



Volume I. Chapitre 1

Principes et fonctionnement des écosystèmes cultivés en semis direct sur couverture végétale permanente

Lucien SEGUY, Olivier HUSSON, Hubert CHARPENTIER, Serge BOUZINAC, Roger MICHELLON, André CHABANNE, Stéphane BOULAKIA, Florent TIVET, Krishna NAUDIN, Frank ENJALRIC, Ignace RAMAROSON, RAKOTONDRAMANANA

Octobre 2009



Centre de
Coopération
Internationale en
Recherche
Agronomique pour
le Développement



TAny sy FAmpanandroasana



Groupement Semis Direct de Madagascar



Ministère de l'Agriculture,
de l'Élevage et de la Pêche

Principes et fonctionnement du semis direct

1. Fonctionnement d'un écosystème naturel forestier

Dans un écosystème naturel comme la forêt, le sol n'est jamais perturbé et il est protégé en permanence par un couvert végétal très diversifié, qui crée des conditions favorables pour une forte activité biologique (humidité, aération, température, substrat nutritif, etc.) .

Plantes et organismes du sol très divers vivent en interactions, assurent une forte production de biomasse et remplissent diverses fonctions écosystémiques comme :

- la production de matière organique par photosynthèse, à partir de l'eau et du gaz carbonique;
- la protection du sol et la réduction du ruissellement par le couvert végétal permanent;
- le recyclage des éléments nutritifs et de l'eau par les racines profondes;
- la fixation d'azote atmosphérique par les bactéries associées aux plantes (dans les nodosités des racines de légumineuses ou dans la rhizosphère);
- la minéralisation et la solubilisation des éléments nutritifs par les organismes vivants permettant une alimentation régulière des plantes;
- l'enrichissement du sol en matière organique stable et la séquestration de carbone;
- l'aération du sol par les systèmes racinaires puissants;
- la régulation de la température du sol; et
- l'ensemble des processus de pédogenèse avec :

Le sol vivant

La macrofaune et les micro-organismes jouent un rôle fondamental dans la vie d'un sol. Ils sont indispensables à sa formation : altération de la roche mère, décomposition de la matière organique, processus de minéralisation et de formation d'humus, bioturbation, etc.

Ils jouent également un rôle clef dans la formation et la stabilité des agrégats du sol et donc de sa structure.

La microflore (bactéries, mycorhizes, trichodermes, etc.) est aussi fondamentale pour l'alimentation des plantes :

- minéralisation de la matière organique ;
- fixation d'azote atmosphérique ;
- solubilisation des éléments minéraux par oxydation ou chélation, ce qui les rend assimilables par les plantes ;
- extraction d'éléments nutritifs du sol peu mobilisables (modification du pH et du potentiel redox, augmentation de la surface d'interception par les mycorhizes, etc.).

Ils sont si importants pour les plantes qu'elles les stimulent par leurs exsudats racinaires, allant jusqu'à "relacher" par rhizodéposition 20 à 50% du carbone capté par photosynthèse. Certaines plantes carencées en phosphore par exemple peuvent, par leurs sécrétions, favoriser de manière préférentielle le développement de bactéries qui extraient le phosphore fixé dans le sol et le solubilisent.

- altération de la roche mère en argiles (plus ou moins rapide en fonction du climat et du type de roche), par les systèmes racinaires puissants et leur exsudats racinaires, les champignons, les micro-organismes du sol, etc.

- fractionnement progressif par la faune des débris végétaux de grosse taille (ce qui les rend accessibles à la microflore), sous l'intervention d'une grande diversité trophique : gros collemboles, diptères, macro-arthropodes, enchytrées, petits collemboles, oribates, etc.

- humification sous l'action des bactéries, la vitesse et les produits de cette humification variant en fonction de la végétation, du climat et de la microflore ;

- bioturbation (fonction indispensable à la pédogenèse, mixant ainsi matières minérales et matières organiques, permettant la formation du complexe argilo-humique et les processus d'agrégation du sol) par la faune du sol : vers de terre, fourmis, termites, larves de coléoptères, etc.

- agrégation et stabilisation des agrégats par la faune (bioturbation, activation de la microflore), les champignons (par les mycélium/hyphes), les colonies de bactéries, les exsudats racinaires, polysaccharides, etc.

