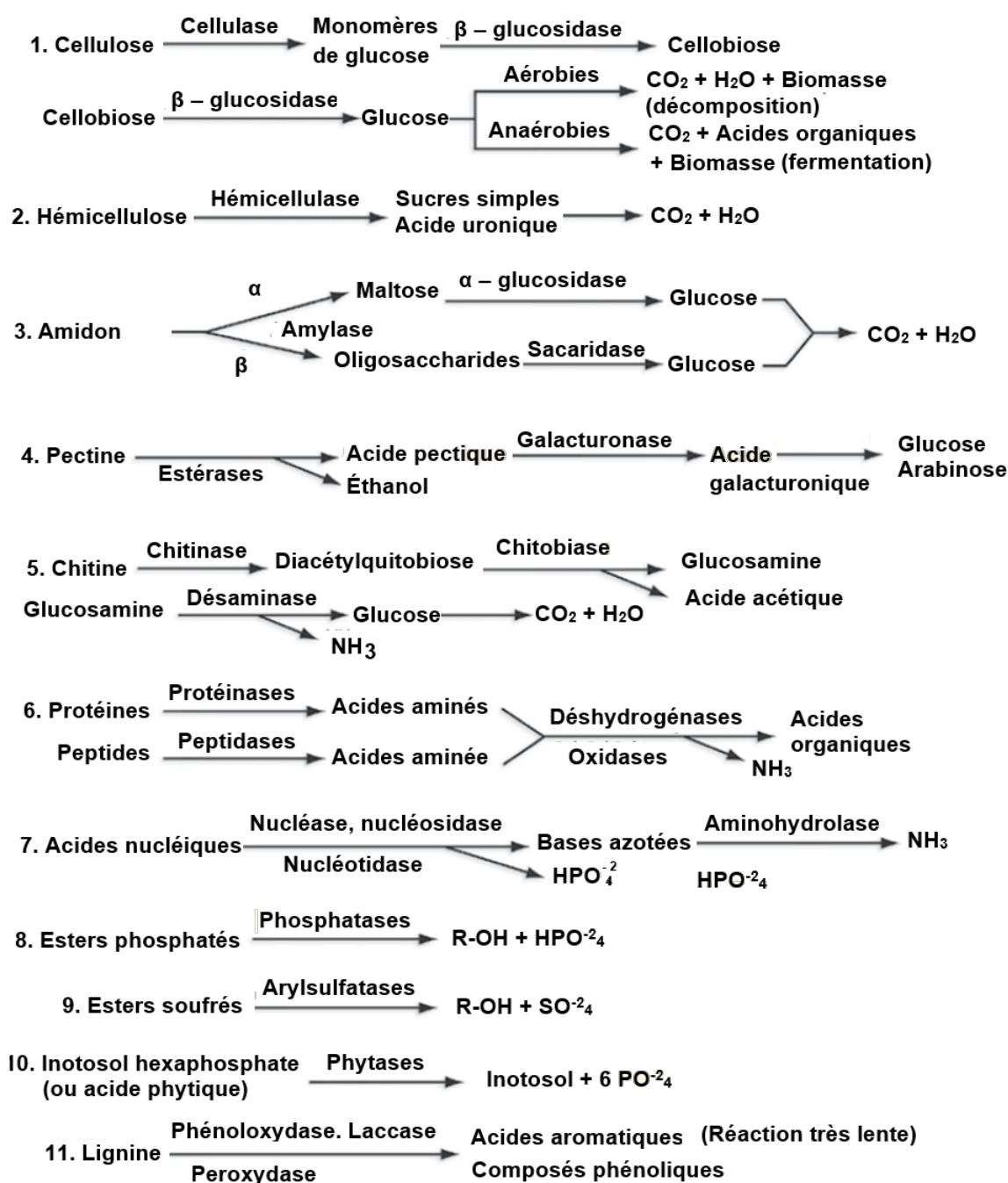
Par conséquent, l'absence d'un groupe compromet le flux, ce qui peut endommager et décomposer le système, car les agroforêts ont besoin de flux pour rester en vie. Pour que le flux soit maintenu à la même amplitude et à la même vitesse, la source d'énergie et de matière – la production de matière végétale par photosynthèse – doit être maintenue, comme indiqué précédemment. Mais non seulement la source doit être maintenue, mais aussi la source d'énergie et de matière. La variété des sources de nourriture est également cruciale. Chaque groupe d'organismes est responsable de l'utilisation d'un composé spécifique. Voir les réactions de décomposition de certains composés organiques végétaux du schéma 16.

Notez sur le schéma 16 que chaque réaction implique une enzyme spécifique (nom à côté de la flèche) qui l'active. Les enzymes proviennent des microorganismes du sol ; par conséquent, pour que tous les composés organiques végétaux soient utilisés et décomposés, une grande variété d'enzymes, c'est-à-dire une grande variété d'organismes, doit être présente dans le système. Pour que tous ces organismes soient présents, la nourriture doit être disponible pour stimuler et favoriser la croissance et le développement de tous les groupes. Or, comme nous l'avons vu précédemment, la source de nourriture des systèmes vivants de la Terre est la photosynthèse, principalement des plantes. Ainsi, la diversité végétale détermine la richesse et la diversité des organismes du sol¹⁹. Les systèmes agroforestiers, guidés par les principes de la succession écologique, répondent pleinement à ce besoin du réseau trophique du sol.

Comme tout système vivant, le flux d'énergie et de matière dans les agroforêts favorise l'auto-organisation de ses composants en structures de complexité variable.

19 Beare, M.H.; Coleman, D.C.; Crossley Jr, D.A.; Hendrix, P.F.; Odum, E.P. « A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling ». *Plant and Soil*, Dordrecht, 170: 5-22, 1995.

Fig.16. Transformations biochimiques des composés organiques médiées par les microorganismes et leurs enzymes. Source : Siqueira et Franco (1988).



L'énergie et la matière dans le système sol-plante-organisme constituent un spectre de matière organique, allant des parties des tissus végétaux (parties aériennes et racines) et des organismes du sol en décomposition, des exsudats végétaux et animaux, à la matière organique humifiée, en passant par la biomasse microbienne du sol. Nous appelons cet ensemble de matière organique « matière organique du sol ».

Ces différents compartiments de matière organique du sol ont des temps de résidence distincts dans le système, selon leurs caractéristiques. En climat froid, Schmidt et al. (2011) ont présenté des

données indiquant une durée de persistance moyenne de la matière organique du sol de 50 ans, avec des variations, selon le compartiment, entre 5 et 270 ans. Duxbury et al. (1989) ont proposé les temps de résidence présentés dans le tableau 4.

Tableau 4. Temps de résidence des types de matière organique du sol.
d'après Duxbury et al. (1989).

Types de matière organique	Durée de résidence (années)
Facile à décomposer : feuilles, racines et exsudats	0,25
Résistant à la décomposition : matières végétales de composition complexe	Non déterminé
Biomasse microbienne	0,25
Matière organique particulaire	Variable*
Substances humique	1000

* Le temps de séjour des matières organiques particulaire dépend de la protection physique des agrégats du sol, contrôlée par la texture, la minéralogie et les pratiques de retournement du sol.

Les feuilles, les racines et les exsudats sont composés de composés organiques aux structures chimiques plus simples, ce qui facilite leur assimilation par les organismes du sol. Ainsi, en quelques mois seulement, les feuilles, les racines et les exsudats sont déjà consommés, et une partie du carbone contenu dans ces composés est incorporée à la biomasse microbienne, tandis qu'une autre partie se transforme en matière organique humifiée.

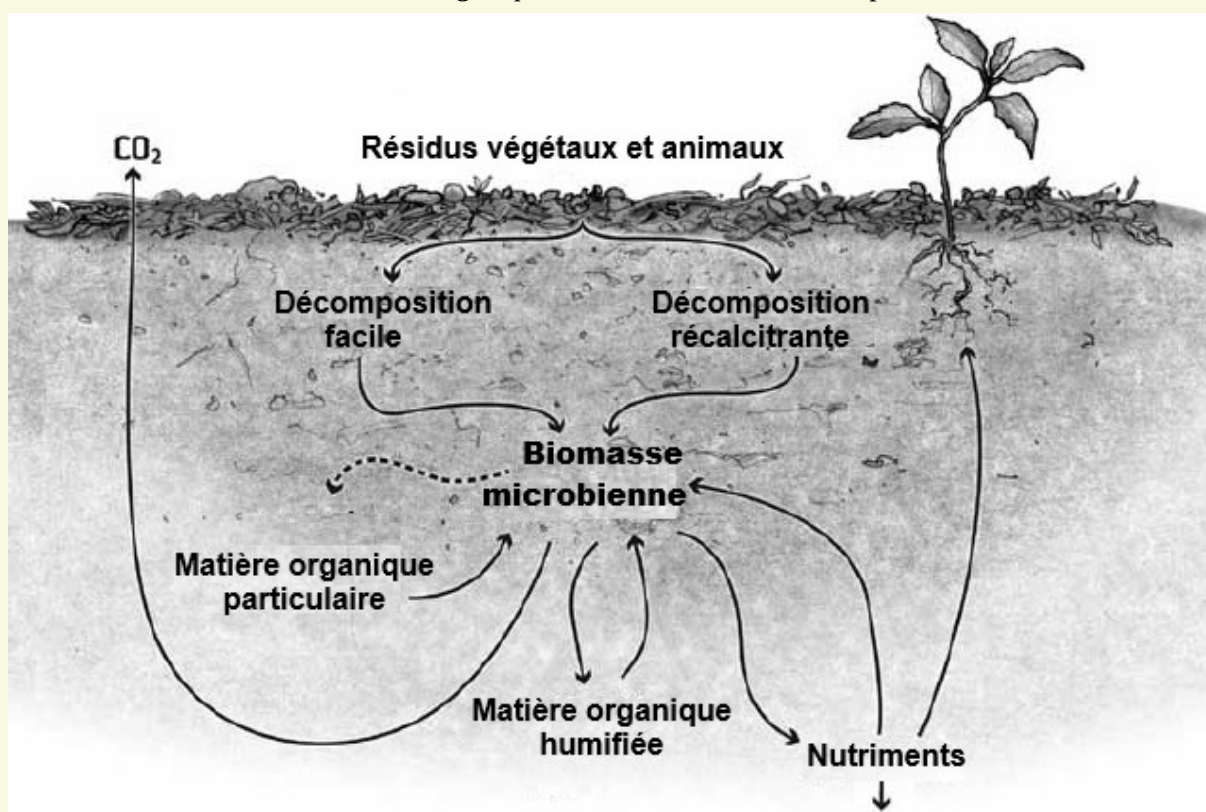
Du CO₂ est également libéré dans l'atmosphère comme sous-produit du processus de décomposition, et des nutriments sont disponibles dans le sol, lesquels peuvent être consommés par les microorganismes et/ou absorbés par les plantes.

Ce processus démontre clairement que les compartiments de matière organique sont interconnectés et interdépendants. Comme tous les systèmes vivants, la matière organique du sol résulte de relations non linéaires entre ses composants.

Le compartiment résistant à la décomposition est composé de matière végétale à structure organique plus complexe. Ces structures végétales peuvent persister plusieurs mois à la surface du sol. Il est important de souligner ici que les branches et les troncs issus de l'agroforesterie ne sont pas considérés comme de la matière organique du sol dans cette dynamique, car ils restent longtemps à la surface du sol, subissant la fragmentation des tissus par la faune du sol, et ce n'est qu'ensuite qu'ils entament le processus de décomposition par la biomasse microbienne.

La biomasse microbienne a besoin de composés organiques comme source d'énergie et de carbone pour son activité et son développement. En utilisant le carbone de tous les autres compartiments, les microorganismes incorporent du carbone à leur biomasse, constituant ainsi l'un des compartiments de la matière organique du sol. De plus, nous soulignons, une fois de plus, que la biomasse microbienne est le compartiment qui assure la circulation de l'énergie et de la matière dans le système sol-plante-organisme. Le cycle de vie des organismes est court et la population se renouvelle rapidement.

Fig.17. Représentation schématisque de la dynamique de transformation de la matière organique du sol entre différents compartiments.



Le compartiment de matière organique particulaire est constitué de parties de tissus végétaux ou animaux facilement ou résistants à la décomposition. La surface de cette matière est colonisée par la population microbienne, qui libère des mucilages et des exsudats, sous-produits de ce processus de décomposition des extrémités. Ces produits du métabolisme microbien, produits à la surface de la matière organique particulaire en décomposition, interagissent avec les particules minérales isolées ou agrégées du sol, formant de véritables capsules de matière organique incrustées de minéraux et/ou d'agrégats.

L'interaction organo-minérale étant extrêmement forte et la taille des pores formés lors de ce processus étant inférieure au diamètre du corps des microorganismes (ce qui empêche les décomposeurs d'accéder à la matière), la matière organique reste dans le système. Le compartiment de matière organique particulaire reste stable jusqu'à ce qu'un organisme parvienne à pénétrer l'espace restreint formé par l'interaction organo-minérale autour de la matière organique. Par conséquent, la décomposition de la matière organique particulaire dépendant de la dynamique de la vie dans le système, il est impossible d'estimer son temps de résidence dans le sol.

Lorsque les organismes pénètrent à l'intérieur de la matière organique particulaire, le processus de décomposition est terminé et le chemin du carbone suit le même chemin que pour les feuilles, les racines et les restes d'organismes, c'est-à-dire qu'une partie est transformée en biomasse microbienne, une partie est transformée en matière organique humifiée, une partie en nutriments et une partie en CO_2 , comme le montre le schéma 17.

La matière organique particulaire joue un rôle important dans les relations entre les compartiments de matière organique du sol. Elle favorise le maintien de l'activité biologique, car elle constitue une

source d'énergie et de carbone facilement disponible (lorsque le microbiote y a accès), et, par conséquent, le flux d'énergie, de matière et le cycle des nutriments. De plus, la matière organique particulaire fait partie des structures plus larges du sol (macro-agrégats), permettant l'émergence de propriétés liées à la structure physique du sol, influençant la porosité et la présence d'air et d'eau dans l'environnement pédologique, facteurs essentiels à la vie des organismes du sol et à la photosynthèse des plantes.

La matière organique humifiée est constituée de composés organiques, également de structure chimique simple, mais présentant une charge de surface élevée due à la formation de groupes fonctionnels résultant du processus de décomposition. Ces composés persistent dans le sol grâce à de fortes interactions organominérales, voire à des conditions chimiques du microenvironnement qui entravent la progression du processus de décomposition par le microbiote (acidité, hydrophobicité). Une déconnexion physique entre les décomposeurs et les molécules organiques peut également se produire, ce qui signifie que les composés organiques restent dans des espaces du sol physiquement éloignés de la communauté en décomposition.

Ce phénomène est particulièrement fréquent lorsque la matière organique se déplace dans le profil du sol avec l'écoulement de l'eau, par le transport de la faune du sol ou par l'ajout de systèmes racinaires plus profonds, tandis que la concentration de biomasse microbienne se situe à la surface. Par conséquent, la matière organique humifiée reste dans le système, et cette permanence est une propriété émergente très précieuse, car elle contribue au maintien de la matière organique du sol.

Les fonctions de la matière organique du sol sont liées à sa réactivité. Les composés organiques de tous les compartiments de la matière organique du sol possèdent des charges électriques, responsables de l'adsorption des nutriments pour les plantes et les organismes, ainsi que d'autres composés organiques et inorganiques (tels que les produits agrochimiques). Ils interagissent également avec les organo-minéraux (formant la structure physique du sol) et complexifient les composés, les inactivant, y compris ceux qui sont nocifs pour l'environnement. Dans les sols tropicaux et subtropicaux, la matière organique est la principale source de charges négatives, contribuant jusqu'à 90 % à la capacité d'échange cationique (forme ionique de la plupart des nutriments végétaux), en particulier dans les sols contenant des minéraux à faible activité réactive (Silva et Mendonça, 2007).

La quantité de charge négative dans la matière organique et les minéraux est déterminée par la capacité d'échange cationique (CEC). En comparant la CEC de la matière organique humifiée, qui est de 400 à 1 400 $\text{cmolc}\cdot\text{kg}^{-1}$, avec certains minéraux du sol, comme la kaolinite (un phyllosilicate feuilleté 1:1), dont la CEC est de 3 à 15 $\text{cmolc}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Melo et Wypych, 2009), et la vermiculite (un phyllosilicate feuilleté 2:1), dont la CEC est de 115 à 250 $\text{cmolc}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Kämpf et al., 2012), la contribution significative de la matière organique à la CEC du sol devient évidente (Canellas et al., 2008). Outre la réactivité, la propriété colloïdale de la matière organique, qui est le grand rapport surface/volume, se traduit par la surface spécifique (SSA) – la surface disponible pour les réactions chimiques (Silva et al., 2000). Cette propriété favorise la « flexibilité » de la molécule organique, favorisant toutes les interactions auxquelles elle participe. C'est donc grâce à ces propriétés que la matière organique du sol remplit ses fonctions au sein du système sol-plante-organisme.

L'auto-organisation de ce système est due au flux de matière organique. Tout comme à la surface du sol, où la complexité de la végétation évolue pour construire des niches par étapes successives de richesse croissante en espèces végétales et, par conséquent, une augmentation du nombre de relations non linéaires et de la complexité structurelle, sous la surface du sol, le système s'auto-

organise également en structures de complexité croissante, en fonction de l'ampleur, de la vitesse et de la richesse des composés organiques issus du flux d'énergie et de matière (Vezzani et Mielniczuk, 2011), c'est-à-dire de la quantité et de la richesse de matière organique ajoutée au système.

Le schéma 18 illustre le fonctionnement du système sol-plante-organisme et la formation de structures à des niveaux de complexité croissants. Au début du processus, le sol s'auto-organise en structures allant des interactions organominérales aux agrégats d'environ 0,25 mm.

Au cours de cette étape, la complexité de la structure augmente, car plus la taille des agrégats augmente, plus le nombre de constituants augmente. La matière organique issue de la croissance des racines, des organismes du sol et des résidus végétaux déposés en surface suite à la taille constitue l'agent structurant de ces agrégats. Ces structures sont donc composées de minéraux du sol, de molécules organiques et de nutriments, qui interagissent à la fois avec les minéraux et la matière organique.

La formation de structures de sol plus grandes (supérieures à 0,25 mm), plus complexes et plus diversifiées est principalement due à l'action mécanique des racines et des hyphes fongiques rhizosphériques (et de l'ensemble de l'environnement résultant de cette interaction) dans l'imbrication des unités plus petites. Les racines, en se développant et en restant actives, extraient la solution du sol et exsudent des composés organiques.