Ces diverses fonctions, remplies par les plantes et les organismes vivants du sol, permettent d'assurer une pédogenèse active, et de maintenir un sol qui se renouvelle régulièrement. Le turn-over important de la matière organique et des éléments nutritifs, et l'absence de pertes par lessivage, permettent d'entretenir de manière durable une forte production, même sur des sols à fertilité réduite. Cette production de biomasse permet quant à elle d'entretenir la pédogenèse.

L'écosystème est stable et résilient.

Principes et fonctionnement du semis direct



Principes et fonctionnement du semis direct

2. Principes de fonctionnement des écosystèmes cultivés

2.1. Principes de l'agriculture conventionnelle



Erosion et carence en phosphore sur maïs en système conventionnel

L'agriculture conventionnelle est basée sur le travail du sol et les intrants chimiques. Le rôle du sol y est réduit à sa plus simple expression, celui de support physique pour les plantes et de réservoir d'éléments nutritifs. La réponse à des contraintes agronomiques diverses se fait essentiellement par l'adaptation des itinéraires techniques qui visent à assurer les différentes fonctions agronomiques fondamentales :

- restructuration du sol par un travail mécanique ;
- contrôle des adventices par travail du sol et emploi d'herbicides ;
- alimentation des plantes en éléments nutritifs par apports d'engrais chimiques et/ou organiques ;
- alimentation en eau par l'irrigation (quand elle est possible) ;
- contrôle des bioagresseurs par utilisation de pesticides.

La création variétale et la sélection de plantes vise à valoriser au mieux les intrants et à s'adapter au mieux à ces conditions du milieu qui se dégradent (résistance aux maladies, etc.).

2.2. Principes des systèmes traditionnels d'abattis-brûlis

Les systèmes agricoles traditionnels basés sur l'abattis-brûlis fonctionnent sur la base d'une alternance entre écosystème forestier et systèmes conventionnels avec travail du sol (mais avec un minimum d'apport d'intrants). La dégradation générale de l'écosystème (activité biologique, structure du sol, pression des adventices, etc.), très rapide durant les périodes de culture, est partiellement compensée par la régénération durant les périodes de jachère.

2.3. Principes des écosystèmes cultivés en SCV

Les principes fondamentaux du semis direct sur couverture végétale permanente

Les principes de conduite des écosystèmes cultivés en SCV visent à reproduire le fonctionnement d'un écosystème naturel forestier et en particulier celui de sa litière :

Trois principes fondamentaux

1. Minimiser la perturbation du sol et de la litière (pas de travail mécanique du sol).
2. Maintenir le sol couvert en permanence.
3. Produire et restituer au sol une forte biomasse par associations/successions d'une diversité de plantes aux fonctions multiples.

• Minimisation des perturbations du sol et de la litière.

Le sol et la litière doivent être perturbés au minimum. Ils ne sont donc pas travaillés. Le semis est réalisé directement à travers la couverture végétale en perturbant et en découvrant le sol au minimum (3 à 10 % en fonction de la maîtrise et de la nature des outils de semis direct) par ouverture de poquets (semis manuel) ou de lignes (semis mécanisé). La faible perturbation du sol est favorable au développement de l'activité biologique, ralentit la minéralisation et permet de maintenir la couverture végétale.

• **Couverture permanente et totale du sol.** Le sol est maintenu en permanence protégé sous une épaisse couverture végétale qui peut être morte (les résidus de récolte, les adventices et/ou les plantes de couverture sont totalement contrôlés avant la mise en place de la culture) ou maintenue vivante (une couverture végétale pérenne est simplement contrôlée le temps de la culture, sans être tuée, ce qui lui permet de poursuivre sa croissance après la récolte de la culture). Cette couverture végétale protège le sol en permanence contre l'érosion, entretient des conditions favorables au développement d'une activité biologique intense et contribue à réduire la pression des adventices.

• **Production et restitution au sol d'une forte biomasse.** Cette biomasse est renouvelée annuellement (ce qui permet de maintenir la couverture du sol malgré la minéralisation) **par diverses plantes** (cultures et plantes de couverture) **multifonctionnelles**, conduites en **association et/ou en succession** et qui remplissent des fonctions écosystémiques diverses.

Principes et fonctionnement du semis direct

L'écosystème cultivé en SCV est cependant intensifié par rapport à un écosystème naturel, pour permettre la production de cultures et/ou de fourrages qui sont exportés (ce qui implique en retour des apports pour restituer les éléments nutritifs prélevés par le système).

Ces trois principes permettent de construire trois "piliers" :

Les trois "piliers" du semis direct sur couverture végétale

1. Le premier "pilier" des SCV, est donc la couverture végétale permanente du sol (alimentée par une forte production de biomasse, et non perturbée en l'absence de travail du sol). L'épaisse litière, ainsi constituée sur la base des trois principes fondamentaux du semis direct, protège le sol et modifie la dynamique de la matière organique, de l'eau et des éléments nutritifs ;

2. Le deuxième "pilier" des SCV est constitué par la diversité des plantes (associées ou en successions dans les systèmes SCV selon le troisième principe) qui remplissent de multiples fonctions. Elles assurent en particulier la production de biomasse aérienne (alimentation de la litière) et racinaire (exploration d'un important volume de sol, production de biomasse souterraine, restructuration du sol, mobilisation et recyclage des éléments nutritifs, etc.) ;

3. Le troisième "pilier" des SCV est la forte activité biologique du sol (faune et microflore), rendue possible par les deux premiers "piliers" qui alimentent le sol en matière organique et favorisent le développement des organismes, en :

- restructurant et aérant le sol par les systèmes racinaires puissants ;
- maintenant l'humidité (faible ruissellement, forte infiltration et stockage, évaporation limitée) et tamponnant les températures par la couverture végétale ;
- fournissant un substrat énergétique : la matière organique fraîche (au niveau de la litière en décomposition et des racines après la mort des plantes) et les exsudats émis par les jeunes racines (sucres, hormones, enzymes, etc.).

En retour, cette forte activité biologique contribue à améliorer et stabiliser la structure du sol (structuration et stabilisation des agrégats du sol par la macrofaune, les champignons du sol, les colonies de bactéries, etc.). Elle est essentielle dans la genèse des sols et joue un rôle fondamental dans les cycles des éléments nutritifs, aussi bien au niveau de la litière (cycle de la matière organique : minéralisation, humification et séquestration de carbone, accumulation d'azote organique ; solubilisation des éléments nutritifs par oxydation ou chélation) que du complexe absorbant (nature des bases et rétention). Elle renforce le deuxième "pilier" (les plantes mul-

La couverture végétale / litière

La couverture végétale du sol est fondamentale pour le bon fonctionnement des SCV.

Elle doit être maintenue aussi totale que possible, de manière aussi continue que possible.

Elle est composée des résidus de récolte auxquels s'ajoutent la matière sèche, souvent prépondérante en quantité et en biodiversité, provenant des plantes associées à la culture principale ou pratiquées en succession annuelle.

Elle peut être difficile à maintenir dans des conditions climatiques exceptionnelles, qui peuvent limiter fortement la croissance des plantes. Elle peut à l'inverse être très épaisse, composée parfois des résidus de biomasse issus de plusieurs années successives, en fonction de la quantité et de la qualité de la biomasse et des conditions climatiques. C'est le cas sur les hautes terres malgaches où l'on peut retrouver dans la litière des fragments de cannes de maïs cultivé deux, voire trois années plus tôt.

Cet approvisionnement régulier et ce maintien en permanence d'une couverture végétale, sans perturbation du sol, distinguent les SCV de la plupart des techniques parfois regroupées sous le vocable d'agriculture de conservation, dont les TCS (Techniques Culturelles Simplifiées).