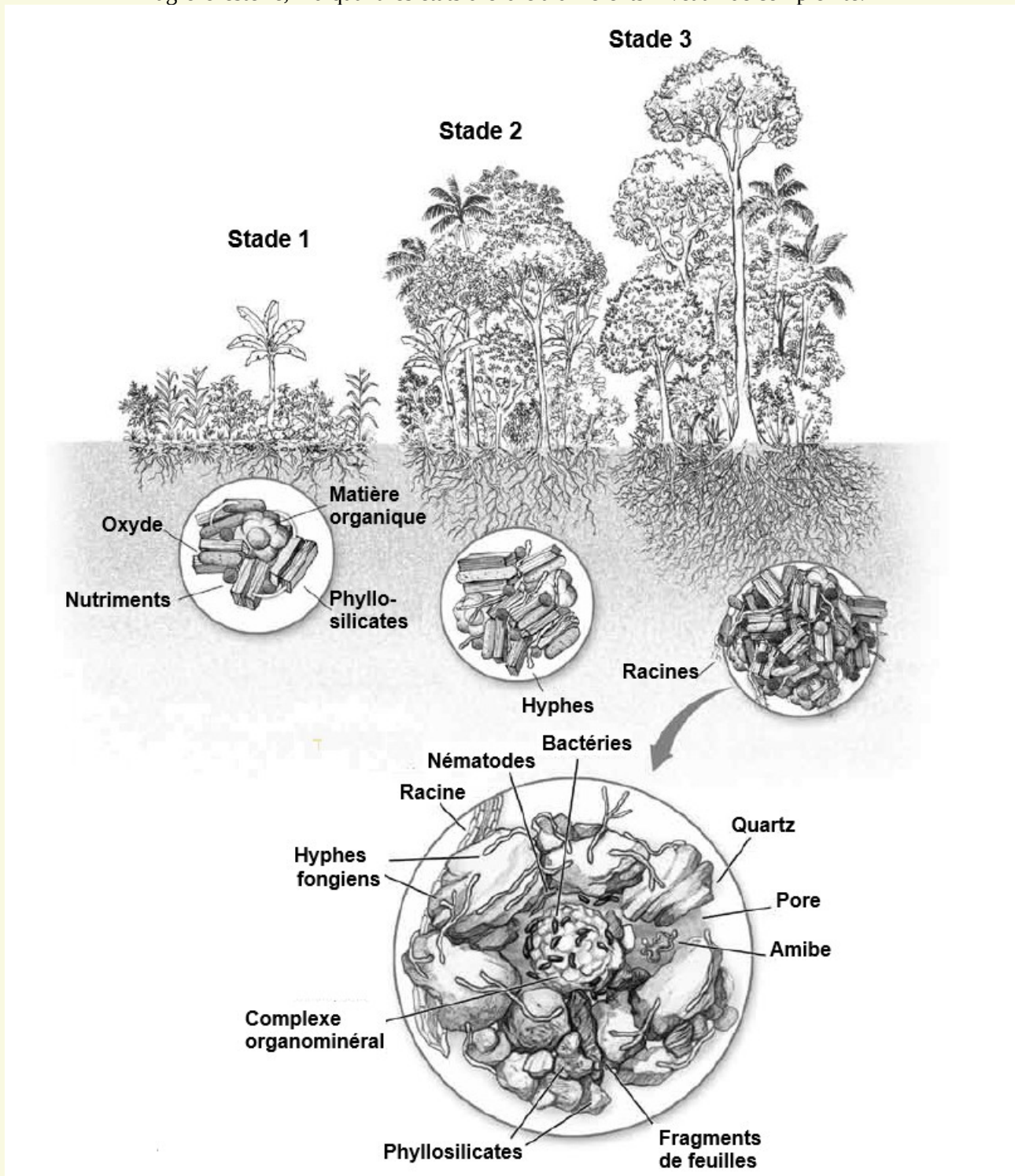
De concert avec les champignons rhizosphériques associés, principalement les champignons mycorhiziens vésiculaires-arbusculaires et les champignons saprophytes, entrelacent mécaniquement les plus petits agrégats du sol. L'environnement du système racinaire est très riche en composés organiques facilement assimilables par les organismes du sol, favorisant la stabilisation des macroagrégats et le développement de la vie du sol, responsable des réactions biochimiques du cycle et de la disponibilité des nutriments.

Ainsi, les macroagrégats sont formés de minéraux, de microorganismes, de composés organiques et inorganiques, de parties de tissus végétaux et de macro-organismes, dans un réseau de relations non linéaires, avec une grande quantité d'énergie et de matière retenue sous forme de composés organiques, caractérisant un niveau élevé de complexité (Vezzani & Mielniczuk, 2011).

Il est important de souligner qu'au début du processus d'établissement de l'agroforesterie (état 1 du schéma 18), la quantité de matière végétale produite par la partie aérienne et les racines est encore faible et, par conséquent, l'ampleur du flux d'énergie et de matière entrant dans le système pédologique est faible. Un autre aspect important à ce stade précoce de la succession est le profil du sol utilisé par les plantes et, par conséquent, les organismes. La petite taille des plantes entraîne une surface plus importante du système racinaire, et la stimulation du biote du sol ainsi que les échanges et relations entre les composantes du système sol-plantes-organismes se limitent à la couche la plus superficielle.

Par conséquent, le flux d'énergie et de matière qui débute avec la photosynthèse est à l'origine de l'organisation et de la complexité de la structure du système sol-plantes-organismes. L'interaction entre les composantes du sol, des plantes et des organismes aboutit à la construction d'un système de production complexe capable de remplir les fonctions écosystémiques. Comme indiqué précédemment, des propriétés émergentes apparaissent à chaque niveau de complexité structurelle²⁰.

Fig.18. Représentation schématique de l'auto-organisation du système sol-plante-organisme en agroforesterie, indiquant les états d'ordre à différents niveaux de complexité.



Dans le cas de l'agroforesterie, l'état 1 du schéma ci-dessus représente les premiers stades de développement de la plante, où les flux d'énergie et de matière sont faibles et où le système racinaire est encore naissant. Avec ces composantes, les relations non linéaires traduisent une présence accrue de microagrégats, dont la structure est microporeuse et capable de retenir l'eau dans le sol. Dans ces conditions, la matière organique est présente, mais en concentrations peu élevées. Quoi qu'il en soit, elle remplit ses fonctions de rétention/absorption des nutriments ; de

rétenction et/ou de complexation de composés potentiellement nocifs pour le système et le milieu environnant ; et de source d'énergie et de matière (nourriture) pour les organismes du sol.

L'état 2 se caractérise par une richesse végétale accrue et l'utilisation de différentes strates lumineuses, ce qui se reflète également dans la richesse et l'utilisation accrues des strates du profil de sol. Des structures pédologiques plus complexes se forment en raison de la complexité du système racinaire et de la diversité du biote. La teneur en matière organique augmente, générant des propriétés émergentes plus complexes et plus nombreuses.

À mesure que la structure végétale devient de plus en plus complexe (état 3), la structure du sol devient également de plus en plus complexe, augmentant les propriétés émergentes et améliorant les fonctions écosystémiques. Les propriétés émergentes de cette condition de structure complexe sont, de manière générale, les suivantes :

- amélioration de la structure physique du sol, augmentant la résistance à l'érosion hydrique et éolienne ;
- ratio adéquat de micropores, responsables de la rétention d'eau, et de macropores, responsables du drainage de l'eau et de l'aération du sol, favorisant des flux d'eau et d'air adéquats ; meilleure rétention/adsorption des nutriments et augmentation du stockage des nutriments dans le système ; meilleure rétention/adsorption et/ou complexation des composés organiques et inorganiques, potentiellement nocifs pour l'environnement, atténuant, voire inactivant, leurs effets toxiques ou polluants ;
- augmentation de la quantité de nutriments pour les plantes et les organismes à partir de composés organiques, qui contiennent des éléments essentiels pour les plantes dans leur composition, ce qui entraîne également un bénéfice pour le biote du sol, en raison de la plus grande quantité d'énergie et de carbone provenant des composés organiques ; augmentation de l'efficacité du cycle des éléments chimiques, en favorisant les conditions physiques et nutritionnelles pour l'activité des microorganismes ;
- augmentation de la diversité du biote du sol et du système pédologique, en raison de la plus grande quantité de carbone, favorisant les conditions pour que le sol résiste aux stress et serve de filtre et de tampon environnemental ;
- augmentation du stock de carbone, évitant l'émission de CO₂ dans l'atmosphère, et réduisant ainsi l'effet de serre ; résistance aux perturbations et résilience du système.

Gestion des sols en agroforesterie

La gestion des sols en agroforesterie doit refléter l'application pratique de tous les aspects théoriques abordés jusqu'ici dans ce livre. Récapitulons donc brièvement ce que nous avons vu.

L'énergie et la matière contenues dans les plantes servent de nourriture aux organismes du sol. L'agroforesterie cherche donc à contribuer à la formation d'un réseau de relations non linéaires entre ces composants. En utilisant cette énergie et cette matière et en excréant des déchets, les organismes créent un flux d'énergie et de matière, qui permet au système agroforestier de se maintenir et d'évoluer.

Dans ce processus, l'absence d'un groupe d'organismes compromet ce flux. Puisque les agroforêts, comme les systèmes vivants, ont besoin de flux pour maintenir leur vitalité, compromettre ce flux

peut entraîner des dommages et la décomposition du système. Pour que le flux d'énergie et de matière dans les systèmes agroforestiers se produise à un rythme et une ampleur adéquats, il est nécessaire de promouvoir et de stimuler la diversité végétale.

La richesse végétale accrue favorisée par les agroforêts favorise la diversification des organismes vivants et des systèmes racinaires, dont l'architecture, la taille, la physiologie, les exsudats et les associations avec les organismes sont très variables. En ce sens, ils interagissent de manières variables avec les processus écologiques entre les minéraux du sol, les plantes et les organismes, favorisant la dynamique de la structure biologique, physique et chimique du système. Par conséquent, la diversité renforce les relations non linéaires entre les composants et, par conséquent, la formation d'une structure systémique plus complexe, tant au-dessus qu'au-dessous de la surface du sol.

À cet égard, il est important de souligner le profil d'utilisation des terres des systèmes agroforestiers. La stratification verticale des plantes cultivées en consortiums étend l'utilisation verticale vers la profondeur du sol explorée.

Par conséquent, le flux d'énergie et de matière dans le système s'effectue sur une zone verticale plus large, ce qui permet aux processus écologiques de se dérouler sur un profil plus large et améliore l'utilisation efficace des ressources environnementales. Parce que les arbres ont des systèmes racinaires plus profonds que les cultures annuelles, ils absorbent des quantités importantes de nutriments du sous-sol, qui sont déposés à la surface du sol par les feuilles et les branches tombées, ou par la taille ou la mort des racines superficielles.²¹

Ce processus de translocation augmente l'apport de nutriments disponibles dans les couches superficielles du sol. Ainsi, compte tenu des aspects déjà abordés, il est également important de considérer que, dans un système agroforestier diversifié, l'ensemble des racines des différentes plantes forme un compartiment spécialisé pour solubiliser et accéder à différents nutriments pour le système, contribuant ainsi à la structure physique et à la vie du sol. La couverture et la protection du sol dans les systèmes agroforestiers sont essentielles pour garantir une humidité relative et une structure poreuse du sol élevées, ainsi que pour minimiser l'érosion.

L'objectif est donc de perturber le sol le moins possible, de maintenir et d'amplifier les niches écologiques des organismes du sol et, par conséquent, de libérer des nutriments pour soutenir le système agroforestier. Une taille fréquente et intensive est essentielle à cette amélioration.

En agroforesterie, tout le matériel de taille est soigneusement coupé et déposé sur le sol, optimisant ainsi le contact entre le matériel et la surface. Cela facilite la dégradation de la matière végétale, contribuant ainsi à une succession écologique plus rapide que dans les clairières de forêts naturelles. Dans les clairières, la chute des arbres ou des branches n'a pas d'impact immédiat sur le contact entre ces matériaux et le sol, ce qui ralentit considérablement leur utilisation par les organismes du sol.

La structure racinaire multicouche, la forte densité végétale, la taille fréquente et le dépôt soigné du matériel de taille en surface favorisent des conditions idéales pour l'augmentation de la matière organique dans les sols agroforestiers. Cette matière organique, outre son importance comme réservoir de nutriments et son rôle dans le cycle des nutriments, remplit la fonction fondamentale d'apport d'énergie et de matière à toute la vie du sol, qui, par son activité, transforme

21 Glover et Beer, 1986 ; Young, 1989 ; Garrity et al., 1995

progressivement l'écosystème, donnant naissance à de nouvelles structures aux propriétés émergentes plus complexes.

Penereiro (1999) a évalué cette transformation du sol en comparant les propriétés du sol dans deux zones de même type de sol, de pente similaire et sur la même exploitation agricole du sud de Bahia. Les deux zones étaient des pâturages dégradés douze ans avant cette étude. L'une a été soumise à l'agroforesterie, tandis que l'autre a bénéficié d'une régénération naturelle, qui, au moment de l'étude, était à un stade intermédiaire de régénération (capoeirão).

- Bien que les quantités de matière organique ne diffèrent pas entre les zones, les données sur l'acidité et les niveaux de nutriments variaient significativement, indiquant des différences dans la nature et/ou la dynamique de la décomposition des matières végétales.
- Dans la zone agroforestière, le pH (en H₂O), qui mesure l'acidité du sol, déterminé dans les couches 0 et 5 cm, était de 5,6, tandis que dans la zone de forêt secondaire, il était de 5,3. Dans la couche 5 à 20 cm, la zone agroforestière avait un pH de 5,4, et la zone de forêt secondaire, de 5,0.
- Les niveaux de calcium et de magnésium étaient significativement plus élevés dans la zone agroforestière. Cependant, l'élément avec la variation la plus frappante entre les deux zones était le phosphore, dont la teneur dans la zone agroforestière était environ sept fois plus élevée dans la couche 0 à 5 cm et environ quatre fois plus élevée dans la couche 5 à 20 cm.

Après analyse de ces résultats, l'auteur soutient que les microorganismes jouent un rôle fondamental dans le cycle du phosphore, en minéralisant les réserves de phosphore organique, en dissolvant les sources insolubles de phosphates inorganiques et en captant le phosphore soluble dans les zones inaccessibles aux racines, le transférant aux plantes. La présence de composés organiques dans le sol (par exemple, certains oxalates) pourrait également jouer un rôle important dans ce processus, car ils favorisent la chélation du fer, réduisant ainsi la disponibilité de cet élément pour réagir avec le phosphore (Jordan, 1990).

Lima (1994) a également constaté des niveaux de phosphore plus élevés dans les systèmes agroforestiers de la plaine inondable amazonienne que dans les zones agricoles.

Selon ce chercheur, cela confirme la capacité de ces systèmes à maintenir la fertilité des sols avec une faible exportation de nutriments, conditionnée par le maintien d'une structure multicouche et le type de gestion, qui permet la formation d'une couche dense de matière organique à la surface du sol.

Dans le cadre de Cooperafloresta, des études sur les propriétés biologiques, physiques et chimiques du sol d'agroforêts de cinq et dix ans ont récemment été menées, en les comparant à des zones maintenues en régénération naturelle – c'est-à-dire des zones de forêts indigènes en cours de régénération – pendant dix ans.

Les agroforêts et les zones en régénération naturelle étaient auparavant des pâturages, avec des types de sols et des pentes similaires (néosol réolithique et pentes d'environ 40 %). Dans les agroforêts de cinq et dix ans, une évaluation qualitative de la faune vivant à la surface du sol, à l'aide de pièges de capture, a indiqué respectivement 10 126 et 10 781 individus ; tandis que dans la zone en régénération naturelle, on en dénombrait 8 597 (Cezar, 2013). La richesse des espèces fauniques ne variait pas entre les systèmes, mais la gestion agroforestière a favorisé le développement du nombre d'organismes.

La taille de la biomasse microbienne dans les agroforêts de cinq ans était de 686 mg de carbone par kg de sol dans les 2,5 cm supérieurs du profil (où se produit la plus grande activité biologique de décomposition de la matière organique et de cycle des éléments), et l'activité de ce microbiote (mesurée par la libération de dioxyde de carbone [CO₂] dans l'atmosphère) était de 3,7 mg de carbone sous forme de CO₂ par kg de sol en une heure. Dans les agroforêts de 10 ans, dans la même couche de sol de 0 à 2,5 cm, la biomasse microbienne était de 478 mg de carbone par kg de sol, et l'activité était également de 3,7 mg de carbone sous forme de CO₂ par kg de sol en une heure (Cezar, 2013). Ces données indiquent que les agroforêts plus jeunes sont plus efficaces dans l'utilisation du carbone du sol, car avec la même activité, elles ont incorporé plus de carbone dans leur biomasse. Ce fait est pertinent pour les systèmes agroforestiers, car il témoigne de leur grande capacité à favoriser la vie du sol et l'exécution de ses fonctions, maintenant ainsi le système actif et productif.

Les données sur la décomposition de la litière de feuilles dans ces zones confirment la dynamique des agroforêts plus jeunes, qui reflètent des pratiques de gestion plus intensives. Dans les agroforêts de cinq ans, le taux de décomposition était de 213 mg par gramme de feuille en décomposition par jour, avec une demi-vie dans le système de 33 jours, tandis que dans les agroforêts de dix ans, le taux de décomposition était de 186 mg par gramme de feuille en décomposition par jour et une demi-vie de 37 jours. La régénération naturelle présentait un taux de décomposition de 181 mg par gramme de feuille en décomposition par jour et une demi-vie de 38 jours (Schwiderke, 2013).

Les propriétés physiques du sol, qui sont étroitement liées à l'activité vitale, ont démontré une conductivité hydrique élevée dans les sols agroforestiers dans la couche 0-10 cm. Les valeurs étaient de 1.480 mm par heure pour les agroforêts de cinq ans et de 1 930 mm par heure pour les agroforêts de dix ans (Shtorache, 2013), bien supérieures, par exemple, aux données présentées par Lima et al. (2008) pour les cultures annuelles dans un système sans labour de 4,39 mm par heure. Les données élevées de conductivité hydraulique du sol dans les agroforêts sont confirmées par la macroporosité dans la couche 0-10 cm, qui était de 0,33 et 0,32 m³ de pores par mètre cube de sol respectivement pour les agroforêts de 5 et 10 ans. Des valeurs bien supérieures à 0,10 m³ de pores par mètre cube de sol, seuil considéré comme critique, en dessous duquel la production agricole est compromise (Ferreira, 2010), car elles compromettent l'apport adéquat d'oxygène aux racines et aux organismes, ainsi que le drainage de l'eau dans le profil.

Ces résultats reflètent les systèmes racinaires des arbres qui construisent des biopores interconnectés dans le profil. Lorsque ces racines se décomposent au cours du processus de renouvellement des plantes, l'espace qu'elles occupaient devient des pores qui conduisent l'eau et l'air dans le système, créant ainsi les conditions propices au développement de davantage de vie.

De plus, les racines ajoutent bien sûr de l'énergie et du carbone aux organismes du sol dans les couches plus profondes, ce qui favorise l'activité biologique et l'incorporation profonde du carbone. Dans la couche 0-60 cm, qui, dans le cas de ce néosol régolithique, représente l'ensemble du profil du sol, les stocks de carbone sont restés inchangés. Les agroforêts de cinq ans présentaient 123 tonnes par hectare, celles de dix ans 125 tonnes par hectare et les zones en régénération naturelle 122 tonnes par hectare (Schwiderke, 2013). Cependant, le stock de phosphore dans les agroforêts de cinq ans était de 19,5 kg ha⁻¹ et dans celles de dix ans de 20,9 kg ha⁻¹, tandis que dans les zones en régénération naturelle depuis 10 ans, il était de 16,6 kg ha⁻¹ (Schwiderke, 2013). Ces données sont intéressantes car la matière végétale est extraite des agroforêts sous forme de produits destinés à la consommation et à la vente, mais les stocks de carbone restent à des niveaux similaires à ceux des

zones de régénération naturelle, où aucun carbone n'est extrait sous forme de produits végétaux. De plus, à l'instar des études de Lima (1994) et Penereiro (1999), citées précédemment, il est important de noter l'importance de la dynamique du phosphore dans les sols agroforestiers. À stocks de matière organique identiques, la teneur en phosphore est relativement plus élevée dans les sols agroforestiers.

Les propriétés biologiques, physiques et chimiques du sol étant interdépendantes (Vezzani et Mielniczuk, 2011), il est important de souligner la similitude des environnements pédologiques entre les agroforêts et les forêts indigènes en régénération identifiées lors des enquêtes. Les résultats indiquent que la gestion agroforestière des sols, fondée sur les aspects écologiques présentés ci-dessus, permet une production alimentaire en harmonie avec les processus de succession naturelle et le flux d'énergie et de matière dans le sol, confirmant ainsi l'hypothèse selon laquelle les systèmes agroforestiers peuvent être des systèmes de production durables.

Les voies de la biodiversité

En agroforesterie, la gestion de la lumière, de la photosynthèse, de la taille et du sol engendre une grande variété d'organismes vivants, autrement dit une vaste biodiversité. Il est donc essentiel de comprendre plus en détail certains des processus vitaux associés à la biodiversité pour cette gestion.

Il y a environ 3,5 milliards d'années, les premières formes de vie sont apparues sur Terre. L'établissement de structures codant l'organisation de la matière et sa répllication a permis à la vie de perdurer. Des modifications de ces structures codantes ont conduit à la génération de différentes organisations cellulaires. Bien que nombre de ces organisations n'aient pas survécu ou ne se soient pas répliquées, celles qui présentaient un avantage pour s'adapter à l'environnement d'une niche donnée ont intégré la biodiversité en constante augmentation au fil du temps.

Actuellement, le nombre d'espèces, à l'échelle planétaire, s'élève à environ 1,8 million d'organismes différents, si l'on ne considère que ceux déjà classés par l'homme (Heywood & Watson, 1997). Pour que la diversité existe, des défauts aléatoires dans les codes génétiques (ADN et ARN), appelés mutations, sont nécessaires. En principe, ces défauts nuisent au fonctionnement de la forme de vie concernée. Cependant, si la mutation crée une condition favorisant l'adaptation environnementale – ou l'adaptation à une nouvelle niche –, il existe une tendance à la reproduction et à la continuité de la forme de vie concernée. Les variations environnementales représentent des variations des possibilités d'adaptation. Ainsi, comme indiqué précédemment, il existe une forte relation entre la biodiversité et la variation des niches écologiques. Plus les espèces coexistent, plus le nombre de niches formées est élevé, et plus le nombre de niches est élevé, plus la variabilité est grande.