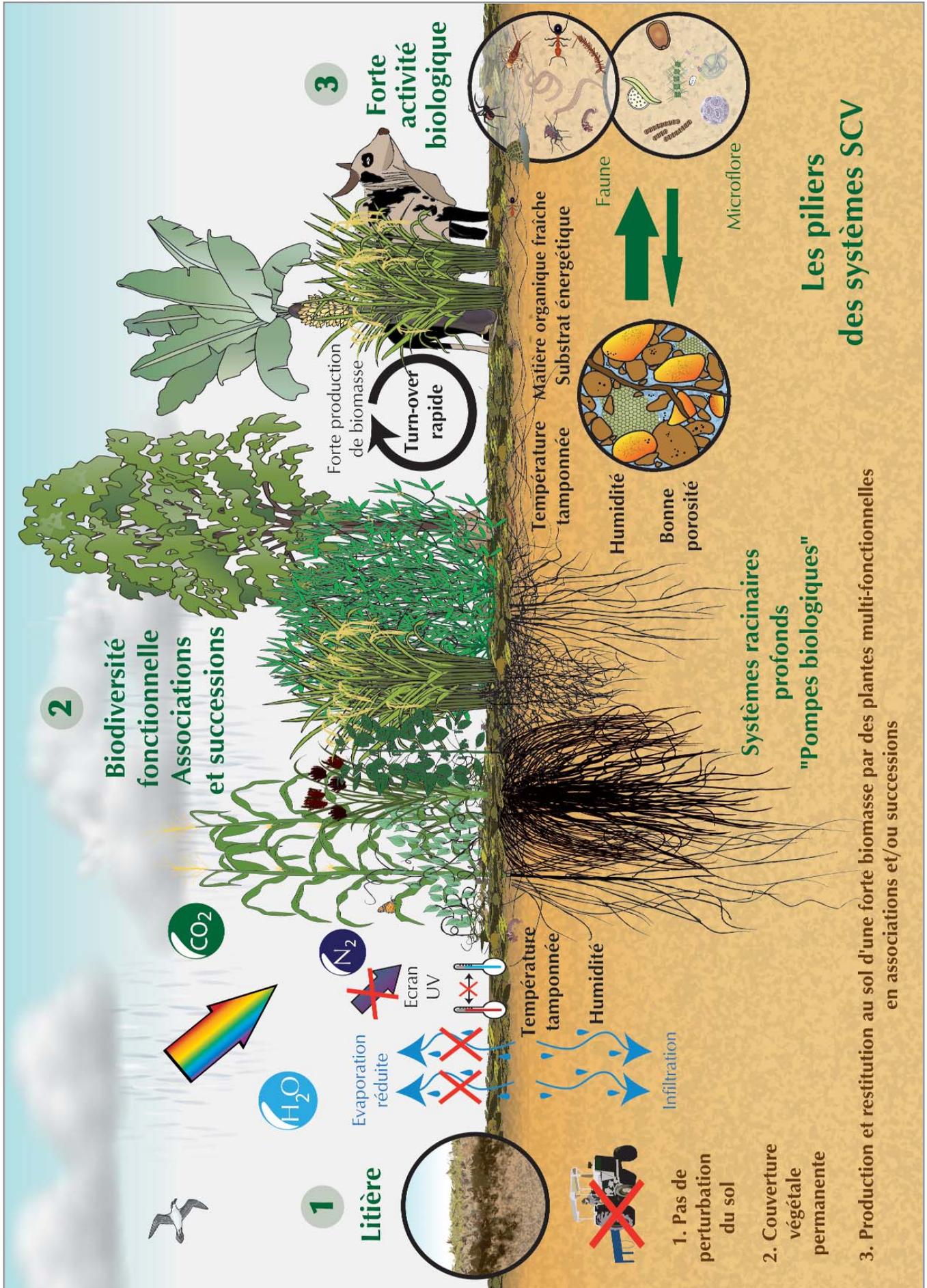
Une diversité de plantes aux fonctions multiples

Les associations et successions de culture jouent un rôle clef dans le fonctionnement des SCV. Les différentes plantes utilisées dans les systèmes permettent d'optimiser la production de biomasse et de remplir un certain nombre de fonctions écosystémiques : structuration et protection du sol, séquestration de carbone, recyclage et stockage des éléments nutritifs, contrôle des adventices et des bioagresseurs, etc.

Elles favorisent également le développement d'une forte activité biologique qui contribue à assurer ces fonctions. Les systèmes sont construits pour remplir au mieux les fonctions prioritaires dans un contexte donné, en choisissant les plantes les plus aptes à lever les contraintes agronomiques les plus limitantes.

L'insertion dans les systèmes de plantes aux systèmes racinaires puissants et profonds permet en particulier d'optimiser les fonctions fondamentales de restructuration des sols et de recyclage des éléments nutritifs et de l'eau (rôle de "pompes biologiques").

Principes et fonctionnement du semis direct



Principes et fonctionnement du semis direct

tifonctionnelles) qui alimente le premier (la litière).

Ces trois "piliers" (couverture végétale/litière + plantes multifonctionnelles/racines + activité biologique associée) se renforcent mutuellement. Ils permettent aux SCV, par leur nature et leur quantité sans cesse renouvelées (biodiversité fonctionnelle), de remplir des fonctions multiples et complémentaires, communes à tous les SCV mais d'intensité variable en fonction des systèmes et de leurs conditions de réalisation (qualité et quantité de la biomasse produite et restituée au sol).

Une activité biologique intense

L'activité biologique intense, permise par la création d'un environnement favorable et la mise à disposition d'un substrat énergétique en abondance (matière organique fraîche et exsudats racinaires), permet d'assurer un certain nombre de fonctions indispensables :

- stabilisation de la structure du sol ;
- processus d'humification et de minéralisation ;
- solubilisation des éléments nutritifs (par oxydation ou chélation) ;
- renforcement des défenses naturelles des plantes, etc.

3. Le fonctionnement des écosystèmes cultivés

3.1. Dynamique de la matière organique

La matière organique du sol

Dans un écosystème à forte production végétale, de qualité diverse, la phytomasse produite permet d'entretenir la litière, dont la décomposition par les organismes vivants contribue largement : i) à la nutrition des plantes (qui permet d'assurer la forte production de biomasse) et, ii) au stockage de carbone dans le sol sous des formes plus ou moins stables, en relation avec l'agrégation des particules. On distingue :

1. Le réservoir "actif" ou "labile", constitué des composés organiques facilement oxydables dérivés de fragments végétaux récents (sucres, amidons, et protéines simples, protéines interstratifiées et polysaccharides, hemicellulose). Il est principalement contrôlé par l'apport de résidus et le climat, et est fortement affecté par le mode de gestion du sol. En milieu tropical, ce réservoir a deux fonctions principales : i) assurer l'alimentation en nutriments et, ii) fournir les composés organiques, agents d'agrégation du sol et de rétention de cations.

2. Le réservoir "lentement oxydable", en relation avec les macro-agrégats, affecté par le mode de gestion du sol.

3 Le réservoir "très lentement oxydable", en relation avec les micro-agrégats, peu affecté par le mode de gestion du sol.

4. Le réservoir "passif" ou "récalcitrant", forme très stable en relation avec le carbone associé aux particules primaires du sol, contrôlé par la minéralogie de la fraction argileuse. Ce réservoir n'est influencé (à l'échelle de la parcelle) par le mode de gestion que dans la mesure où celui-ci engendre un transport par érosion.

Ces différents réservoirs de la matière organique subissent minéralisation et humification, selon différentes voies, en fonction du matériel et des conditions de milieu :

- humification par héritage pour les grosses molécules (polyphénols, lignine), peu attaquées par les micro-organismes ;
- humification par polycondensation des composés phénoliques, issus directement de la décomposition des tissus végétaux ;
- humification par néosynthèse par les micro-organismes du sol, utilisant les (petites) molécules issues de la dégradation des matières organiques fraîches pour former de

Importance de la matière organique

La matière organique du sol joue un rôle fondamental dans :

- la structure du sol et sa stabilité (liant des particules minérales dans le complexe argilo-humique, contributions aux agrégats, etc.) ;
- la rétention de l'eau et sa disponibilité pour les plantes ;
- le stockage et la mise à disposition des éléments nutritifs (forte contribution à la CEC, produits de la minéralisation, etc.) ;
- la régulation du pH du sol (effet tampon) ;
- la stimulation de l'activité biologique (substrat énergétique et supports) ;
- la rétention des micropolluants (améliorant leur dégradation), etc.

Principes et fonctionnement du semis direct

nouveaux composés plus résistants : les polysaccharides (qui jouent un rôle important dans l'agrégation).