C'est dans les forêts tropicales que cette variabilité est la plus marquée. Là, l'incidence accrue de l'énergie solaire favorise une photosynthèse totale plus importante et, par conséquent, une productivité primaire accrue, c'est-à-dire une production accrue de matière végétale. Plus il y a de matière végétale, plus il y a d'énergie et plus la capacité à soutenir un grand nombre d'espèces est grande. Plus les forêts sont structurellement complexes, plus leur diversité est grande. De plus, les températures et l'humidité plus élevées sous les tropiques créent des conditions favorables à la croissance et à la survie de nombreuses espèces, et les taux de fécondation croisée sont plus élevés chez les plantes tropicales que dans les zones tempérées (Pianka, 1966 ; Ricklefs, 2003).

Quelles que soient les régions de la planète, cependant, derrière la grande variabilité des espèces, il y a toujours la contribution des environnements les plus divers. Au sein de cette grande variabilité des espèces, une immense variabilité génétique agit, telle une « usine à variation », créant les conditions d'adaptation des espèces à différentes niches et, à moyen terme, favorisant l'établissement de nouvelles espèces. C'est pour ces raisons que le terme biodiversité n'est plus aujourd'hui considéré comme un simple indicateur du nombre d'espèces. Il englobe, outre la diversité spécifique, la diversité génétique et la diversité des communautés et des écosystèmes.

La diversité génétique ne dépend pas uniquement des mutations et de la sélection dans différents environnements pour s'établir. Les variations générées par une mutation chez un individu donné peuvent être transmises à un autre individu de la même espèce ou à d'autres endroits par la migration de cette variation. Cette migration est également appelée flux génétique. Chez les plantes, la pollinisation et la dispersion des graines sont les principaux moteurs du flux génétique. C'est grâce à elles que les variations génétiques ont plus de chances de se manifester et de maintenir leurs effets, ce qui permet leur sélection dans différents environnements. Dans les forêts tropicales, la majeure partie du flux génétique des plantes dépend de la contribution des animaux impliqués dans la pollinisation et la dispersion des graines. Pour contribuer à ces processus, les animaux se nourrissent des structures végétales (fruits, nectar, pollen, etc.), assurant ainsi leur propre survie, leur reproduction et leur variabilité. Par conséquent, si la variation environnementale contribue à la biodiversité par la sélection d'individus mieux adaptés à différents environnements, la biodiversité est également le fruit d'un « effort collectif », ou d'une entraide entre différentes espèces. Lorsque les plantes, pour des raisons anatomiques, physiologiques ou d'isolement géographique, ont tendance à s'autopolliniser ou à polliniser entre individus génétiquement identiques (ce que l'on appelle la consanguinité), certaines caractéristiques génétiques ont tendance à se fixer dans une population, dans un espace donné, au fil du temps.

La diversité génétique des populations d'une espèce donnée peut également diminuer en raison de ce que l'on appelle l'« effet goulot d'étranglement » ou dérive génétique.

La dérive génétique désigne une réduction de la variabilité génétique au sein d'une population, car toutes les plantes de l'espèce ne produisent pas de fleurs, toutes les fleurs ne produisent pas de structures reproductrices, tout le pollen n'atteint pas les ovaires, toutes les graines n'atteignent pas le sol, toutes les graines qui arrivent ne germent pas et toutes les plantes en germination ne deviennent pas adultes.

Les animaux interviennent également dans ce processus, par prédation ou parasitisme, éliminant fleurs, fruits, graines ou plantes entières. Les insectes et les champignons, en particulier, sont spécialisés dans la promotion de cet effet. Formant un groupe de plus d'un million d'espèces – soit plus de la moitié du nombre mondial d'espèces déjà répertoriées – plusieurs espèces d'insectes et de champignons contribuent à l'adaptation des organismes végétaux, se nourrissant précisément de ceux qui présentent des dysfonctionnements physiologiques. En situation de stress hydrique, de stress lumineux ou de déséquilibre nutritionnel – généralement dû au fait qu'une espèce végétale se trouve hors de sa niche écologique appropriée –, les plantes finissent par conserver une grande quantité d'acides aminés libres dans leurs structures cellulaires, réduisant ainsi les liaisons protéiques entre elles. Les insectes et les champignons, ayant du mal à décomposer les protéines en acides aminés, finissent par « préférer » se nourrir de plantes contenant des acides aminés libres (Chaboussou, 1999).

Même en tenant compte de la réduction potentielle de la diversité génétique à l'échelle locale causée par l'autopollinisation, la pollinisation entre individus génétiquement identiques et l'« effet goulot d'étranglement », ces forces contribuent in fine à la diversité globale des gènes et des espèces, car elles conduisent à la formation de populations génétiquement distinctes en différents lieux. Cependant, en cas de non-résistance aux variations environnementales ou de non-adaptation continue, des extinctions d'espèces locales peuvent se produire.

Comme expliqué, la diversité génétique d'une espèce végétale donnée, au sein de ses différentes populations, résulte de l'action des forces de mutation, de sélection, de migration, de consanguinité et de l'« effet goulot d'étranglement », imprégnées par les variations environnementales et de niche écologique, ainsi que par l'assistance des animaux (Futuyma, 2002). L'« entraide » entre animaux et plantes n'est cependant pas la seule contribution de l'effort collectif des différentes formes de vie à la promotion de la biodiversité. Chaque individu est le produit de l'« entraide » entre différentes cellules, qui sont à leur tour le produit de l'« entraide » entre différentes structures cellulaires. De plus, de nombreux individus dépendent d'une relation étroite d'entraide avec d'autres organismes pour survivre.

Les eucaryotes, par exemple – espèces dont le noyau cellulaire est entouré d'une membrane (la membrane nucléaire) – sont probablement issus d'une symbiose entre deux cellules d'organismes différents. Les chloroplastes des cellules végétales, ou les mitochondries des animaux et des plantes, ont une origine similaire (Yamamura, 1996). La présence de microorganismes dans le tube digestif des insectes leur confère une grande résilience face aux stress nutritionnels ; l'évolution des espèces végétales supérieures ne peut se passer de la symbiose entre les petites plantes et les mycorhizes ; les grands mammifères herbivores ne peuvent survivre sans microorganismes impliqués dans la digestion. Selon Price (1991), le nombre d'espèces issues de ce type d'« entraide » représente probablement environ 54 % des espèces existant actuellement sur la planète. L'hypothèse de l'« entraide » ou de la symbiose comme voie d'évolution a été proposée par Lynn Margulis dans les années 1960 et est aujourd'hui connue sous le nom de « symbiogenèse » (Capra, 2005).

À une échelle plus large, l'entraide génère des effets essentiels à la vie collective. Sans les insectes, par exemple, responsables de la pollinisation et de la prédation, ou sans les oiseaux, les chauves-souris et les rongeurs qui dispersent les graines, l'exubérance des forêts tropicales n'existerait probablement pas. Sans les bactéries fixatrices d'azote, la formation de protéines chez les organismes terrestres serait impossible.

Sans les forêts tropicales, ou les organismes qui les peuplent, les conditions climatiques seraient radicalement différentes et impropres à la vie. En effet, l'entraide entre les composantes de la biodiversité a façonné, au fil des milliards d'années, les proportions exactes des différents gaz présents dans l'atmosphère, qui régulent à leur tour les conditions d'humidité, de température, de lumière et de nombreux autres facteurs abiotiques, dans des proportions et des niveaux précis permettant à la biodiversité de perdurer et d'évoluer (Lovelock, 1988).

La biodiversité ne se résume donc pas seulement aux différentes structures génétiques des espèces, des communautés et des écosystèmes. Ces différentes formes et structures dépendent d'un nombre immense et varié de relations et de processus vitaux, qui ont façonné et ont été façonnés par la vie au cours des 3,5 derniers milliards d'années. Comme indiqué au début de cet ouvrage, Rozzi et al. (2006) établissent une analogie entre la conservation de la biodiversité et la musique, indiquant que, pour qu'une symphonie existe, les instruments ne suffisent pas ; ils doivent être joués en harmonie.

En utilisant une autre analogie, quoique moins poétique, on pourrait soutenir que sans « logiciel », le « matériel » serait inutile dans l'informatisation.

Au milieu de cette immense complexité, malheureusement, l'influence humaine a généralement été disharmonieuse dans l'orchestre de la vie sur la planète. Au cours des 3,5 milliards d'années d'histoire de la vie sur Terre, les effets de la présence humaine se sont accentués au cours des 10 000 dernières années, et plus particulièrement au cours des deux derniers siècles, après la révolution industrielle. En d'autres termes, nous avons joué des sons déformés dans une symphonie qui avait toujours été harmonieuse.

La réduction et la modification drastiques des habitats, la pollution, la surexploitation des ressources naturelles et la propagation des maladies ont été identifiées comme les principaux facteurs de réduction de la biodiversité (Noss et Csuti, 1997). Le premier de ces facteurs est de loin le plus impactant. Outre les effets directs de la destruction des milieux naturels sur la biodiversité, la déforestation ou d'autres formes de destruction des habitats entraîne également la fragmentation des paysages naturels. La fragmentation tend à interrompre la force microévolutive la plus efficace pour promouvoir la biodiversité : la migration ou le flux génétique.

L'effet de la fragmentation s'étend au-delà des zones déboisées, influençant les fragments forestiers qu'elles contiennent par le biais de ce que l'on appelle « l'effet de lisière ». En effet, les variations d'ensoleillement, de vent, d'humidité, de cycles biogéochimiques et de relations écologiques créées à la lisière entre les fragments et les zones déboisées peuvent fortement influencer la biodiversité des fragments restants (Laurance et al., 2002).

Au cours de la première décennie du XXI^e siècle, plus de 13 millions d'hectares de forêts ont été convertis à d'autres usages dans le monde (FAO, 2011). Le nombre d'espèces disparues aujourd'hui est 100 à 1 000 fois supérieur à celui de toute autre période géologique (May et al., 1995 ; Myers et Knoll, 2001).

Par conséquent, le rythme d'extinction des espèces est actuellement bien plus élevé que celui de la création de nouvelles espèces (Pimm et Raven, 2000). De plus, précisément en raison de l'importance de l'entraide entre les êtres vivants, la réduction des densités de population ou l'extinction d'une espèce donnée au sein d'une communauté affecte souvent plusieurs autres. Si, dans une forêt tropicale, une population de broméliacées est décimée, par exemple, de nombreux petits écosystèmes sont perdus, car l'accumulation d'eau entre leurs feuilles constitue un terrain fertile pour plusieurs espèces d'amphibiens et d'invertébrés. Si une population de palmiers (*Euterpe edulis* Mart.) disparaît, une grande quantité de nourriture, sous forme de pollen et de fruits, disparaît au sein de la communauté, mettant en péril plusieurs espèces animales qui en dépendent.

Gestion de la biodiversité dans les systèmes agroforestiers

Considérant que l'existence de différentes formes de vie, aux niveaux génétique, organique et paysager, est une conséquence de l'action de forces microévolutives, de processus vitaux et de relations écologiques, l'agroforesterie cherche à apprendre et à reproduire consciemment les possibilités de cette action. L'optimisation des conditions d'amplification de la biodiversité, ainsi que l'augmentation de la complexité de la structure et de la fertilité des sols et des niches écologiques, génèrent des produits intéressants pour l'autoconsommation ou la commercialisation.

Comme indiqué précédemment, il est connu depuis longtemps que l'une des causes de la plus grande biodiversité sous les tropiques est la productivité primaire accrue de ces régions (Pianka,

1966). Plus la photosynthèse est importante, plus la matière végétale est importante. Plus la matière végétale est importante, plus la disponibilité énergétique est importante pour soutenir une plus grande variabilité et une plus grande quantité d'organismes. C'est pourquoi l'optimisation de la productivité primaire est recherchée dès le début de la mise en œuvre de l'agroforesterie. L'enherbement des bandes entre les massifs agroforestiers (voir la deuxième partie de ce livre) sert principalement à « nourrir » la biodiversité agroforestière dans ses premières années. La gestion de la taille dans les agroforêts plus matures vise à « produire de la nourriture » pour l'agroforesterie. Le matériel taillé est soigneusement apporté au sol, et la plante taillée produira davantage de matière végétale, qui sera réutilisée lors d'une nouvelle taille. Cette gestion s'inscrit dans les processus de dissipation d'énergie qui génèrent l'auto-organisation de la vie, comme évoqué précédemment. C'est l'énergie dissipée par la taille qui crée les conditions permettant au système de complexifier sa structure et d'évoluer en termes de fonctionnalité.

Une autre connaissance bien établie dans la littérature scientifique concerne la relation entre stratification forestière et biodiversité : plus le nombre de strates est élevé, plus la diversité des organismes est grande. La structure verticale de la végétation peut même supplanter la productivité primaire dans la détermination de la diversité locale (Ricklefs, 2003).

L'utilisation des ressources animales et végétales de ces différentes strates était et est encore courante dans plusieurs communautés humaines vivant en milieu forestier. Les Indiens Kuikúro du Haut Xingu, par exemple, identifient huit strates forestières verticales en fonction des ressources de chasse et de cueillette présentes dans chaque « étage » (Carneiro, 1987). Les Indiens Kayapó du Bas Xingu orientent la gestion forestière afin d'optimiser la production des espèces d'intérêt dans chacune de ces strates (Posey, 1984). Lors de la planification de l'agroforesterie, il est essentiel de visualiser, à court, moyen et long terme, les espèces qui seront en mesure d'occuper adéquatement les différentes strates. La plantation organisée et simultanée de ces espèces est l'action principale pour assurer un système agroforestier le plus complet et productif possible, sur ses différents « étages », au fil du temps.

L'effort de gestion global, ainsi que la préoccupation d'assurer l'approvisionnement en énergie et en matière vivante de l'agroforesterie, sont pratiquement les mêmes, qu'il s'agisse d'une zone entière ou d'une zone à strates peu occupées. En effet, une agroforêt avec peu de strates occupées tend à nécessiter davantage d'efforts de gestion, notamment un désherbage sélectif. Par conséquent, des erreurs de planification de la stratification lors de la mise en œuvre de l'agroforesterie peuvent engendrer des coûts énergétiques importants. Par analogie, commettre une erreur de planification de la stratification revient à construire un immeuble d'habitation à plusieurs étages, à y créer des infrastructures et à y entretenir des logements, tout en laissant une grande partie inoccupée.

Lors de la planification d'une plantation, outre la préoccupation de la stratification, il est crucial d'inclure des espèces qui, dans leur ensemble, peuvent participer à de multiples relations écologiques et processus vitaux. Certaines espèces sont « spécialisées » dans la solubilisation du phosphore dans le sol, d'autres sont capables de s'associer aux bactéries fixatrices d'azote, d'autres nourrissent un grand nombre de pollinisateurs et d'autres encore fournissent des fruits à un grand nombre d'animaux. La coexistence de multiples « capacités » de relations et de processus tend à amplifier le nombre de niches écologiques, augmentant ainsi la biodiversité. Autrement dit, plus la variation des relations et des processus entre espèces est importante, plus la « diversité fonctionnelle » du système agroforestier est grande, à mesure que le « fonctionnement » de l'écosystème en formation s'améliore (Díaz et Cabido, 2001 ; Tilman et al., 2001).

Un autre aspect à prendre en compte lors de la plantation est d'offrir à l'environnement agroforestier une large variabilité génétique de chaque espèce plantée, notamment en tenant compte de la pression de sélection environnementale et de l'effet goulot d'étranglement. Comme mentionné précédemment, dans la nature, les plantes produisent beaucoup plus de graines que le nombre de plantes matures. C'est également le cas en agroforesterie. Un grand nombre de graines de chaque espèce sont plantées, de préférence issues de matrices ou de plantes mères différentes. Parmi ces graines, certaines ne germeront pas, d'autres germeront et seront prédatées ou parasitées, et d'autres pourront être éliminées lors d'un désherbage sélectif ou d'une taille, si nécessaire pour favoriser la biodiversité et accélérer le processus de succession.

Il est également important de prendre en compte la diversité potentielle des utilisations de chaque espèce. Parmi les différentes plantes d'une espèce donnée en agroforesterie, certaines seront orientées vers la production du produit souhaité, qu'il s'agisse de fruits, de fleurs, de graines ou de feuilles. D'autres pourront être transformées en engrais, en artefacts ou en d'autres produits tout au long de leur croissance. Enfin, l'élimination des plantes en fin de cycle biologique ou lorsque la succession écologique l'exige favorise également la biodiversité, car elle accélère la création de nouvelles niches. Ce processus démontre une fois de plus clairement la capacité de l'agroforesterie à dissiper l'énergie et à auto-organiser le système à des niveaux de complexité plus élevés, créant ainsi des conditions propices aux processus vitaux, tant au-dessus qu'au-dessous du sol.

Outre la plantation dense d'un grand nombre d'espèces, qui occuperont différentes strates et seront gérées pour différents usages, la biodiversité des agroforêts est accrue par la promotion de plantes utiles au processus de succession et l'augmentation de la diversité fonctionnelle, qui germent naturellement dans la zone. En d'autres termes, les agroforêts accueillent à la fois des plantes plantées et celles issues de la régénération naturelle, dont beaucoup sont intentionnellement entretenues et promues.

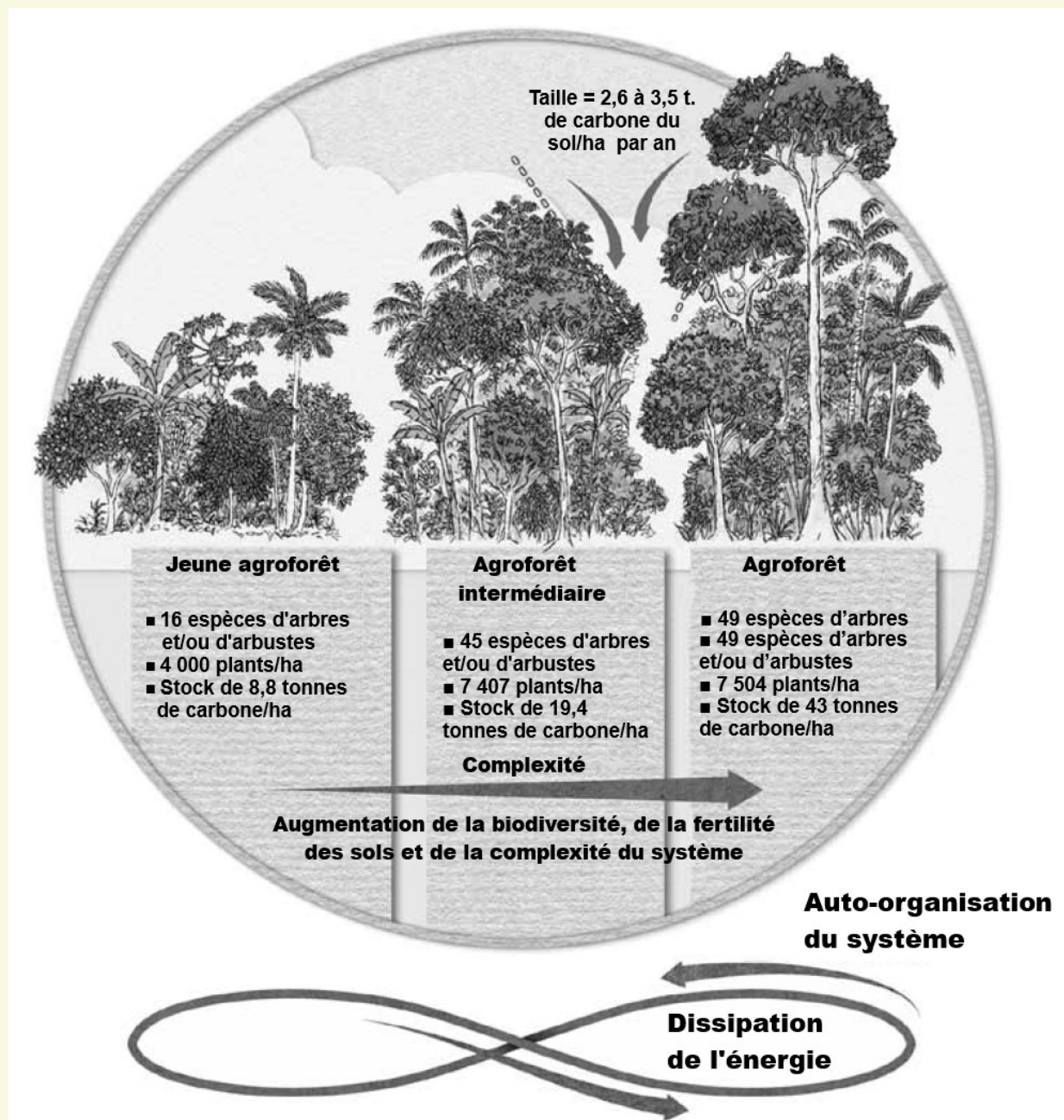
Dans les agroforêts des agriculteurs associés à Cooperafloresta, 194 espèces d'arbustes et d'arbres appartenant à 59 familles botaniques ont été identifiées. 89 % de ces espèces sont naturellement présentes dans le domaine phytogéographique du biome de la forêt atlantique, selon la base de données du Jardin botanique de Rio de Janeiro (Steenbock et al., 2013b). Ces agroforêts présentent non seulement une grande diversité végétale, mais aussi une forte densité végétale, atteignant en moyenne 6 400 plantes par hectare. Des études menées dans des zones de forêt secondaire indigène du biome de la forêt atlantique (capoeiras et capoeirões d'âges différents) et utilisant des méthodologies et des zones étudiées similaires à celles utilisées dans l'enquête susmentionnée ont généralement identifié entre 80 et près de 200 espèces, à des densités allant de 1 000 à 3 000 plantes par hectare (Torezan, 1995 ; Siminski et al., 2011).