La litière étant régulièrement alimentée en matière organique de qualité diverse (et donc à vitesse de minéralisation variée), la minéralisation est ininterrompue et libère en continu des éléments nutritifs solubles, qui permettent une nutrition régulière des plantes.

Les produits issus de l'humification de la matière organique (acides humiques, etc.) vont être étroitement associés par des cations polyvalents (Ca^{2+} , hydroxydes de fer et d'alumine) aux argiles (issues de l'altération de la roche mère) dans le complexe argilo-humique, alimentant le réservoir passif de la matière organique. Cette fraction fine, très stable (durée de vie de 1000 ans) est progressivement agrégée :

- dans les micro-agrégats ($< 250 \mu\text{m}$), avec des limons, et des particules fines de matière organique issues de la décomposition des végétaux et enrobées d'argiles, solidement liés par les racines des plantes, les hyphes et mycélium des champignons et les polysaccharides produits par les micro-organismes et les champignons stimulés par les exsudats racinaires ;
- dans les macroagregats, moins stables que les micro-agrégats (et dans lesquels la matière organique est moins protégée physiquement), agrégeant micro-agrégats, fraction intermédiaire de la matière organique ($50\text{-}200 \mu\text{m}$: fragments de feuilles et de racines), colonies de bactéries et grains de sable sous l'effet liant des hyphes/mycélium des champignons du sol, des polysaccharides, et des racines des plantes.

La faune du sol, et en particulier les vers de terre, jouent un rôle fondamental dans ces processus d'agrégation. Ils assurent la bioturbation du sol, et ainsi la mise en contact des fractions minérales (argiles, limons, sables) et organiques du sol. Ils contribuent non seulement à la création des agrégats (action mécanique de mélange) mais aussi à leur stabilisation (alternance sécheresse-humidité, activation des micro-organismes, etc.).

Ce processus d'agrégation (et donc de séquestration de carbone) est continu, et son taux est directement proportionnel à la restitution de la matière organique (racines, tiges, feuilles, pailles) en quantité et qualité.

La dynamique de la matière organique est ainsi fondamentalement différente entre une agriculture avec travail du sol et des systèmes SCV bien gérés.

Dynamique de la matière organique dans les systèmes conventionnels avec travail du sol

Dynamique de la matière organique dans les systèmes conventionnels avec travail du sol

Les systèmes conventionnels se distinguent par :

- le travail du sol qui entraîne une minéralisation irrégulière, avec des pics de minéralisation très rapide ;
- une production de biomasse relativement faible (production d'un faible nombre d'espèces, sur une période limitée, alimentation irrégulière et déséquilibrée des plantes, etc.) ;
- des résidus peu variés, à C/N relativement faible, qui se décomposent rapidement et en conséquence produisent peu d'humus ;
- une matière organique peu protégée du fait de la faible agrégation ;
- une érosion souvent forte, engendrée par les pratiques destructurantes du sol et un fort ruissellement qui fait que même les fractions les plus stables de la

Vitesse de décomposition des résidus

La vitesse de minéralisation dépend fortement de la qualité de la matière organique fraîche. Les résidus riches en sucres, amidons et protéines simples (et dans une moindre mesure en protéines interstratifiées et en polysaccharides), à ratio C/N bas, se décomposent beaucoup plus rapidement que ceux riches en hémicellulose et cellulose, au ratio C/N plus élevé. Les plus grosses molécules comme les corps gras et les cires, et surtout les polyphénols et la lignine, avec leurs noyaux aromatiques, se décomposent beaucoup plus lentement.

Elle dépend également de l'activité de la microflore et donc des conditions du milieu (aération, humidité, température), du type de sol et des surfaces "d'attaque" (taille des fragments).

La minéralisation est relativement lente durant les périodes sèches et/ou dans les milieux froids (comme dans les climats tempérés). Elle est en revanche particulièrement rapide en milieu tropical humide et chaud toute l'année.

Le labour (et les TCS) accélèrent les processus de minéralisation en fragmentant les résidus, en destructurant les macro-agrégats (exposant ainsi la matière organique qui était protégée à l'intérieur), en créant (temporairement) un apport brutal d'oxygène et en rendant possible l'élévation de la température du sol. La vitesse de minéralisation n'est alors limitée (éventuellement) que par l'humidité et/ou la température (en milieu tempéré).