Ainsi, la diversité des espèces végétales des agroforêts de la haute vallée de la Ribeira est similaire, voire supérieure, à celle des forêts secondaires indigènes du biome de la forêt atlantique. De plus, les agroforêts ont tendance à présenter des densités végétales plus élevées. Ces caractéristiques, associées à d'autres aspects liés à la gestion agroforestière déjà abordés dans cet ouvrage, font des agroforêts des systèmes productifs, caractérisés par un taux élevé de fixation du carbone atmosphérique et une fertilité croissante des sols. Au cours de cette évolution, à toutes les phases, les processus de dissipation d'énergie et d'auto-organisation de la matière se complètent à des niveaux de complexité croissants, comme le montre le schéma 19.

Fig.19. Évolution du nombre d'espèces et de plantes par hectare (ha) et de la quantité de carbone (t. C/ ha) dans la végétation des agroforêts des agriculteurs associés à Cooperafloresta, mettant en évidence la

complémentarité des processus de dissipation d'énergie et d'auto-organisation du système dans toutes les phases du développement de l'agroforesterie. Source : Steenbock et al. (2013)²².

Il est important de rappeler ici que, bien que ces agroforêts constituent la base de la production, de la sécurité alimentaire et des revenus des agriculteurs associés à Cooperafloresta, la couverture végétale la plus courante sur leurs propriétés est constituée de capoeiras (forêts secondaires en début et milieu de régénération), de tailles et d'âges variés.



Comme indiqué précédemment, selon les rapports des agriculteurs de Cooperafloresta, les agroforêts établies dans les zones de capoeiras ont tendance à être beaucoup plus fertiles et plus faciles à cultiver.

22 Steenbock, W. et al, Características estruturais das agroflorestas desenvolvidas no âmbito da Cooperafloresta. in: Steenbock, W. et al. Agrofloresta, ecologia e sociedade. Curitiba, Kairós, 2013. p. 345 – 362.

D'autre part, les agriculteurs identifient, dans les capoeiras, des espaces pour la production de semences qui se propageront naturellement aux agroforêts. Ils identifient également, dans ces zones, des espaces de vie pour les animaux importants pour les agroforêts, notamment les oiseaux et les abeilles, qui apportent des graines et contribuent à la pollinisation. Ces caractéristiques sont considérées comme importantes pour accroître la diversité et la production des agroforêts. De plus, plusieurs agriculteurs déclarent planter différentes espèces dans leurs forêts secondaires, notamment le palmier Juçara (*Euterpe edulis*), et gérer occasionnellement des espèces qui poussent à proximité des sentiers de la propriété (Steenbock et al., 2013a).

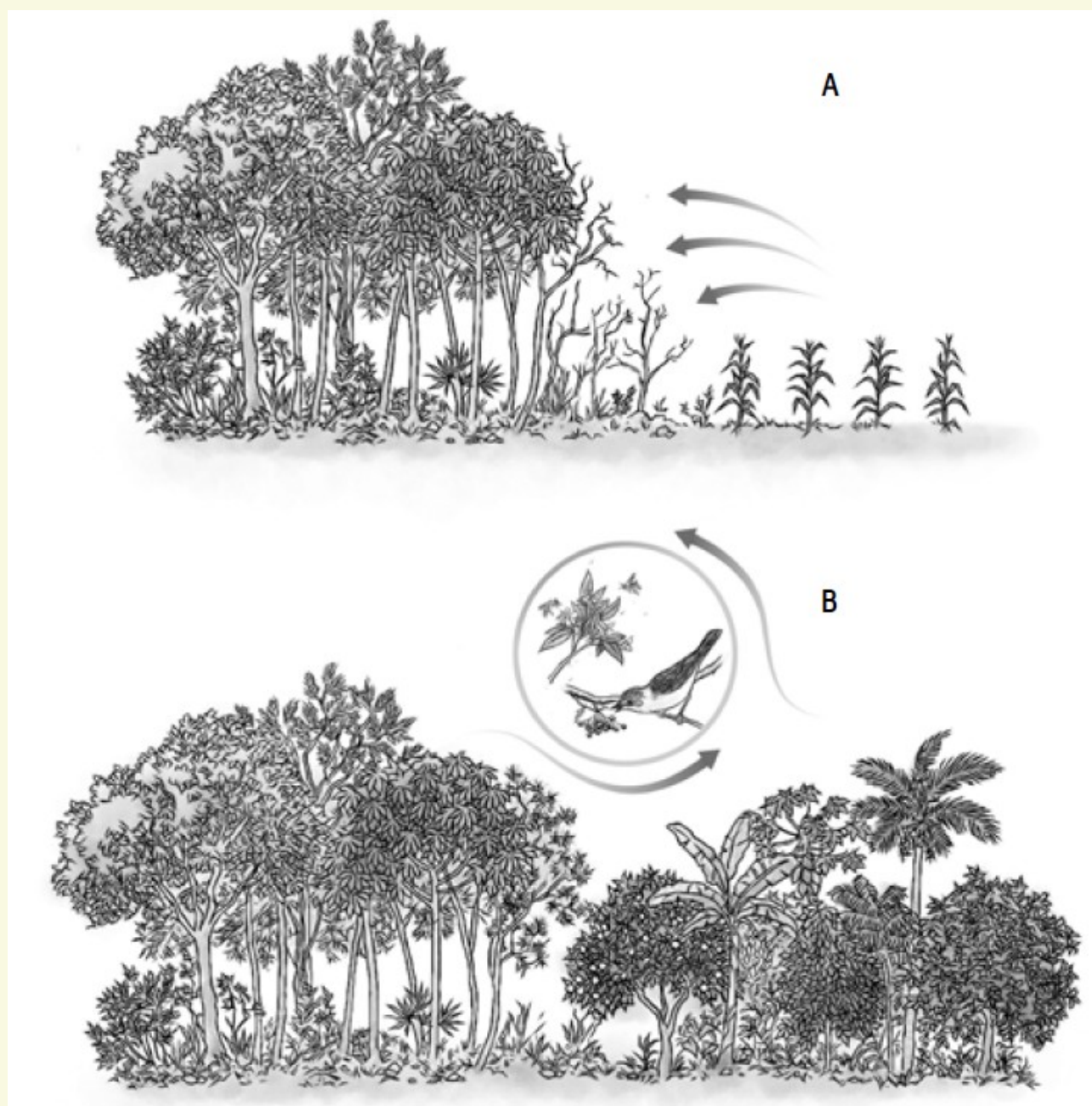
Permettre aux forêts secondaires de croître et de les enrichir avec des « espèces facilitatrices » fait donc partie de l'agroforesterie, que ce soit pour maintenir les arbres matriciels ou comme source de fertilité et d'espèces pour une utilisation future dans les futurs systèmes agroforestiers.

Il est important de souligner que le maintien d'agroforêts et de forêts secondaires entremêlées sur la propriété, formant une mosaïque de zones gérées et en régénération, respectivement, d'âges et de tailles différents, est une stratégie fondamentale pour la durabilité du système de production. Elle favorise la dynamique entre les processus de dissipation d'énergie et d'auto-organisation, qui génèrent vie, complexité et évolution dans les agroforêts. Dans l'expérience agroforestière, un « effet de lisière inversé » se produit : les agroforêts et les forêts secondaires, lorsqu'elles sont maintenues dans une mosaïque de zones, contribuent à la production de graines, de pollen, à la protection contre le vent, à la couverture végétale et à plusieurs autres effets positifs pour la biodiversité et la conservation de l'environnement. Autrement dit, forêts secondaires et agroforêts s'entremêlent, augmentant les valeurs environnementales du fait de leur proximité (Figure 20).

Par ailleurs, il est intéressant de noter que la rotation des zones entre agroforesterie et forêts secondaires, mise en place depuis près de deux décennies par les agriculteurs associés à Cooperafloresta, génère un ratio entre ces deux types de zones d'environ quatre hectares de forêts secondaires pour un hectare d'agroforesterie, comme indiqué précédemment.

La gestion des forêts secondaires et de l'agroforesterie, alternée dans le temps et l'espace, constitue les systèmes agroforestiers des agriculteurs associés à Cooperafloresta. Compte tenu des aspects de biodiversité et d'auto-organisation de la vie évoqués précédemment, cette gestion est responsable de l'amplification de la biodiversité à l'échelle du paysage ou de l'écosystème et a joué un rôle crucial dans la restauration des zones dégradées de la haute vallée du fleuve Ribeira, entre Paraná et São Paulo.

Figure 20. Effet de lisière (A) dans les vestiges forestiers au milieu des zones agricoles conventionnelles et « effet de lisière inversé » (B) dans les forêts adjacentes aux agroforêts.



Partie 2

Directives générales pour la pratique agroforestière

Dans la première partie de cet ouvrage, nous avons brièvement abordé certains concepts écologiques appliqués aux pratiques agroforestières. Les concepts constituent le fondement, la structure, de toute pratique et guident les actions. Cependant, les concepts sont différents des recettes, et il n'existe pas de recette miracle pour la gestion agroforestière. La pratique agroforestière repose sur la connaissance et la compréhension des dynamiques écologiques, qui constituent la recherche constante d'un dialogue avec la nature dans le processus d'intervention. L'absence de recettes ne saurait toutefois justifier l'absence de méthode pour mettre en œuvre un système agroforestier. Partant de ce principe, le texte suivant présente quelques aspects de la méthode de mise en œuvre et de gestion agroforestière, à partir de l'expérience des familles d'agriculteurs et des techniciens de Cooperafloresta à Barra do Turvo (SP) et Adrianópolis (PR), dans l'Alto Vale do Rio Ribeira, dans une région du biome de la forêt atlantique. Bien que cette expérience remonte à près de deux décennies, elle est constamment renouvelée, découvrant sans cesse de nouvelles possibilités de gestion. D'autre part, la richesse de cette expérience est bien plus grande que ce que l'on peut résumer en quelques pages.

Par conséquent, le texte suivant, qui aborde six aspects de la pratique agroforestière, ne peut être considéré comme une référence exhaustive à un processus de production bien établi, mais plutôt comme un guide général, ne contenant que quelques aspects importants, basé sur l'expérience accumulée en agroforesterie.

1. Identifier l'espace de pratique agroforestière

Dans le processus de dialogue avec l'environnement, la pratique agroforestière ne nécessite pas d'espace spécifique. Avant tout, il est nécessaire de comprendre ce qu'il faut faire dans chaque espace. Pour ce faire, il est important d'identifier les caractéristiques du sol, du relief, du climat et de la végétation du lieu où l'agroforesterie sera mise en œuvre. Dans cette identification, l'enjeu central est de comprendre quels processus vitaux interviennent – et avec quels outils – pour accroître la fertilité et la diversité. Cette augmentation est obtenue de manière coordonnée, coopérative et séquentielle par les consortiums d'êtres vivants présents dans chaque espace. Chaque consortium possède la capacité maximale de prospérer et d'améliorer l'environnement au stade où il se produit naturellement, au cours du parcours de la vie vers une plus grande fertilité et une plus grande biodiversité.

Il est donc essentiel d'identifier la végétation dans différentes combinaisons en fonction des variations des caractéristiques du sol et du relief.

Dans les premiers stades de la succession écologique, la capacité limitée de stockage de l'eau et le manque de minéraux du sol, régulateurs de l'activité végétale, empêchent une captation maximale de l'énergie solaire, même en présence de nutriments suffisants. Dans ces conditions, la production de matière végétale peu digestible par les microorganismes est essentielle à l'accumulation de matière organique, permettant ainsi d'accroître la capacité productive du milieu. Les plantes typiques de ces consortiums et stades produisent précisément ce type de matière végétale, caractérisée par une teneur élevée en carbone par rapport à la teneur en azote (Fig. 21).

Fig.21. Production de matière végétale aux premiers stades de la succession écologique



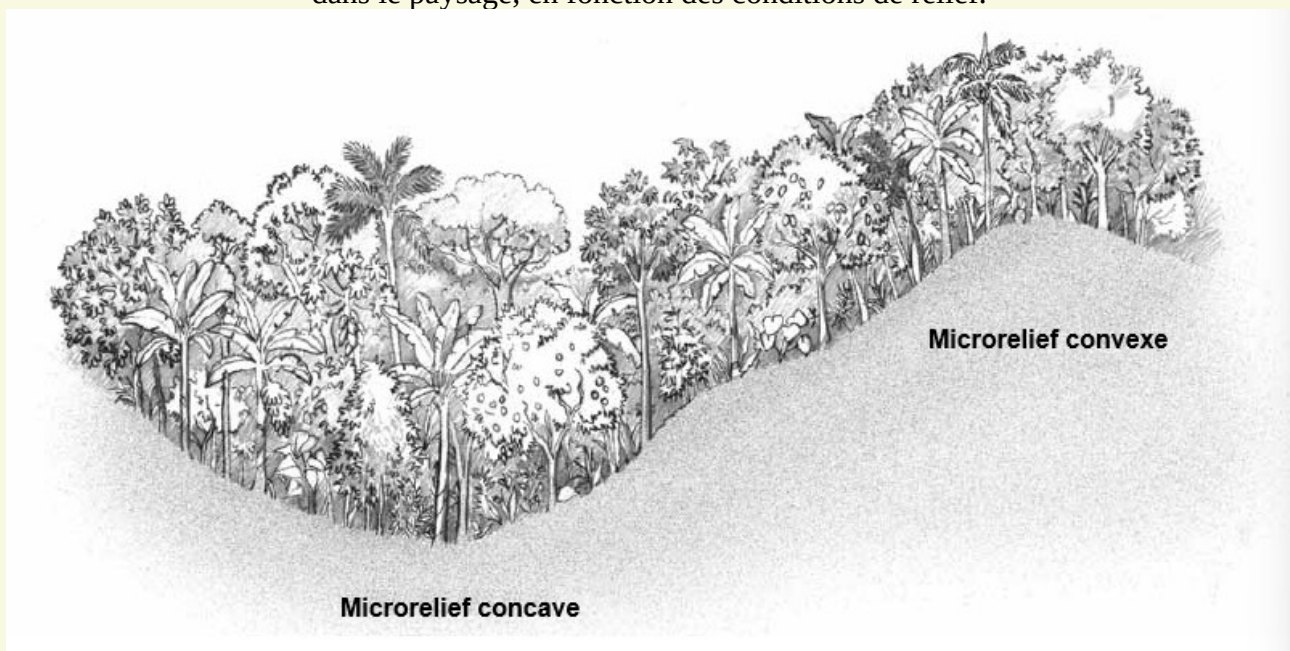
Aux premiers stades de la succession, qu'ils soient initiés par une clairière naturelle ou par l'action humaine, les espèces herbacées apparaissent en densités bien supérieures à celles des arbustes, et ces derniers en densités supérieures à celles des arbres. En poussant rapidement et en plusieurs cycles, elles déposent de la matière organique dans le sol et créent les conditions propices à l'activation de divers consortiums de microorganismes du sol. Aux stades intermédiaires de la succession, les espèces herbacées, notamment celles des graminées et des Astéracées (pâquerettes), n'existent plus en densités élevées, laissant place à des consortiums où les arbustes prédominent et à une densité légèrement plus élevée de jeunes arbres. Dans la forêt dense ombrophile de la forêt atlantique, c'est à cette période que des espèces telles que jaguarandi / mazambon marron à La Réunion (*Boehmeria caudata* Sw.), pariparoba / Bois d'Anisette ou Grand Baume (*Piper* sp.), carqueja / baccaride faux-genêt (*Baccharis* sp.) / et d'autres espèces apparaissent en densités plus importantes. Le travail de ces espèces crée les conditions, tant souterraines qu'aériennes, propices à la survie de consortiums où les arbres excellent.

Identifier les consortiums occupant l'environnement de travail est essentiel pour déterminer les pratiques de gestion agroforestière, visant à « entrer dans le processus de succession » sans régresser dans ses stades et sans artificialiser les conditions environnementales pour forcer les

consortiums des stades ultérieurs à court terme. Il est donc important de comprendre quelles espèces sont présentes, leurs densités, leurs formes de vie et leurs caractéristiques d'adaptation à l'environnement.

Il est également important de comprendre comment les consortiums végétaux varient selon le terrain. Dans les environnements en pente, le sol et la matière organique s'accumulent généralement dans les zones à micro-relief concave. Dans ces zones, les consortiums végétaux typiques des stades plus avancés de l'échelle de vie se développent aux côtés des consortiums typiques des stades plus précoces, établis dans les zones à micro-relief convexe. Là, ils attirent et nourrissent les animaux et stimulent les consortiums de microorganismes du sol qui dynamisent et favorisent progressivement l'évolution de l'ensemble du système (Fig. 22).

Fig.22. Variation des consortiums des différents stades de succession dans le paysage, en fonction des conditions de relief.



Dans les endroits où le sol est plus hydraté, les consortiums diffèrent également, présentant des espèces herbacées et arbustives, souvent dotées de feuilles plus grandes et favorisant une émergence plus rapide des arbres, à condition qu'il n'y ait pas d'excès d'eau, empêchant ainsi la présence d'air dans le sol. En présence de cet excès d'eau, différents consortiums se forment et l'émergence des espèces d'arbres est généralement plus lente.

L'orientation du terrain par rapport au soleil détermine également les variations des consortiums végétaux. Les endroits les plus exposés au soleil (appelés « faces » dans diverses régions) tendent à connaître des processus de succession plus rapides, car ils bénéficient d'un meilleur accès à l'énergie solaire et à la photosynthèse. Les endroits plus ombragés, moins ensoleillés (appelés « contre-faces »), tendent à présenter des consortiums et des espèces différents, et un taux de succession plus lent entre ces consortiums (Figure 23).

Fig.23. Variation des consortiums de différents stades de succession dans le paysage, en fonction des différentes expositions du relief à l'incidence de la lumière solaire.



Pour comprendre les différents consortiums végétaux présents dans chaque zone, il est également crucial d'identifier l'utilisation historique de la zone.

Les premiers stades de succession dans une clairière, par exemple, présentent des espèces et des consortiums très différents de ceux des zones agricoles. Dans ces dernières, l'utilisation du feu, des pesticides et/ou de la machinerie lourde a souvent « forcé » la perturbation et la réduction de la fertilité du sol, nécessitant un travail plus intense et plus long des graminées, des fougères et des astéracées pour activer la vie microbienne du sol et favoriser l'émergence d'espèces adaptées à des stades de succession plus avancés. Dans une clairière forestière, les caractéristiques du sol et de l'humidité, ainsi que la richesse du réservoir de semences du sol, déterminent une vitesse de succession plus rapide et des caractéristiques différenciées au sein des consortiums. Les agroforêts établies dans des zones auparavant boisées, même aux premiers stades de succession, ont tendance à être beaucoup plus productives et écologiquement diversifiées, surtout les premières années, que les agroforêts établies sur des pâturages ou des terres cultivées. Lors d'enquêtes phytosociologiques menées dans des agroforêts du programme Cooperafloresta, cette différence a été observée en comparant deux agroforêts gérées par des agriculteurs différents, mais situées à proximité l'une de l'autre, présentant le même type de sol et une pente et un relief similaires. Toutes deux ont été évaluées à l'âge de six ans. L'une a été établie directement sur un pâturage, et l'autre sur une forêt secondaire de huit ans (forêt en régénération) qui avait recouvert le pâturage après le retrait du bétail. L'agroforêt établie sur la forêt secondaire présentait un stock de carbone et une augmentation annuelle de carbone beaucoup plus importants, ainsi qu'un grand nombre d'espèces indigènes soumises à des mesures d'élagage et de régénération.

De plus, l'agroforesterie implantée directement sur les pâturages nécessitait également une taille et un dépôt de matériel de taille significativement plus importants pour accroître la fertilité du sol (Steenbock et al., 2013b).

Tout comme l'historique d'utilisation, la proximité de la zone d'implantation d'une agroforesterie avec des zones forestières influence fortement la disponibilité des graines et des propagules qui s'établiront, favorisant ainsi le processus de succession et augmentant la fertilité.

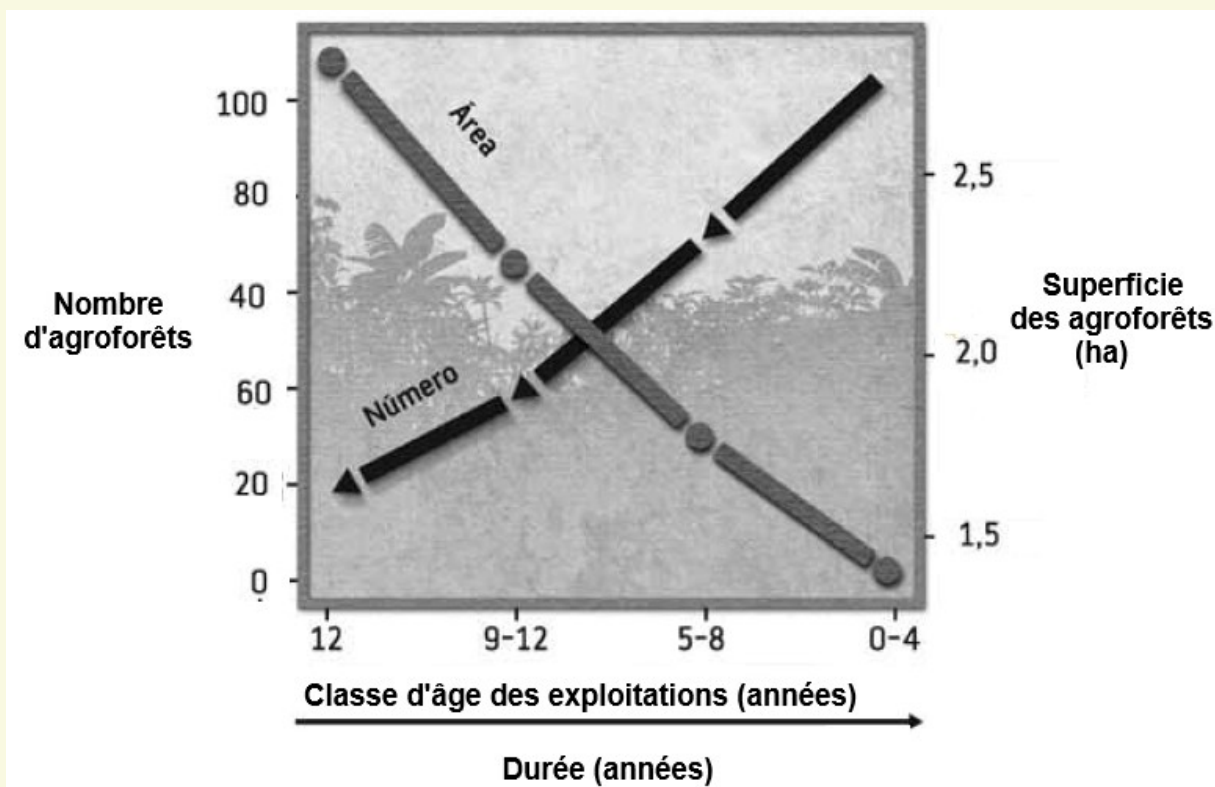
Outre ces conditions, l'exposition plus ou moins importante de la zone aux vents influence directement le maintien de l'humidité de l'air et du sol, ce qui affecte également la vitesse de succession et les caractéristiques des systèmes de cultures intercalaires. Par conséquent, il est essentiel de « s'interroger auprès de l'environnement » sur les caractéristiques de chaque système de cultures intercalaires à chaque endroit pour mettre en œuvre les pratiques agroforestières, en particulier pour déterminer où et comment commencer. Outre les réponses apportées par l'environnement lui-même, il est important de s'appuyer sur les connaissances écologiques locales pour comprendre les mécanismes des processus vitaux de chaque région, sachant que ces questions sont constamment posées par ceux qui vivent en relation directe avec l'environnement naturel. Les agriculteurs possèdent généralement une vaste connaissance des consortiums végétaux présents dans la région, de l'adaptation de chaque espèce cultivée à chaque type de sol ou de terrain, et de leurs relations écologiques, entre autres domaines. Il est essentiel de récupérer et de promouvoir ces connaissances dans la pratique agroforestière.

2. Mise en œuvre d'un système agroforestier

Ce texte s'inspire du film de João Amorim *Implementação manual e semi-mecanizada de canteiro agroflorestal*. (« Mise en œuvre manuelle et semi-mécanisée de sites agroforestiers »)²³. Une fois les caractéristiques environnementales de l'espace agroforestier identifiées, il est important de déterminer la taille de la zone à planter. Pour ce faire, outre les caractéristiques environnementales, il est important de prendre en compte la capacité de main-d'œuvre nécessaire pour les travaux sur place. Comme en agroforesterie, la production se déroule à la fois horizontalement et verticalement, il est plus avantageux d'optimiser le travail sur de petites surfaces que de mettre en œuvre de plus grandes surfaces lorsque la gestion est défaillante par manque de temps ou de main-d'œuvre. Cela permet également de mettre en œuvre un ensemble plus large de systèmes agroforestiers sur la propriété, en tirant parti des différences de cultures intercalaires, de sols et de stades de succession pour accroître la variété des produits obtenus.

L'expérience des familles d'agriculteurs de Cooperafloresta montre que ce principe a permis de réduire la taille et d'augmenter le nombre d'agroforêts établies au fil du temps (Fig. 24). Les agroforêts de douze ans, c'est-à-dire celles démarrées il y a douze ans, occupent de vastes superficies et ont été implantées en petit nombre ; les jeunes agroforêts (de 0 à 4 ans) occupent de petites superficies et sont désormais implantées en grand nombre. Alors que le nombre d'agroforêts a augmenté de 605 % au cours des seize dernières années, leur superficie moyenne a diminué de 52,4 % (de 2,90 ha à 1,38 ha) au cours de la même période. Figure 24. Superficie moyenne (en hectares – ha) et nombre moyen d'agroforêts (AF) par classe d'âge des agriculteurs associés à Cooperafloresta au fil du temps.

23 Film Agroflorestar *Implementação manual e semi-mecanizada de canteiro agroflorestal*.
<http://www.youtube.com/watch?v=RSTF-ShrmLQ>, 19 août de 2013.



Adapté de Steenbock et al. (2013a).

Lors de la détermination de l'emplacement et de la superficie de la zone à implanter, il est également crucial de prendre en compte la disponibilité des semences et des plants. Il est déconseillé d'implanter de grandes superficies avec peu de semences et de plants.

Cependant, au-delà de contribuer à la détermination de la superficie de la zone agroforestière à implanter, la définition des espèces à planter doit constituer la base de la planification agroforestière. Cette planification doit refléter attentivement les informations accumulées sur l'environnement dans lequel l'agroforesterie sera mise en œuvre. Par conséquent, la planification des espèces doit se baser avant tout sur la capacité des espèces ciblées à occuper des niches et à remplir des rôles écologiques similaires à ceux des espèces indigènes de la région au sein de leurs différents consortiums. Ainsi, les individus de papayer (*Carica papaya* L.) peuvent occuper des niches occupées par des individus d'embaúba rouge (*Cecropia* sp.) ; les individus de caféier (*Coffea arabica* L.) peuvent occuper des niches occupées par des individus de pariparoba (*Piper* sp.) ; les niches des individus de palmier juçara (*Euterpe edulis*) peuvent être comblées par la densité de l'espèce elle-même. Ainsi, outre la production d'espèces d'intérêt, la diversité fonctionnelle de l'espace agroforestier est maintenue et développée.

L'origine des semis et des graines utilisés est un aspect fondamental à prendre en compte. La nature a pour stratégie de produire de la diversité, et les plantes ont pour stratégie générale de produire des graines présentant une variabilité génétique. Au sein de cette grande variabilité, la nature sélectionne des caractéristiques génétiques adaptées à chaque environnement. Il est donc important, dans la mesure du possible, d'utiliser des semences issues de différentes souches parentales de la région elle-même – qu'il s'agisse d'espèces indigènes, de cultures commerciales ou d'arbres fruitiers – et, imitant la nature, de planter beaucoup plus de graines, de boutures ou de propagules que prévu pour les individus germés et adultes en agroforesterie.

Étant donné que chaque microenvironnement dans lequel une graine sera déposée dans le sol présente des conditions biologiques, physiques et chimiques différentes, et que chaque graine

possède potentiellement des caractéristiques génétiques différentes, la combinaison de ces caractéristiques génétiques avec ces différentes conditions favorise la germination et l'établissement des individus. D'où la nécessité, tant dans la nature qu'en agroforesterie, d'une grande « disponibilité génétique ».

À première vue, utiliser beaucoup plus de graines que prévu pour produire des individus adultes peut sembler contre-intuitif, ou avoir tendance à augmenter le coût de mise en œuvre. Cependant, le coût de production des semis est considérablement plus élevé, et le pourcentage de pertes de semis est élevé pour un large éventail d'espèces, lors de leur mise en culture, précisément parce qu'elles ne s'adaptent pas au microenvironnement naturel dans lequel elles sont plantées. Par conséquent, en agroforesterie, la priorité est donnée à la plantation de semis d'espèces pour lesquelles la production de graines est peu probable. C'est le cas des espèces fruitières commerciales, telles que le litchi, les agrumes, le pêcher, le pommier, etc., dont l'« amélioration génétique » réduit ou rend impossible la germination en champ en raison de la perte de rusticité. Cela ne signifie pas pour autant que la plantation de jeunes plants soit négligée : cette méthode de plantation peut également être choisie lors du greffage pour une production fruitière précoce, lorsqu'une variété spécifique est souhaitée, ou pour d'autres raisons techniques ou écophysiologicals (le bananier, par exemple, ne produit pas de graines ; le manioc et autres racines et tubercules sont difficiles à établir par semis, etc.).

Le choix des espèces à planter doit tenir compte de leur implantation progressive dans différentes cultures intercalaires au fil du temps. Lors de la mise en place d'un système agroforestier, toutes les espèces sont plantées simultanément, mais on ne s'attend pas à ce qu'elles croissent toutes au même rythme ni occupent les mêmes strates.

Cooperafloresta a utilisé une méthode simple de sélection des espèces pour la plantation agroforestière, basée sur la visualisation des différents consortiums dans différentes strates au fil du temps. Cette méthode consiste en un tableau, comme celui présenté au tableau 5, où les lignes représentent les différentes strates et les colonnes les consortiums de différentes classes d'âge. Il s'agit donc d'une forme de planification de la succession et de la stratification agroforestières.

Il est important de préciser que les espèces répertoriées dans le tableau 5 ne sont qu'un exemple. Ainsi, bien que la planification de la plantation « localise » différentes espèces dans différentes strates et consortiums, toutes les espèces sont plantées simultanément. Le café, par exemple, occupera la strate inférieure après un an d'agroforesterie ; différentes espèces d'agrumes occuperont différentes strates à différents stades de l'agroforesterie ; cependant, ces espèces et toutes les autres espèces répertoriées dans le tableau seront plantées simultanément.

C'est là que réside l'art et la connaissance des habitats, des niches, des relations écologiques, du taux de croissance, de la hauteur et des caractéristiques architecturales de chaque espèce. Cela permet également d'introduire un grand nombre d'espèces dans l'espace de production, contribuant ainsi à la diversité fonctionnelle, à la sécurité alimentaire et à la diversification des revenus.

Réaliser cette planification de cette manière implique de visualiser les différentes strates du système agroforestier au fil du temps. La productivité du système agroforestier dépend d'une planification aussi précise que possible, tenant compte de la diversité des espèces de chaque strate et de chaque consortium. S'il est toujours possible d'introduire de nouveaux individus de nouvelles espèces dans le système agroforestier à différents moments, une niche écologique inoccupée, ou occupée par une espèce aux caractéristiques similaires, ne peut pas être immédiatement comblée par un individu qui sera planté.

Tableau 5. Exemple de planification de la succession et de la stratification agroforestières.

Strate	Accroissement de la diversité et de la densité des espèces indigènes et gérées en agroforesterie				
	Placenta* 1 jusqu'à 3 mois	Placenta 2 (3 mois à 1 an)	AF (1 à 10 ans)	AF (10 à 25 ans)	AF (25 à 50 ans)
Émergente	Chou frisé, Chou	Maïs, Concombre, Haricots verts	Faux poivrier, Acérola, Inga, Lilas de Perse, Banane, Papaye	Avocatier Palmier-pêche	Café-manga, Copaïer, Teck Cèdre, Ipé, Prunier mombin
Haute	Brocolis Laitue	Igname, Taro, Taïboda, Manioc	Litchi, kaki, avocat, mangue, pupunha, roucou	Litchi, kaki, mangue, cèdre, cajá-mangue, banane forestière, palmier Juçara, palmier Juçara, Uvaia, Jaboticaba, Cerise du Surinam	Jaboticaba, Ivaia, Cerise du Surinam, Carambole, Palmier Juçara
Moyenne	Roquette, Persil, Chicorée	Gingembre, rocou, haricots	Uvaia, Jaboticaba, cerise du Surinam, citron vert, corossol, carambole, banane, cœur de palmier Juçara	Orange, Citron, Corossol, Carambole, Banane, Cœur de Palmier Juçara	Orange, citron, corossol, carambole
Basse	Radis, carotte, haricots	Ananas, citrouille, haricots	Orange, Citron, café	Café, Cacao	Café, Cacao

* Dans les projets d'agroforesterie de Cooperafloresta, le terme « placenta » a été utilisé pour décrire les premières étapes de l'agroforesterie, où la plantation à grande échelle et l'accumulation de matière organique sont encouragées ; AF : agroforesterie.

Une niche qui pourrait être occupée par un oranger adulte, par exemple, et qui est vide ou occupée par une espèce moins intéressante (d'un point de vue productif ou écologique), ne restera pas dans cet espace en attendant la croissance d'un plant d'oranger. Si le plant est planté, la niche écologique de cet espace sera complètement différente à maturité. Pour la plupart des agriculteurs de Cooperafloresta, lorsqu'une agroforêt est établie sans planification adéquate, il est souvent préférable de la rénover. Cela fournit une énorme quantité de nourriture au biote du sol (grâce à une taille drastique du matériel végétal), ce qui donne lieu à un système agroforestier plus complet et mieux planifié, ce qui est généralement plus bénéfique que de le compléter progressivement.

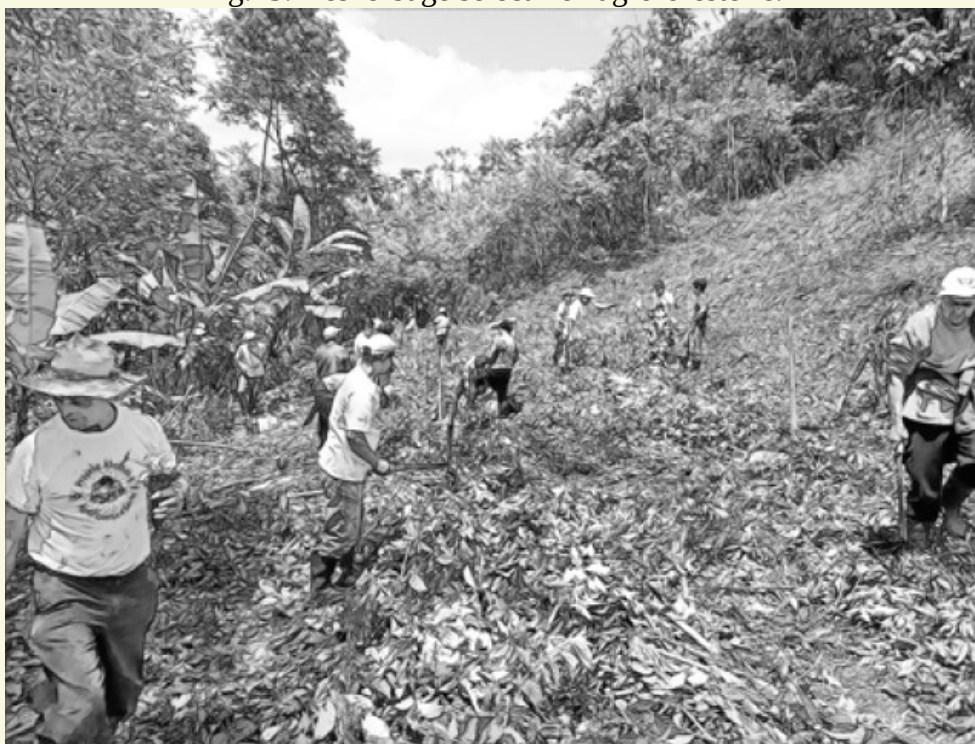
Une fois le site agroforestier défini et les semences, boutures, propagules et semis en main, il est important de commencer la préparation de la zone. L'agroforesterie visant à faciliter le processus de

succession écologique, la première étape de sa mise en œuvre est généralement le désherbage sélectif.

Le désherbage sélectif diffère du désherbage conventionnel de la zone car il ne supprime que les plantes ayant déjà rempli leur rôle dans la succession et devant laisser la place à d'autres, et non toutes les plantes de la zone. Comme mentionné précédemment, dans la nature, la transition entre différents consortiums ne se produit pas brutalement et peut prendre des années. Le désherbage sélectif est réalisé après avoir identifié les espèces ayant déjà rempli leur rôle dans le processus de succession, observé la zone et compris les caractéristiques environnementales de la région. Lors du désherbage sélectif, ces individus sont prélevés et déposés au sol, de préférence manuellement. Lors du dépôt, il est important de veiller à ce que les individus des espèces qui s'enracinent facilement soient déposés sur les feuilles ou les branches coupées lors du désherbage, évitant ainsi tout contact direct avec le sol et, par conséquent, leur régénération. Si la plantation est réalisée dans une zone à un stade très précoce de succession, comme une zone couverte de *Brachiaria* ou d'autres graminées, le désherbage sélectif peut s'avérer coûteux.

Dans ce cas, il peut être préférable de commencer par une plantation directe de légumineuses ou de concentrer la mise en œuvre de l'agroforesterie sur des parcelles plus petites. Dans les projets agroforestiers mis en œuvre dans ce type de situation, en particulier sur des superficies relativement vastes, la préparation du sol avec sous-solage mécanisé peut être choisie, en utilisant un seul arbre dans les rangées où seront plantés les arbres et autres plantes (parterres).

Fig.25. Désherbage sélectif en agroforesterie.



Afin d'améliorer la capacité photosynthétique des plantations agroforestières et, simultanément, d'exploiter l'énergie et les nutriments accumulés au cours de la succession écologique précédant la plantation, les arbres et arbustes existants sont taillés, totalement ou partiellement, en coupant les branches et les rameaux de leur couronne et en coupant les troncs en morceaux d'environ 50 cm de

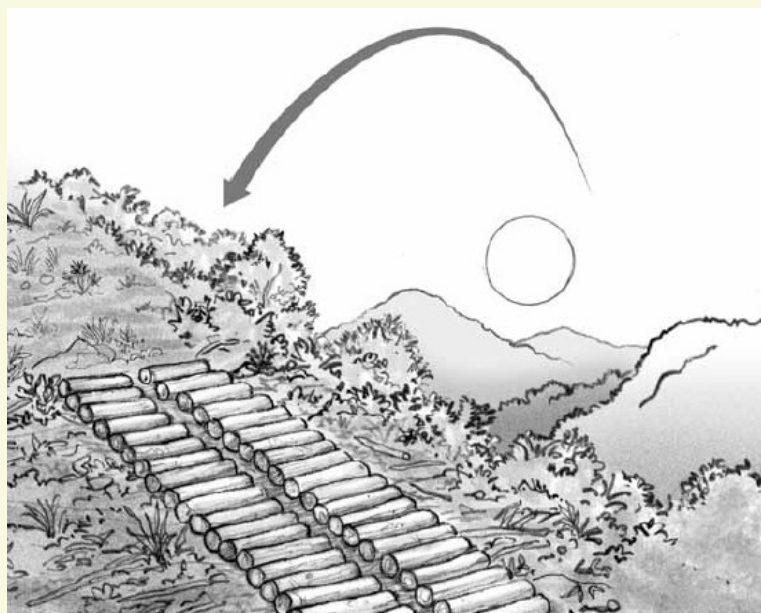
long. Ce matériel servira à favoriser la formation de niches tout au long du processus de succession, en fonction de l'intervention agroforestière. Autrement dit, les nutriments et l'énergie captés et organisés par la vie dans cet espace sont empruntés comme investissement pour une organisation plus complexe basée sur l'agroforesterie.