Principes et fonctionnement du semis direct

matière organique peuvent être exportées de la parcelle.

En conséquence, les résidus de récolte, même s'ils étaient entièrement maintenus sur la parcelle, sont en général insuffisants pour maintenir le stock de carbone du sol, en particulier en milieu tropical où la minéralisation est très rapide. De plus, cette biomasse est très souvent exportée ou brûlée, ce qui fait que les restitutions de carbone au sol dans les systèmes conventionnels sont très faibles. Elles ne permettent pas d'alimenter les différents réservoirs de matière organique (y compris le réservoir actif de la faune et de la microflore). Il en résulte une discontinuité du processus de transformation du compartiment actif, avec une réduction du flux de C vers le réservoir stable de la matière organique du sol.

Dynamique de la matière organique dans un écosystème cultivé en SCV

A l'inverse des systèmes conventionnels, le semis direct sur couverture végétale permanente se caractérise par :

- la production et la restitution régulière d'une très forte biomasse, de qualité variée, alimentant les différents réservoirs de matière organique du sol et entretenant un flux continu de carbone du réservoir actif vers le réservoir stable ;
- une minéralisation régulière et ralentie du fait de la non perturbation de la litière (pas de fractionnement mécanique des résidus, protection des différentes couches d'apports successifs à la vitesse de décomposition variée et peu exposées aux processus microbiens, pas de flux d'oxygène brutaux, température tamponnée) ;

- une agrégation continue, conduisant à une protection de la matière organique au sein des agrégats : formation de complexe argilo-humique, protection de la fraction stable du carbone (<53µm) fortement liée dans les micro-agrégats (<250µm), protection des micro-agrégats dans les macro-agrégats, etc.

La forte production de biomasse et l'intense activité biologique permettent un fonctionnement dynamique de la matière organique en relation avec les processus d'agrégation. La matière fraîche (réservoir temporaire) subit les processus de minéralisation (alimentation des plantes qui vont elles mêmes alimenter la litière) et d'humification (alimentation du réservoir transitoire et du réservoir stable de la matière organique). Ces réservoirs de matière organique sont plus ou moins protégés dans les agrégats, en relation avec leur taille.

Ces processus (avec en premier lieu la forte production de biomasse) conduisent à la séquestration du carbone dans le sol et rendent un service écosystémique fondamental à l'échelle de la planète.

Le semis direct fonctionne donc à l'instar d'un écosystème naturel, sur un turn-over important et rapide de la matière organique et des processus d'agrégation efficaces. La principale différence qui existe entre des systèmes bien gérés en SCV et un écosystème naturel forestier réside dans la quantité et la qualité de la matière organique. Sous SCV, malgré la diversité des plantes cultivées, la part des ligneux est plus faible qu'en forêt et les résidus produits présentent une quantité élevée de cellulose et moins de lignine. La vitesse de décomposition est plus élevée et le taux d'humification est plus faible. Le flux de carbone est plus rapide que sous une végétation naturelle d'espèces diverses ayant un plus grand