Une fois le désherbage sélectif et la coupe/taille des arbres et arbustes terminés, l'emplacement des planches agroforestières est défini. Ces planches sont spécialement préparées pour recevoir des graines et des propagules en forte densité et de manière organisée.

En général, les planches mesurent de 1 à 1,2 m de large (pour faciliter la gestion) et sont aussi longues que la surface. Il est courant de maintenir un espacement d'environ 3,5 m entre les massifs. Les massifs doivent de préférence être perpendiculaires à la direction du soleil, ce qui optimisera l'exposition des plantes au soleil.

Cependant, un autre critère important pour l'orientation des massifs est de les positionner dans le sens de la pente du terrain, ce qui facilitera grandement la gestion des plantes, car il faudra moins se pencher pour atteindre le sol. Par conséquent, l'orientation des massifs doit chercher à trouver un équilibre entre une exposition optimale à la lumière et une gestion aisée (Fig. 26).

Fig.26. Représentation schématique de l'orientation des planches agroforestières.



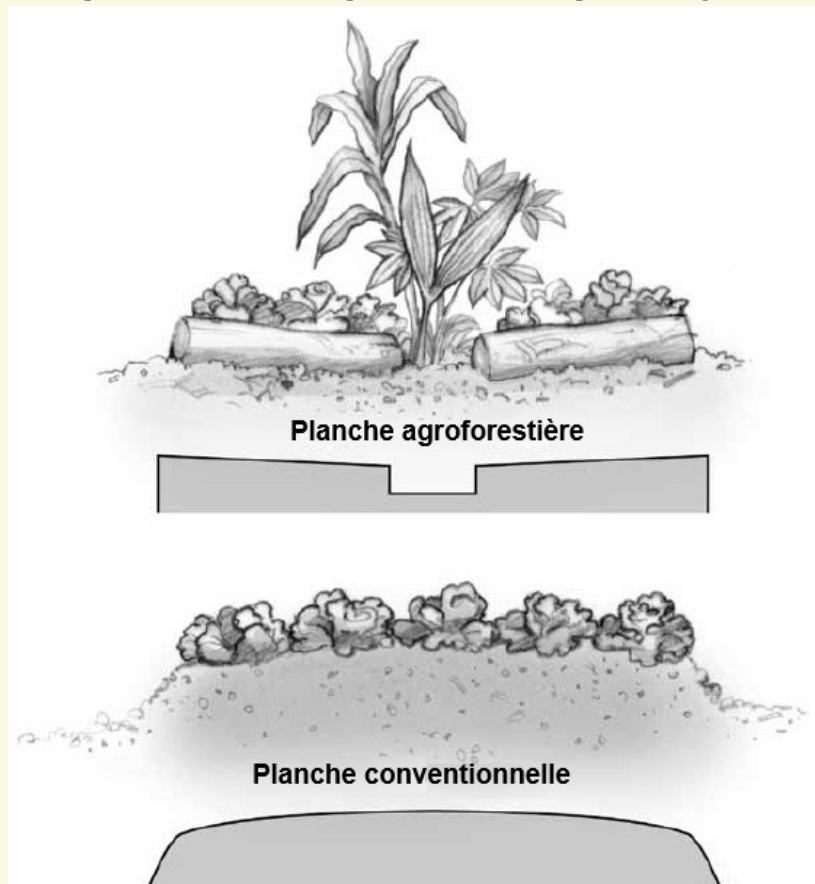
L'idée de planter des planches le long de la pente de la zone peut paraître étrange à première vue, car, conformément aux bonnes pratiques de conservation des sols, les planches doivent être construites perpendiculairement à la pente. Il est toutefois important de garder à l'esprit que les planches établies en agroforesterie, ainsi que les espaces entre elles, sont entièrement recouvertes d'une importante quantité de matière végétale au moment de la plantation, et que la zone sera rapidement recouverte de plantes vivantes, produisant un système racinaire actif et dense. De plus, comme expliqué ci-dessous, des morceaux de troncs d'arbres seront placés sur les planches, perpendiculairement au terrain. Cette pratique prévient l'érosion du sol.

Après avoir délimité l'espace des planches, la plantation proprement dite commence. Tout d'abord, le gazon, ou matière végétale retirée lors du désherbage sélectif, est soigneusement gratté de la zone

de la planche (qui, dans le cas précis de la planche, correspond généralement à la totalité des plantes présentes). On le fait à l'aide d'une houe ou d'un râteau, en essayant d'enlever le moins possible de terre végétale en même temps que le gazon. Cependant, malgré tous les soins apportés, une certaine quantité de terre finit par se mélanger au gazon. Cette terre, issue de la terre végétale, est généralement très active biologiquement et très fertile, et ne peut être gaspillée. Par conséquent, la matière enlevée est empilée, la réservant pour une utilisation ultérieure.

Une fois la zone de plantation débarrassée de toute couverture végétale, la terre végétale (10 à 15 cm de profondeur) est ameublie. Avec cette terre ameublie, les planches sont installées, en essayant de maintenir les bords plus hauts que la zone centrale, afin de diriger l'eau de pluie et les nutriments mobilisés par la décomposition de la matière organique vers le centre des planches (Fig. 27).

Fig.27. Représentation schématique de la forme des planches agroforestières.



Une fois les planches conçues, la plantation commence. Il est important de garder à l'esprit qu'un nombre bien supérieur de graines et de semis sera semé ou planté par rapport à la capacité de germination ou de survie à long terme attendue dans le système agroforestier. Par conséquent, la planche recevra une densité élevée de graines et/ou de semis. Que ce soit en tenant compte de cette condition, en plaçant les espèces compagnes à proximité les unes des autres, ou en évitant que la taille et la récolte des espèces, chacune à son rythme, n'affectent négativement les plantes restantes, une cartographie adéquate de la plantation dans les planches est essentielle. Cette cartographie consiste à concevoir l'agencement et la méthode de plantation de chaque espèce dans les planches avant la plantation, en cherchant à optimiser l'utilisation de l'espace aérien et souterrain à chaque phase de la succession agroforestière. La planification se concentre sur l'optimisation de la capture de l'énergie solaire dans le système, l'occupation de différentes niches écologiques et le

développement des relations écologiques. Dans cette conception, il est important de considérer, par exemple, que des espèces de différentes strates, occupant des espaces verticaux différents, aériens et souterrains, peuvent et doivent être plantées dans le même espace horizontal, ce qui optimisera la captation de l'énergie solaire dans le système au fil du temps.

Cependant, l'espacement entre les espèces dont la canopée occupera la même strate, au même stade de succession agroforestière, doit être soigneusement calculé afin d'éviter toute compétition entre elles. Cette attention doit être portée d'autant plus lors de la plantation des jeunes plants, évitant ainsi, à moyen terme, la nécessité d'éliminer des arbres concurrents, qui représentent souvent un coût élevé pour l'acquisition de leurs plants.

Un autre aspect à prendre en compte est l'architecture racinaire des espèces à planter, ainsi que celle de leurs parties aériennes. Les tiges souterraines ou racines tubéreuses, comme l'igname, le taro, la pomme de terre ou le manioc, par exemple, occupent une grande surface au sol. Lors de la plantation de ces espèces, il convient de tenir compte de l'espace qu'elles occuperont et de veiller à ce que, au moment de la récolte, leur absence temporaire n'affecte pas le développement des autres espèces, en particulier lors des phases de succession ultérieures. Il convient également d'en tenir compte lors du choix de l'angle et de l'orientation des boutures et des propagules dans les massifs.

Les espèces légumières à cycle court, récoltées en premier et n'affectant pas le développement des tubercules au moment de la récolte, peuvent toutefois occuper les espaces adjacents au sol, à condition que l'architecture foliaire de ces espèces, dans l'espace qu'elles occuperont et pendant leur cycle, permette une utilisation optimale de la lumière solaire.

Des espèces comme les citrouilles et les haricots, en revanche, occupent une surface considérable au sol en raison de leur nombre et de leur densité de feuilles. Si ces espèces sont plantées trop près d'autres espèces ayant un cycle de vie similaire, elles ont tendance à être envahies et finissent par mourir.

Lors de la cartographie, il est également important de considérer que les espèces qui préfèrent le soleil du matin doivent être plantées à l'est du massif, tandis que l'inverse est vrai pour les espèces qui s'adaptent au soleil de l'après-midi.

Lors de la conception des plantations, il est également crucial d'occuper différentes niches écologiques, en fonction de leur diversité, afin d'optimiser l'organisation des processus biologiques à des niveaux de plus en plus complexes.

Par exemple, le pois d'Angole est une espèce herbacée/arbustive à cycle court qui produit des racines fortes et profondes, puisant les nutriments dans sa partie aérienne depuis des zones du sol inaccessibles aux autres plantes à cycle court. Après la croissance, la taille de la partie aérienne permettra de ramener ces nutriments à la surface du sol et de mettre l'énergie accumulée à la disposition des organismes du sol, favorisant ainsi de nouveaux niveaux d'organisation du système.

L'occupation de différentes niches permet l'amplification des relations écologiques, qui à leur tour augmentent le nombre et la diversité des niches, dans une boucle de rétroaction énergétique et structurelle. Différentes espèces de graminées et d'astéracées, par exemple, lorsqu'elles occupent les couches superficielles du sol par leurs racines, ont tendance à développer des associations avec les mycorhizes. Ces associations, en plus d'assurer une meilleure absorption de l'eau du sol pour ces plantes, sont très efficaces pour rendre le phosphore disponible dans le sol, un nutriment généralement présent mais non disponible. Un sol avec une plus grande disponibilité en phosphore permet le développement de plusieurs autres espèces, qui occuperont d'autres niches et

participeront à d'autres relations écologiques. Il est donc essentiel d'identifier les possibilités d'occupation de niche en fonction des relations écologiques auxquelles les espèces à planter peuvent participer. La plantation d'espèces « facilitatrices », c'est-à-dire celles présentant un grand nombre et une grande variété de relations écologiques potentielles, est très importante.

Les aspects abordés ici ne sont que quelques exemples du soin à apporter lors de la cartographie des plantations en massif. En fin de compte, comme mentionné précédemment, tous les aspects susceptibles d'influencer l'optimisation de l'utilisation de l'espace horizontal et vertical, l'occupation des différentes niches écologiques, l'amélioration des relations écologiques et l'optimisation de la capture de l'énergie solaire pour le système doivent être pris en compte. Tout cela prend en compte l'adaptation de chaque espèce au sol, au climat et au relief de la zone.

Une fois la plantation cartographiée, on commence. En règle générale, on plante d'abord les plus gros semis ou propagules, dont l'implantation nécessite une plus grande perturbation du sol pour éviter de perturber la planche. Les semis d'arbres doivent être plantés après avoir creusé des trous dans la planche, ce qui peut être fait à l'aide de bêcheuses manuelles ou mécaniques. Après les arbres, on plante les propagules et les boutures (comme le manioc, l'igname, le gingembre, par exemple), puis les graines des différentes espèces.

Pour chaque espèce plantée, le site de plantation est marqué, à l'espacement défini, afin d'éviter les chevauchements inappropriés et la perturbation du sol là où les semis ont déjà eu lieu.

En général, les graines et les semis sont plantés le long de l'axe central de la planche, sur une petite bande de 8 à 15 cm de large. Aux abords de cette bande centrale, lorsque le matériel est disponible, des morceaux de troncs d'arbres d'environ 50 cm de long, coupés sur place ou à proximité, sont soigneusement disposés côte à côte et perpendiculairement à l'axe de la planche. En l'absence de bois, tout autre type de matière organique peut être utilisé. Cette intervention a cinq fonctions principales :

- Protéger le sol de la planche du rayonnement solaire direct et de l'érosion ;
- Activer la vie microbienne dans la planche en apportant de la matière organique et en stimulant les interactions écologiques de la micro- et de la mésofaune du sol (bactéries, champignons, collemboles, vers de terre, etc.), qui bénéficient alors directement ou indirectement de cette importante quantité de matière organique, créant ainsi constamment de nouvelles niches écologiques dans le sol et augmentant sa fertilité ;
- Protéger la zone centrale de la planche, où la plantation a eu lieu, de l'implantation d'espèces herbacées naturelles, notamment de graminées ;
- contribuer à diriger l'eau de pluie à faible vitesse et à un niveau adéquat vers la partie centrale de la planche ; et
- établir le début d'un environnement pédologique forestier plus propice au développement des semis et des graines.

En pratique, la disposition des troncs décrite vise à imiter partiellement le processus de renouvellement forestier par clairières. Dans les clairières, la régénération forestière s'effectue en utilisant, entre autres ressources, la matière organique des arbres tombés. Cependant, en « imitant » ce processus en agroforesterie, l'objectif est d'accélérer le processus de succession en organisant le matériel végétal de la manière la plus organisée possible et en contact direct avec le sol (Figure 28).

Figure 28. Mise en œuvre d'une planche agroforestière, images A, B, C et D.





Une option à envisager lors de la planification des plantations consiste à placer de la terre (de préférence celle retirée avec les scories lors du tracé des planches) dans l'espace supérieur entre

deux rondins, sur toute la surface de la planche. Ce sol, riche en fertilité, peut être utilisé pour la plantation d'espèces à cycle court (Fig. 29). La présence de ces espèces favorisera également la décomposition de la matière organique, la formation de nouvelles niches écologiques et l'établissement de nouvelles relations écologiques dans la zone.



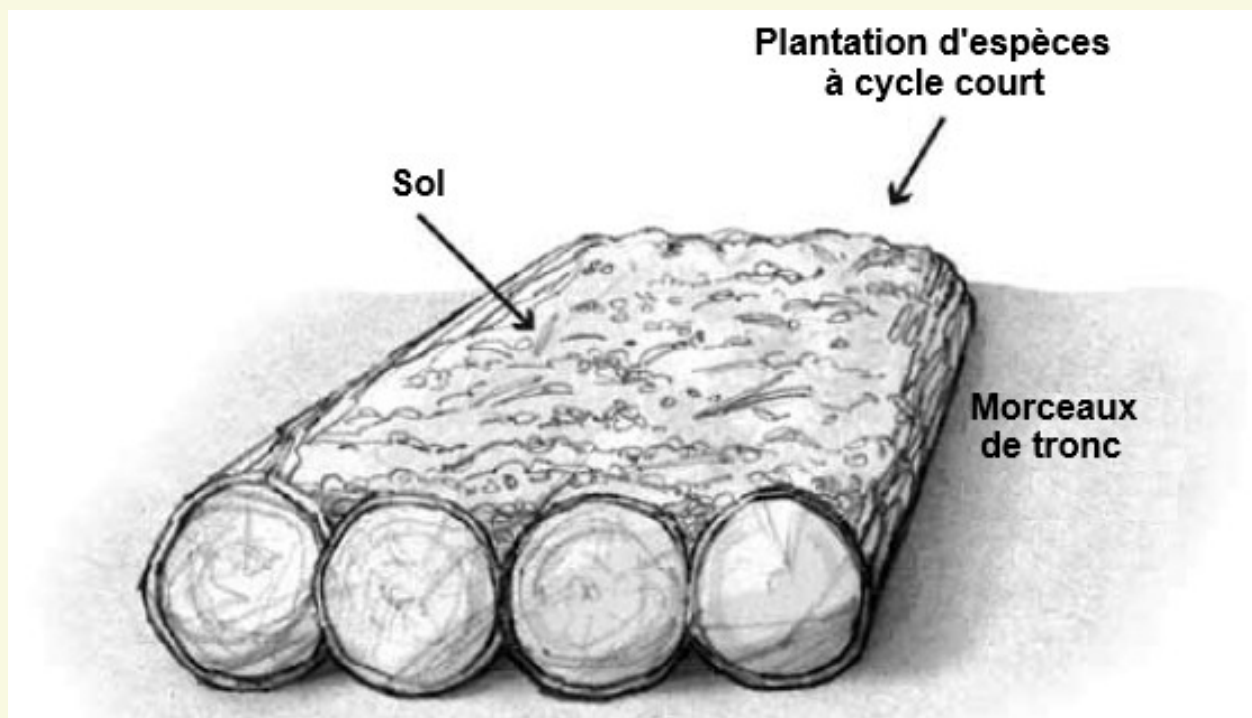


Fig.29. Possibilité de recouvrir les rondins dans les planches de terreau pour la plantation d'espèces à cycle court, notamment de légumes.



Fig.30. Représentation d'une planche agroforestière.

L'expérience de Cooperafloresta montre que la plantation dans une planche agroforestière produit une banque très dense et diversifiée de graines, de propagules et de semis, contenant des dizaines d'espèces (Fig. 30).



Une fois les massifs plantés, il est temps de planter l'espace entre eux. Comme mentionné précédemment, un espace d'environ 3,5 m est généralement maintenu entre les massifs, un espace plus large étant recommandé en cas de sol peu fertile et/ou de stades très précoces de succession écologique.

Dans cet espace, où un désherbage sélectif a été réalisé, l'objectif est d'optimiser la formation de matière végétale grâce à la capture de l'énergie solaire (photosynthèse). En d'autres termes, l'objectif est de créer une « pompe » pour la libération de carbone et d'autres nutriments dans le système, en utilisant des espèces adaptées au plein soleil.

En général, les espèces les plus performantes sont les graminées, avec un métabolisme en C4. Grâce à leurs adaptations morphophysiologiques, les graminées ont tendance à avoir un taux de photosynthèse élevé, convertissant le dioxyde de carbone en matière végétale rapidement et avec une grande intensité en milieu ouvert. Cette matière végétale contient également divers nutriments absorbés par le sol.



Outre leur forte capacité photosynthétique, certaines graminées supportent une tonte tous les deux à trois mois, sous réserve d'un ensoleillement direct. Cette tonte libère ainsi une grande quantité de matière organique riche en carbone et autres nutriments. .

Compte tenu de ces aspects, des graminées à croissance rapide sont plantées dans cette zone. À Cooperafloresta, les principales méthodes de plantation utilisées sont le napier et le mombaça (plantés à partir de graines). Une touffe mature de ces espèces peut produire des centaines de propagules. Le gazon est planté tous les mètres, ou aussi dense que possible, selon la disponibilité des propagules et la capacité de travail. En plus du gazon, des engrais verts peuvent être plantés, notamment des légumineuses (comme la crotalaire, le pois d'Angole, etc.) et des Astéracées (comme les pâquerettes).

L'objectif de cette zone entre les massifs étant de produire une grande quantité de matière végétale afin d'apporter matière organique et nutriments au système agroforestier, moins le sol est fertile, plus la surface allouée à cet effet est importante. Dans le cadre d'expérimentations agroforestières initiées par Cooperafloresta dans les municipalités de Lapa (PR) et Ribeirão Preto (SP), des bandes de 6,8 à 8,4 m de large sont utilisées. Outre l'herbe et l'engrais vert, elles plantent des espèces pionnières d'arbustes et d'arbres rustiques à forte capacité de production et de repousse de matière végétale. La couverture rapide et dense de cette zone, en plus de constituer une « usine à matière organique » (qui fournira des nutriments en se décomposant), permet de contrôler d'autres espèces à croissance rapide et difficiles à contrôler, notamment les plantes herbacées indigènes, car elles occupent l'espace et captent la lumière solaire de ces espèces (Fig. 31).

Fig.31. Agroforesterie en cours de construction, indiquant la plantation d'herbe entre les massifs.

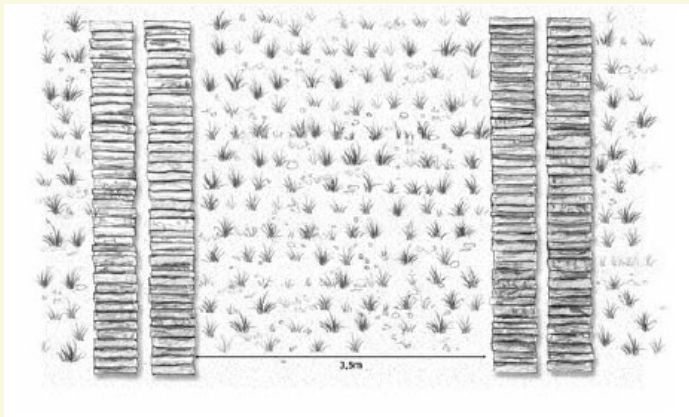


Fig.32. Finalisation de la mise en œuvre de l'agroforesterie.



Une fois la zone entre les planches plantée, le système agroforestier est complété par un recouvrement intégral du sol avec des feuilles et des branches coupées provenant de l'abattage des arbres existants. Les planches et les espaces entre elles sont couverts, avec une quantité proportionnelle de paillis sur les planches. Cette pratique, en plus de protéger le sol de l'érosion, contribue à stimuler la vie du sol et à optimiser l'utilisation de l'espace agroforestier (Fig. 32).

3. Gestion initiale des graminées et des espèces à cycle court

Dans les deux à quatre mois suivant la mise en place du système agroforestier, la zone entre les planches tend à être entièrement recouverte d'herbe et, le cas échéant, d'engrais vert. Lorsque le napier présente déjà deux nœuds matures sur sa tige, il est temps de procéder à la première coupe. L'herbe est coupée à la machette et les feuilles sont déposées sur les planches. Il est important de prendre soin de couper la base des feuilles coupées (généralement un tiers de leur longueur) et de les placer dans la zone herbeuse elle-même. Comme le napier « prend racine » très facilement, si la partie basale des feuilles est déposée dans les planches, il est possible qu'il s'y enracine et entre en compétition avec les espèces plantées. D'autre part, cette pratique contribue à la reconstitution de la matière organique dans la zone entre les planches (Fig. 33).

Fig.33. Napier prêt pour la première coupe.

Après la première coupe, des coupes supplémentaires peuvent être effectuées tous les 2 à 3 mois. Cooperafloresta préfère tondre l'herbe en lune décroissante, ce qui favorise la repousse. Chaque coupe représente environ 1,7 kg de matière végétale sèche déposée par mètre carré (soit 17 tonnes de matière végétale sèche par hectare) (Pego et al., 2013). Outre l'herbe, chaque coupe permet également d'éliminer les plantes d'engrais vert matures, déposant ainsi leur matière végétale sur les planches (Fig. 34).



Fig.34. Gestion de l'herbe dans un jeune système



agroforestier.

Lorsque le sol est fertile et que la matière organique est abondante, une récolte intensive d'espèces à cycle court, notamment de légumes, est possible dès la première année d'agroforesterie. Si les

plates-bandes sont bien planifiées et mises en œuvre, la récolte de légumes de la première année est généralement compensée par un surpâturage et une récolte échelonnée des produits agroforestiers. La gestion implique également un soin particulier avec un désherbage sélectif, notamment durant les premières années d'agroforesterie, en retirant les plants des espèces en début de succession et en favorisant les plants plus avancés. De plus, plusieurs espèces, plantées ou issues de la régénération naturelle, peuvent et doivent être partiellement taillées, ce qui génère de la matière organique utilisable dans les plates-bandes et permet à la lumière de pénétrer dans les strates inférieures de l'agroforesterie. Après quatre à six ans, la canopée des arbres et des arbustes créera probablement des conditions d'ombrage qui modifieront la niche propice au développement des graminées plantées, ainsi que des graminées en général. Ainsi, les graminées, qui jouaient un rôle important de production de matière végétale et de renforcement des processus vitaux au début du système agroforestier, quitteront naturellement le système. À ce stade, il n'y a pratiquement plus de fragments de tronc dans les massifs, ceux-ci ayant déjà été transformés par la biote du sol. De plus, la combinaison des plantes issues des plantations des massifs avec celles favorisées par le désherbage sélectif à l'extérieur éliminera progressivement les lignes de massifs du paysage agroforestier (Fig. 37).

4. Gestion des agroforêts matures

Texte préparé à partir du film *Implementação manual e semimecanizada de canteiro agroflorestal*, (« Mise en œuvre manuelle et semi-mécanisée des massifs agroforestiers »), de João Amorim.

(<https://www.youtube.com/watch?v=RSTF-ShrmLQ>).

Pénétrer dans un système agroforestier vieux de quelques années, c'est comme entrer dans une pièce constamment nettoyée. Les gestionnaires de la zone savent où se trouve chaque espèce, car chaque plante, qu'elle soit plantée ou régénérée naturellement, a été plantée et surveillée par un désherbage sélectif et une taille depuis la mise en place de l'agroforesterie.

Le désherbage sélectif commence, en éliminant du système les plantes qui ont déjà produit, qui ont rempli leur rôle dans la succession et qui sont en fin de vie. Ce faisant, le processus de succession écologique est accéléré, en éliminant les espèces qui ne sont plus adaptées aux nouvelles niches créées par la succession elle-même. De cette façon, une gestion constante évite la stagnation du système. Il est important de rappeler que chaque plante retirée doit être coupée et placée au sol, en évitant de placer des espèces qui « prennent » ou « repousse » facilement au contact direct du sol. Ces plantes doivent être placées sur des branches ou des feuilles taillées d'autres espèces.

Un sol nu favorisant l'implantation d'espèces herbacées pionnières, notamment de graminées, les zones exposées au soleil doivent être recouvertes de matériel végétal issu du désherbage sélectif. Par ailleurs, comme le désherbage sélectif et la taille favorisent l'entrée de lumière dans le système, atteignant même les couches les plus basses du système agroforestier et stimulant la croissance des espèces herbacées pionnières, il est essentiel de procéder à un désherbage efficace, en éliminant toutes les plantes qui ne devraient plus être présentes dans le système. Un désherbage sélectif bien réalisé évite un désherbage inutile, réduisant ainsi considérablement le travail au fil du temps.

Il est important de savoir, lors du désherbage sélectif, qu'il est possible d'utiliser plusieurs plantes extraites produisant des propagules ou des semis pouvant servir à l'implantation d'autres systèmes agroforestiers.

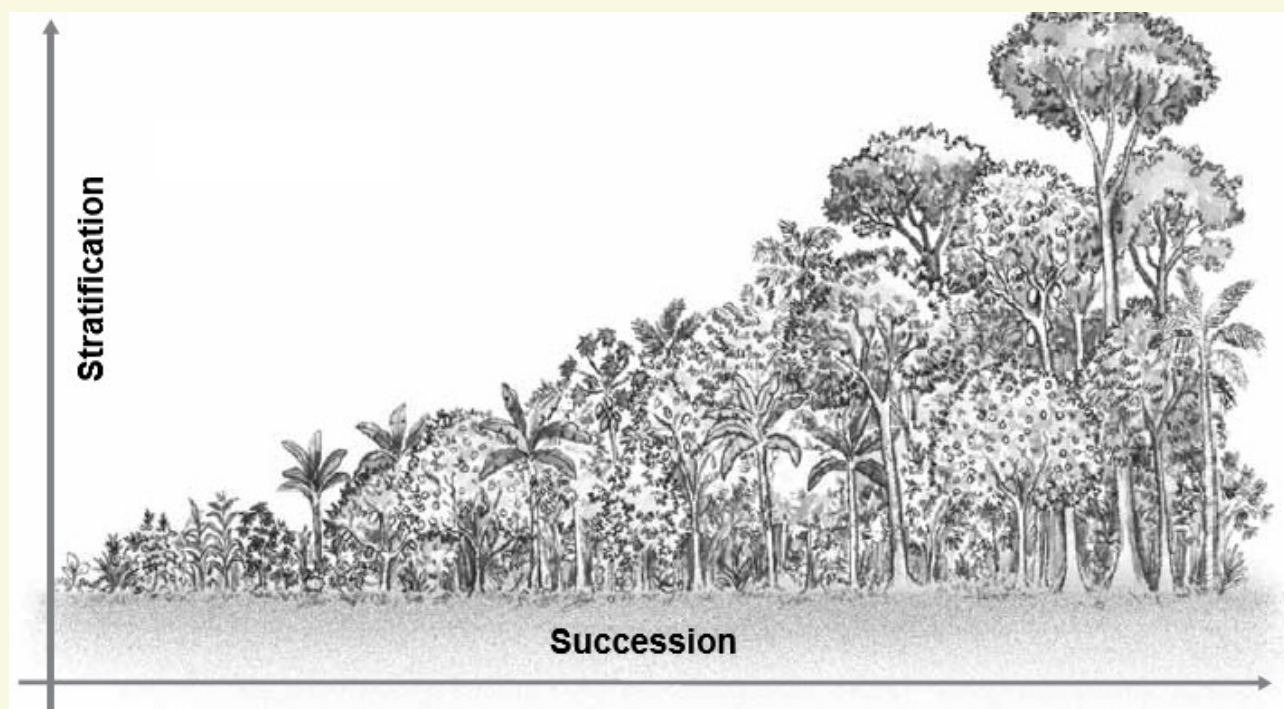
D'autre part, il est probable que plusieurs plantes issues de la régénération naturelle occupent des niches non occupées par des individus d'espèces plantées. Les maintenir et/ou les promouvoir peut être bénéfique pour renforcer les relations et les niches écologiques dans la zone, ou comme sources potentielles de matière organique. Si tel est le cas et que l'espèce peut supporter la taille, tout en continuant à germer dans une niche appropriée, le matériel taillé peut servir à fertiliser la zone. On peut aussi simplement conserver l'individu pour le réévaluer lors d'une gestion ultérieure. Après un désherbage sélectif et la préservation des plantes que vous souhaitez conserver, il est temps de tailler.

Pour revenir à la comparaison avec l'aménagement d'une chambre, tout nouvel aménagement de mobilier proposé comporte certaines limites, imposées par l'espace de la pièce lui-même. Par exemple, on sait d'avance qu'il est impossible de placer l'armoire contre le mur de la fenêtre, ni de fermer le lit par la porte ; il est également possible qu'un grand meuble ne rentre pas dans la pièce à moins de retirer les petits meubles, mais ceux-ci peuvent être essentiels. Dans un système agroforestier, il est impossible de retirer les arbres de leur espace horizontal, ce qui constitue une limitation spatiale. Cependant, on peut les encourager à occuper d'autres espaces verticaux en stratifiant leur couvert, en respectant toujours la vocation écologique de la plante ou la strate qu'elle occupe dans son écosystème d'origine, ce qui peut être déduit par l'observation et l'évaluation continues à d'autres endroits.

C'est là l'enjeu clé de la gestion : à partir de la perception de la succession écologique de l'agroforesterie et de l'identification sur site des espèces qui composent les différents consortiums et strates, il est nécessaire de déterminer la strate idéale que chaque plante occupera au fil du temps. Dans cette optique, des efforts sont déployés pour les guider, notamment par la taille, vers ces strates. Cela implique d'ajuster chaque étape de la gestion, en s'efforçant de mener des activités qui conduisent chaque plante vers sa strate idéale.

En d'autres termes, le processus de succession écologique indique les phases – passées, actuelles et potentiellement futures – du système agroforestier, avec des consortiums d'espèces spécifiques présents ou susceptibles d'être présents à chaque phase. La succession résulte donc de l'influence du temps sur l'espèce et le système agroforestier dans son ensemble. La stratification, quant à elle, est une décomposition du processus de succession écologique dans l'espace vertical, ou, en d'autres termes, le résultat de l'influence du temps sur la structure verticale du système agroforestier (Fig. 38).

Fig.38. Représentation schématique identifiant la succession et la stratification au fil du temps.
Succession Stratification



Comprendre et identifier les possibilités d'intervention pour accroître l'utilisation de l'espace vertical au fil du temps est fondamental pour la gestion. En effet, l'une de ses principales fonctions est d'améliorer, voire de réorienter, certaines dispositions spatiales, en exploitant la puissance de la succession écologique et de la croissance des espèces. Ainsi, après un désherbage sélectif, la gestion se limite principalement à un dialogue avec chaque plante du système agroforestier, répondant à des questions telles que :

- « Cette plante est-elle au bon endroit ? » ;
- « Dois-je déplacer sa couronne à un autre niveau du système agroforestier ? » ;
- « Dois-je l'enlever, car son remplacement dans cette strate semble déjà en cours ? » ;
- « Quel est le rôle de cette plante, aujourd'hui et à l'avenir, dans la formation de niches et de relations écologiques, et quelles relations et niches sont souhaitables ? »
- « Quel est le rôle de cette plante, aujourd'hui et demain, dans la formation de niches et de relations écologiques, et quelles relations et niches sont souhaitables ? » ;
- « Quels sont les rôles de cette plante, aujourd'hui et demain, dans la formation de niches et de relations écologiques ? » ;
- « Quelle hauteur devrait atteindre sa canopée à moyen terme ? » ;
- « Quelle sera la hauteur de la canopée des arbres adjacents ou devrait-elle être palissée ? » ;
- « Quelle intensité lumineuse optimisera la productivité de cette plante ? » ;
- « Comment puis-je tailler les arbres adjacents pour faciliter l'entrée de lumière ? » Ces échanges, en examinant chaque plante sous différents angles et en s'appuyant sur les caractéristiques de chaque espèce, permettent de déterminer les types de taille à pratiquer.

4.1 Taille de stratification

Comme indiqué précédemment, chaque plante possède sa strate idéale, ou niveau, en fonction de l'espace horizontal qu'elle occupe en agroforesterie et des différentes espèces qui l'entourent. La taille par marcottage est pratiquée pour encourager chaque plante à occuper véritablement la strate appropriée.

Par exemple, si un caféier, un agrume et un cannelier sont proches l'un de l'autre, leurs canopées occupant la même strate verticale, il est important de procéder à une taille qui les stratifie correctement.

Vous pouvez « couper la tête » (le méristème apical) du caféier, ce qui l'encourage à former une large jupe et à ne plus pousser verticalement ; tailler les branches basses du cannelier et, si nécessaire, les branches des arbres adjacents qui bloquent la lumière pour atteindre sa canopée, favorisant ainsi sa croissance verticale ; et enfin, entretenir l'agrumes, en effectuant une taille de fructification si nécessaire (Figure 39).

Si le cannelier est taillé trop bas, avant la formation des branches, ses repousses entreront en compétition, dans la même strate, avec les agrumes, voire le caféier. Si le caféier est taillé au niveau de ses branches latérales plutôt que du méristème apical, il aura tendance à pousser verticalement, concurrençant ainsi les agrumes. Ainsi, le succès productif et écologique de l'agroforesterie dépend d'une répartition adéquate de la lumière dans chaque stratification, la taille par stratification étant l'outil principal.

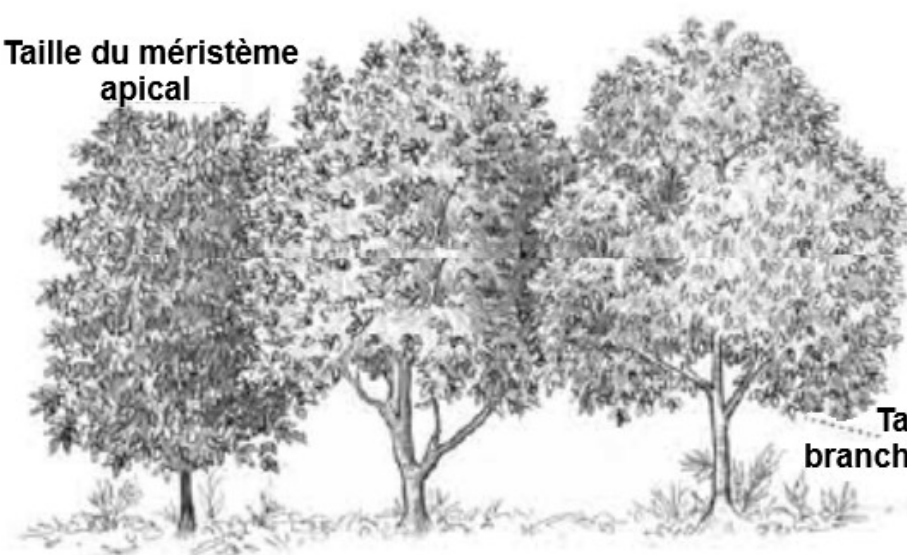
Fig.39. Représentation schématique de la taille par stratification.



Taille de stratification



Taille du méristème apical



Taille des branches inférieures

4.3 Taille des arbres fruitiers

La taille des arbres fruitiers est un traitement et un entretien visant à faciliter la floraison et la fructification. En général, plus la canopée est aérée, plus la fructification est probable et, parallèlement, plus le risque d'attaques fongiques et d'insectes est faible. Il est donc important de supprimer les branches âgées ou sénescentes, les branches malades et celles qui chevauchent les branches plus vigoureuses. De plus, les branches « suceuses » (branches plus épaisses qui ont tendance à pousser plus droites et verticalement) doivent également être supprimées pour éviter toute perte d'énergie.

Outre ces critères généraux, il est important de prendre en compte les caractéristiques spécifiques de chaque espèce en matière de fructification et de fructification afin de garantir une taille appropriée.

Certaines espèces ne produisent des fruits que sur les branches annuelles, d'autres sur celles d'un an, et d'autres encore sur les branches plus âgées. Adapter la taille des arbres fruitiers à ces caractéristiques est essentiel.

Il est également crucial de s'efforcer de façonner la canopée au plus près de la forme naturelle de l'espèce par la taille (Fig. 40). Certaines espèces ne produisent des fruits que sur les branches annuelles, d'autres sur celles d'un an, et d'autres encore uniquement sur les branches plus âgées.

Adapter la taille de fructification à ces caractéristiques est essentiel. Il est également crucial de s'efforcer de façonner la canopée au plus près de la forme naturelle de l'espèce par la taille (Fig. 46).



Fig. 40. Taille de fructification.

4.4 Taille d'élimination

La taille d'élimination est pratiquée lorsque deux plantes ou plus occupent, ou seront présentes, le même espace horizontal avec leur couvert, et que leur strate idéale est la même. Autrement dit, les plantes proches les unes des autres, dont les caractéristiques indiquent qu'elles devraient occuper la même strate dans le système agroforestier, nécessitent une évaluation pour déterminer lesquelles doivent être conservées et lesquelles doivent être éliminées. Contrairement à la taille de stratification, dans ce cas, il est impossible de stratifier les plantes avec succès, car elles occuperont la même strate et seront en compétition les unes avec les autres. Lors du choix de la plante à conserver, il est important de prendre en compte les aspects de diversité, de fonction écologique, de productivité, ainsi que les possibilités d'utilisation et de revenus. Généralement, la décision est prise de supprimer les espèces typiques des stades précédents et de conserver celles typiques des stades futurs. Ce principe est souvent facile à comprendre, car la sélection naturelle tend à laisser les individus en meilleure santé au stade de succession futur.

Il est important de rappeler que la taille d'élimination fait partie intégrante du processus de planification, même si elle n'est pas définie pour chaque espèce ou plante. Comme décrit précédemment, au moment de la plantation, on sème ou plante beaucoup plus de graines, de propagules ou de semis que prévu pour les plantes adultes, afin de garantir la « disponibilité génétique » et l'adaptation de l'espèce au système agroforestier. Plus une espèce présente une grande diversité d'usages et de fonctions écologiques, plus les possibilités de tirer profit de la taille d'élimination sont grandes.



Fig. 47. Taille d'élimination

4.4 Entretien de la taille

Bien que l'évaluation du type de taille à effectuer repose sur un dialogue avec chaque plante, il est important que chaque intervention tienne compte de l'aspect général de la plante agroforestière, en optimisant l'entrée de lumière à tous les niveaux ou strates. À cette fin, il est toujours important de considérer la structure agroforestière souhaitée pour la prochaine gestion. De plus, comme le suggère Götsch (1995), il convient de prêter attention à la plante existante en dessous de celle à tailler, qui la remplacera lors de la prochaine culture intercalaire. Ainsi, il faut tenir compte à la fois de la plante à tailler et de celle qui subira les conséquences de cette taille, car la taille affectera la disponibilité de lumière, d'espace et de matière organique pour le système. Lors de la taille, il est également important de tenir compte du fait que les arbres de très grande taille peuvent rendre la gestion beaucoup plus difficile. Il convient donc de considérer la hauteur maximale des arbres à maintenir, en cherchant à tailler leurs méristèmes apicaux lorsqu'ils atteignent cette hauteur. Dans le cas des arbres à bois d'œuvre, cette taille contribue également à « épaissir » l'arbre, car elle favorise l'activité des méristèmes secondaires. Il est important de rappeler que pour gérer une agroforêt mature, il est nécessaire d'utiliser des outils de taille différents. La taille de marcottage et la taille d'élimination peuvent toutes deux être réalisées à la machette. La différence réside dans le fait que, pour la taille de marcottage, la coupe doit être très nette et de bas en haut, en évitant les échardes. Cela favorise la repousse et empêche la pénétration de champignons, de bactéries et d'insectes dans le tronc. Pour la taille d'élimination, la coupe doit être effectuée au plus près du sol (Fig. 41), en déchiquetant le bois avec précision afin de réduire les risques de repousse. La taille fruitière, en revanche, exige plus de précision, à l'aide d'un sécateur ou d'une scie à main. La taille des branches d'arbres pour le bois d'œuvre doit être effectuée tôt, au bon moment pour éviter les nœuds, et avec précision.

Les résidus de taille, quelle que soit la taille, doivent être finement hachés et déposés sur le sol. Lors de cette opération, il est essentiel, en plus de recouvrir le sol nu, de répartir les résidus le plus uniformément possible, en gardant à l'esprit que les racines sont potentiellement réparties sur toute la canopée, et pas seulement à la base des plants. Enfin, il est crucial de garder à l'esprit que c'est par la taille que la lumière du soleil doit atteindre les différentes strates de l'agroforêt. Par conséquent, toute taille, quelle qu'elle soit, doit optimiser cet apport lumineux. Une taille spécifique peut parfois être nécessaire à cet effet.

5. « Compléter » les agroforêts

En agroforesterie, le désherbage sélectif et la taille créent souvent des espaces pouvant être occupés par d'autres espèces. Comme mentionné précédemment, idéalement, ces espaces devraient être pris en compte dans le plan de plantation. Cependant, dans de nombreuses situations, il est possible et bénéfique d'introduire de nouvelles espèces progressivement et par la gestion, afin de compléter les niches et strates écologiques de l'agroforesterie. Il est donc essentiel de connaître ces possibilités afin d'accroître, autant que possible, les processus vitaux et la productivité agroforestière.

6. Renouvellement agroforestier

Au fil du temps et selon les pratiques de gestion, les espèces d'arbres dominant l'espace agroforestier, laissant peu d'espace et de niches écologiques aux espèces herbacées d'intérêt (à l'exception des espèces herbacées adaptées à l'ombre, comme le taro et le safran). En revanche, la

taille et la récolte dans les agroforêts plus anciennes (lorsque celles-ci n'ont pas été gérées pour éviter qu'elles ne deviennent trop hautes) deviennent souvent difficiles lorsqu'elles nécessitent de grimper aux grands arbres. Lorsque le système est très incomplet en termes d'occupation de niche et/ou que la gestion devient difficile, il est important d'évaluer la pertinence du renouvellement de l'agroforêt, total ou partiel. Dans ce cas, la procédure est la même que pour la mise en œuvre. Cependant, la mobilisation des processus vitaux et l'augmentation de la diversité et de la fertilité obtenues pendant la gestion favoriseront un niveau d'organisation énergétique et de structures vitales bien plus élevé dans l'agroforesterie suivante.

Comme vous pouvez le constater, l'agroforesterie ne se limite pas à la plantation de cultures agricoles en forêt. Une agroforesterie bien établie et gérée est le fruit de plusieurs interventions soigneusement planifiées et exécutées visant à exploiter les processus vitaux du site pour améliorer la vie elle-même.

En d'autres termes, il est important de garder à l'esprit que l'agroforesterie cherche à exploiter et à coopérer intelligemment avec ces processus vitaux. Cette exploitation se fait grâce à une observation et une attention minutieuses, traduites par de multiples interventions judicieusement planifiées. Partant de ce principe, on peut dire que, au sens large, l'agroforesterie consiste bel et bien à planter, à pratiquer l'agriculture et à interagir avec la nature, en utilisant les processus vitaux de la forêt comme champ d'action.

Références citées

- AMORIM, J. Implementação manual e semi-mecanizada de canteiro agroflorestal. Filme. Acesso em <http://www.youtube.com/watch?v=RSTF-ShrmLQ>, em 19 de agosto de 2013. 2013a
- AMORIM, J. Manejo de agrofloresta de 5 anos. Filme. Acesso em <http://www.youtube.com/watch?v=RSTF-ShrmLQ>, em 19 de agosto de 2013. 2013b
- ANGEL-PÉREZ, A.L.D.; MENDOZA B., M.A. Totonac homegardens and natural resources in Veracruz, Mexico. *Agriculture and Human Values*, 21: 329-346, 2004.
- ASSAD, M. L. L. Fauna do solo. In: LOPES VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. (Ed.) *Biologia dos solos dos Cerrados*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1997. 363 - 443 p.
- AZEVEDO, A. C.; VIDAL-TORRADO, P. Esmectita, vermiculita, minerais com hidróxi entrecamadas e clorita. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds) *Química e mineralogia do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 381 – 426.
- BEARE, M.H.; COLEMAN, D.C.; CROSSLEY Jr, D.A.; HENDRIX, P.F.; ODUM, E.P. A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. *Plant and Soil*, Dordrecht, 170: 5-22, 1995.
- BENJAMIN, T.J.; MONTAÑEZ, P.I.; JIMÉNEZ, J.J.M.; GILLESPIE, A.R. Carbon, water and nutrient flux in Maya homegardens in the Yucatán peninsula of Mexico. *Agroforestry Systems*, 53: 103-111, 2001.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução n. 429, de 28 de fevereiro de 2011. *Diário Oficial da União*, 01 de março de 2011.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Instrução Normativa n. 4, de 8 de setembro de 2009. *Diário Oficial da União*, 10 de setembro de 2009.
- BROKAW, N.V.L. Gap-phase regeneration in a tropical forest. *Ecology* 66: 682-687, 1985.
- BUDOWSKI, G. Distribution of tropical american rain forest species in the light of successional process. *Turrialba*, 15: 40-42, 1965.
- CAJA-GIRON, Y.S.; SINCLAIR, F.L. Characterization of multistrata silvopastoral systems on seasonally dry pastures in the Caribbean Region of Colombia. *Agroforestry Systems*, 53: 215-225, 2001.
- CANELLAS, L. P.; MENDONÇA, E. S.; DOBBSS, L.B.; BALDOTTO, M. A.; VELLOSO, A. C. X.;
- SANTOS, G. A.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P. & CAMARGO, F. A. de O. (Eds.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2. ed. ver. e atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 45 – 63 p.
- CAPRA, F. A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos. São Paulo: Ed. Cultrix, 1996. 256p.

- CAPRA, F. As conexões ocultas: ciência para uma vida sustentável. São Paulo: Editora Cultrix, 2002. 296p.
- CARNEIRO, R. O uso do solo e classificação da floresta (Kuikúro). In: RIBEIRO, B. G. (Org.) Suma Etnológica Brasileira – I. Etnobiologia. Belém: Editora Universitária UFPA, 1987. 302 p.
- CARPANEZZI, A.A. Banco de sementes e deposição de folheto e seus nutrientes em povoamentos de bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth) na região metropolitana de Curitiba. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista(UNESP), 1997. 177 f. (Tese de Doutorado).
- CEZAR, R.M. Parâmetros biológicos de solos em sistemas agroflorestais multietratos sucessional e regeneração natural. Curitiba, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná, 2013. 62 f. (Dissertação de Mestrado).
- CHABOUSSOU, F. Plantas doentes pelo uso de agrotóxicos: a teoria da trofobiose. Tradução de Maria José Guazzelli. Porto Alegre: L&PM, 1999. 272p.
- CLARK, D. A. Are tropical forests an important carbon sink? Reanalysis of the long-term plot data. *Ecological Applications* 12: 3–7, 2002.
- DÍAZ, S.; CABIDO, M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 16: 646-655, 2001.
- DUXBURY, J. M.; SMITH, M. S.; DORAN, J. W. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. (Eds.) Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Manoa: NifTAL Project, University of Hawaii, 1989. 33 – 67 p..
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. State of the world forests. Rome: 2011. 179 p.
- FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: van LIER, Q. J. (Ed.) Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 1 – 27 p.
- FUTUYMA, D. J. Biologia evolutiva (coord. tradução Mario de Vivo). 2ª Ed. Ribeirão Preto, FUNPEC-RP, 2002. 631 p.
- GARRITY, D.P.; LEFROY, R.D.B.; BLAIR, G.J.; CRASWELL, E.T. the fate of organic matter and nutrients in agroforestry systems. In: LEFROY, R.D.B.; BLAIR, G.J. (Eds.) Soil organic matter management for sustainable agriculture: a workshop held in Ubon, Thailand, Aug. 1994. Proceedings n. 56. Anais, Camberra: ACIAR , 1995. p. 69-77.
- GARWOOD, N. C. Tropical soil seed banks: a review. In: LECK, M. A., ARKER, V. T.; SIMPSON, R. A. (Eds.). Ecology of soil seed banks. San Diego, Academic Press, 1989. p. 149-209.
- GLIESSMAN, S.R. Agroecologia. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2005. 653 p.
- GLOVER, N.; BEER, J. Nutrient cycling in two traditional central american agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 4: 77-87, 1986.
- GÖTSCH, E. Natural succession of species in agroforestry and in soil recovery. Pirai do Norte, Fazenda Três Colinas, 1992. 19 p. (não publicado)
- GÖTSCH, E. Break-through in agriculture. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1995. 22 p.

- GRANADOS, L.A.C. Viabilidade financeira de sistemas agrosilvopastorais multiestrata y agroflorestales, en fincas ganaderas convencionales del Departamento de Santander, Colombia. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2005. 146 f. (Dissertação de Mestrado).
- HALL, J. B.; SWAINE, M. D. Seed stocks in Ghanaian forest soils. *Biotropica*, 12: 256-263, 1980.
- HEYWOOD, V. H.; WATSON, R. T. Global biodiversity assessment. Cambridge: University Press, United National Environmental Programme. 1997. 140 p.
- HOLGUIN, V.A.; IBRAHIM, M.; MORA-DELGADO, J. El aprendizaje participativo como base de un cambio positivo del uso del suelo en fincas ganaderas de Costa Rica. *Livestock Research for Rural Development*, v.19, n.4, abr 2007. Disponível em: <<http://w.cipav.org.co/lrrd/lrrd19/4/holg19053.htm>>. Acesso em 10/09/2013.
- HURLBERT, S. The nonconcept of species diversity: a critic and alternative parameters. *Ecology*, 52: 577-586, 1971.
- JORDAN, C.F. Nutrient Cycling Processes and Tropical Forest Management. In: GÓMEZ--POMPA, A.; WHITMORE, T.C. and HADLEY, M. (Eds.) *Rain Forest Regeneration and Management*. Paris: UNESCO (Man and The Biosphere Series, vol.6), 1990. p. 159-180.
- KAGEYAMA, P. Y.; GANDARA, F. B. Recuperação de áreas ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. (Eds.). *Matas ciliares: conservação e recuperação*. São Paulo: Universidade de São Paulo/Fapesp, 2000. 261 p.
- KÄMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de solos brasileiros. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (Eds) *Pedologia: fundamentos*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 81 – 145.
- LAMBERS, H.; CHAPIN I., F. S.; PONS, T. L. *Plant physiological ecology*. New York: Springer-Verlag, 1998. 540 p.
- LAURANCE, W.F.; LOVEJOY, T.E.; VASCONCELOS, H.L.; BRUNA, E.M.; DIRHAM, R.K.; STOUFFER, P.C.; GASCON, C.; BIERREGAARD, R.O.; LAURANCE, S.G.; SAMPAIO, E. Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-years investigation. *Conservation Biology*, 6: 605-618, 2002.
- LIMA, C. L. R.; PILLON, C. N.; SUZUKI, L. E. A. S. & CRUZ, L. E. C. Atributos físicos de um Planossolo Háptico sob sistema de manejo comparados aos do campo nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 1849 – 1855, 2008.
- LIMA, R. M. B. de. Descrição, composição e manejo dos Cultivos Mistos de Quintal na Várzea da “Costa do Caldeirão”. Manaus, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia, 1994. 293 f. (Dissertação de Mestrado).
- LOVELOCK, J. *As eras de Gaia: uma biografia da nossa Terra viva*. Tradução de Lucília Rodrigues. Mira-Sintra: Publicações Europa-América, 1988. 214 p.
- LOVELOCK, J. *Gaia: cura para um planeta doente*. São Paulo: Cultrix, 2006. 192p.
- MARGALEF, R. *Perspectives in ecological theory*. Chicago: University of Chicago Press, 1968. 111 p.

- MARTINEZ-RAMOS, M.; ALVAREZ-BUYLLA, E.; SARUKHAN, J.; PINERO, D. Treefall age determination and gap dynamics in a tropical forest. *Journal of Ecology*, 76: 700-716, 1988.
- MATURANA, H. R.; VARELA, F. J. A árvore do conhecimento: as bases biológicas da compreensão humana. São Paulo: Editora Palas Athena, 2001. 288 p.
- MAY, R. M., LAWTON, J. H.; STORK, N. E. Assessing extinction rates. In: LAWTON, J. H. and MAY, R. M. (Eds.) *Extinction rates*. Oxford: Oxford University Press, 1995. p. 1-24.
- MEA - MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005. 137p.
- MELO, V. F.; WYPYCH, F. Caulinita e haloisita. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds) *Química e mineralogia do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 427 – 504.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE/CENTRO ECOLÓGICO. Relatório do Estudo Sistemas de Uso de Terra e Serviços Ambientais. SUBPROGRAMA PROJETOS DEMONSTRATIVOS – PDA. Relatório (não publicado). www.mma.gov.br (Acesso em 20/06/2013)
- MYERS, N.; KNOLL, A. The biotic crisis and the future of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98: 5389–5392, 2001.
- NOSS, R.F.; CSUTI, B. Habitat fragmentation. In: MEFFE, G.K., CARROLL, R.C. (Eds.). *Principles of Conservation Biology*, 2 ed., Sinauer: Sunderland, MA, 1997. p. 269-304.
- OLIVEIRA, A. Diversidade, estrutura e dinâmica do componente arbóreo de uma floresta de terra firme de Manaus, Amazonas. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1997. 198 f. (Tese de Doutorado).
- PEGO, L.; BINNECK, S.; BORGES, S.; VIEIRA, W. Agrofloresta como estratégia produtiva e de conservação ambiental na Floresta Nacional do Açungui – Campo Largo/PR. Projeto Profissional de Intervenção. Curitiba, Faculdade Evangélica do Paraná, 2013. 63 p.
- PENEREIRO, F. M. Sistemas agroflorestais dirigidos pela sucessão natural: um estudo de caso. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 1999. 138 f. (Dissertação de Mestrado).
- PIANKA, E. R. *Evolutionary ecology*. New York: Harper Collins College Publishers, 5 ed., 1994. 486 p.
- PIANKA, E. R. Latitudinal gradients in species diversity: a review of the concepts. *American Naturalist*, 100: 34-46, 1966.
- PICKETT, S.T.A.; ROZZI, R. The ecological implications of wolf restoration: contemporary ecological principles and linkages with social processes. In: SHARPE, V. A.; NORTON, B.; DONNELLEY, S. (Eds). *Wolves and human communities: biology, politics, and ethics*. Washington, DC: Island Press, 2000. p. 171-190.
- PIMM, S. L.; RAVEN, P. Extinction by numbers. *Nature*, 403: 843-845, 2000.
- POSEY, D.A. A preliminary report on diversified management of tropical forest by the Kayapo Indians of Brazilian Amazon. *Advances in Economic Botany*, 1:112- 126, 1984.

- PRICE, P. W. The web of life: development over 3,8 billion years of trophic relationships. In: MARGULIS, L.; FESTER, R. (Eds). Symbiosis as a source of evolutionary innovation. Cambridge: MIT Press, 1991. p. 262-272.
- PRIGOGINE, I. As leis do caos. São Paulo: Editora UNESP, 2002. 109p.
- PRIGOGINE, I. O fim das certezas. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1996. 199p.
- PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. A nova aliança: metamorfose da ciência. 3 ed. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1997. 247p.
- PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. Entre o tempo e a eternidade. São Paulo: Companhia das Letras, 1992. 226p.
- ROZZI, R.; FEISINGER, P.; MASSARDO, F.; PRIMACK, R. Que es la diversidad biológica? In: PRIMACK, R.; ROZZI, R.; FEISINGER, P.; DIRZO, R.; MASSARDO, F. Fundamentos de conservación biológica. México DF, México: Fondo de cultura económica, 2001. 797 p.
- RICKLEFS, R.E. A economia da natureza. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Koogan S.A., 2003. 503 p.
- RUSSEL, J. B. Química geral. Vol. 2. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1994. 1268 p.
- SCHULTEN, H.R.; SCHNITZER, M. A state of the art structural concept for humic substances. *Naturwissenschaften*, 80: 29-30, 1993.
- SCHWIDERKE, D. K. Estoque e ciclagem de nutrientes em sistema agroflorestal sucessional e floresta secundária no vale do Ribeira. Curitiba, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná, 2013. 120 f. (Dissertação de Mestrado).
- SHTORACHE, G. F. Atributos físicos do solo em sistema agroflorestal multiestrata sucessional. Curitiba, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná, 2013. 71 f. (Dissertação de Mestrado).
- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H. A.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Eds. Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275 – 374.
- SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O. de & CERETTA, C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E. J. (Ed.) Fundamentos de química do solo. Porto Alegre: Genesis, 2000. 45 – 62p
- SILVEIRA, N.D. Sostenibilidad socioeconómica y ecológica de sistemas agroflorestales de café (*Coffea arabica*) en la microcuenca del Río Sesesmiles, Copán, Honduras. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2005. 154 f. (Dissertação de Mestrado).
- SIMINSKI, A.; FANTINI, A. C.; GURIES, R.P.; RUSCHEL, A.R.; REIS, M. S. Secondary forest succession in the Mata Atlantica, Brazil: floristic and phytosociologic trends. *ISRN Ecology*, 2011: 1-19, 2011.
- SIQUEIRA, J.O.; FRANCO, A.A. Biotecnologia do solo: fundamentos e perspectivas. Brasília: MEC, ABEAS; Lavras: ESAL, FAEPE, 1988. 236 p.

STAYER, C.; GUHARAY, F.; MONTEROSSO, D.; MUSCHLER, R.G. Designing pest-suppressive multi-strata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agroforestry Systems*, 53: 151-170, 2001.

STEENBOCK, W. Domesticação de bracatingais: perspectivas de conservação ambiental e inclusão social. Florianópolis, Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. 281 f. (Tese de Doutorado).

STEENBOCK, W.; SILVA, R. O.; FROUFE, L. C. M.; SEOANE, C. E. S. Agroflorestas e sistemas agroflorestais no espaço e no tempo. In: STEENBOCK, W.; COSTA E SILVA, L.; SILVA, R. O.; RODRIGUES, A. S.; PEREZ-CASSARINO, J.; FONINI, R. *Agrofloresta, ecologia e sociedade*. Curitiba, Kairós, 2013a. p. 39 – 60.

STEENBOCK, W.; SILVA, R. O.; VEZZANI, F. M.; MARTINS, P. J.; FROUFE, L. C. M.; SEOANE, C. E. S. Avaliação da dinâmica do carbono em agroflorestas desenvolvidas por agricultores associados à Cooperafloresta. In: STEENBOCK, W.; COSTA E SILVA, L.; SILVA, R. O.;

RODRIGUES, A. S.; PEREZ-CASSARINO, J.; FONINI, R. *Agrofloresta, ecologia e sociedade*. Curitiba, Kairós, 2013b. p. 321 – 344.

STEENBOCK, W.; SILVA, R. O.; VEZZANI, F. M.; SEOANE, C. E. S.; FROUFE, L. C. M.; Características estruturais das agroflorestas desenvolvidas no âmbito da Cooperafloresta. In:

STEENBOCK, W.; COSTA E SILVA, L.; SILVA, R. O.; RODRIGUES, A. S.; PEREZ-CASSARINO, J.; FONINI, R. *Agrofloresta, ecologia e sociedade*. Curitiba, Kairós, 2013c. p. 345 – 362.

TILMAN, D.; REICH, P. B.; KNOPS, J.; WEDIN, D.; MIELKE, T.; LEHMAN, C. Diversity and Productivity in a Long-Term Grassland Experiment. *Science*, 294: 843-845, 2001.

TOREZAN, J.M.D. Estudo da sucessão secundária na Floresta Ombrófila Densa Submontana, em áreas anteriormente cultivadas pelo sistema de “coivara”, em Iporanga, SP.

Dissertação de Mestrado. Curitiba, Programa de Pós-Graduação em Botânica, Departamento de Botânica, Universidade Federal do Paraná, 1995. 89 f.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. O solo como sistema. Curitiba: edição dos autores, 2011. 104p.

von BERTALANFFY. The theory of open systems in physics and biology. *Science*, 111: 23 – 29, 1950.

WRI/IUCN/UNEP (WORLD RESOURCES INSTITUTE/THE WORLD CONSERVATION UNION/UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME). *Global Biodiversity Strategy: guidelines for action to save, study, and use Earth's biotic wealth sustainably and equitably*. Washington, D.C.: WRI/IUCN/UNEP, 1992. 244 p.

YAMAMURA, N. Diversity and evolution of symbiotic interactions. In: ABE, T.; LEVIN, S. A.; HIGASHI, M. (Eds.) *Biodiversity: an ecological perspective*. Kyoto: 1996. 294 p.

YOUNG, A. 10 Hypotheses for soil-agroforestry research. *Agroforestry Today*, 1: 13-16, 1989.