Activité biologique et vitesse de minéralisation

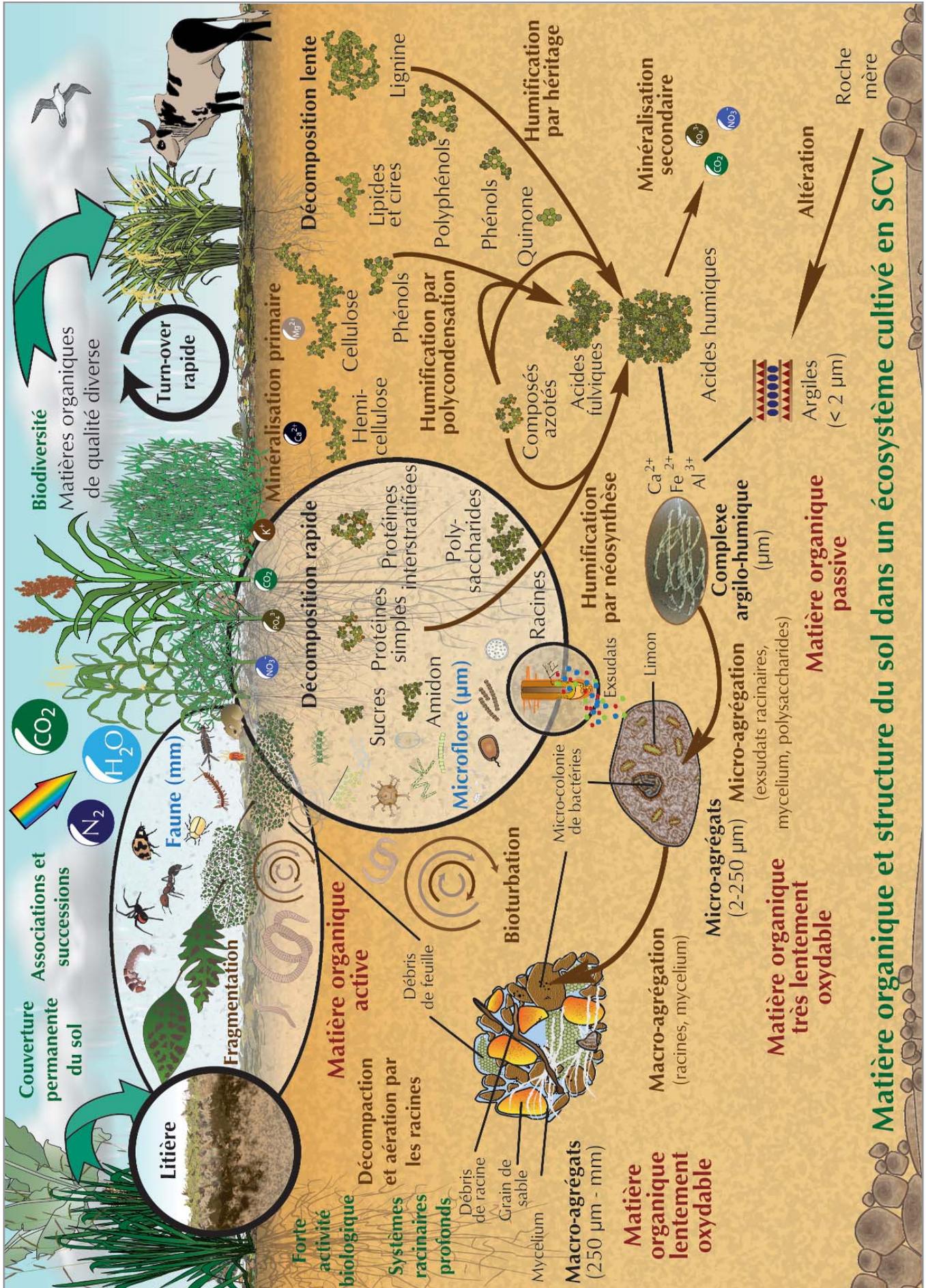
La faiblesse des apports de matière organique fraîche dans les systèmes conventionnels, et l'exposition de cette matière organique à C/N bas, expliquent que malgré une minéralisation rapide dans ces sols, l'activité biologique y est globalement faible : cette activité biologique est concentrée autour des fragments de matière organique, pas ou peu protégés, et relativement peu nombreux.

A l'inverse, dans les sols conduits en SCV, les forts apports de matière organique fraîche (aérienne et racinaire) offrent un substrat abondant à la macrofaune et aux micro-organismes du sol. L'activité biologique (qui ne se limite pas à la minéralisation de la matière organique) y est mieux répartie et globalement beaucoup plus intense, bien que les processus de minéralisation de la matière organique (à C/N élevé et protégée dans les agrégats et/ou la litière) y soient plus lents.

Riz +
avoine sur
couverture
épaisse après
maïs + dolique



Principes et fonctionnement du semis direct



Principes et fonctionnement du semis direct

nombre de composés organiques constitués de cires, corps gras, lignines et polyphénols. Pour être efficaces, les systèmes SCV doivent assurer une très forte production de matériel riche en cellulose grâce aux associations/successions, afin de maintenir un flux de carbone permettant ainsi la redistribution de composés organiques à différents stades d'humification dans les différents compartiments de la matière organique du sol. De tels systèmes ont un turn-over de la matière organique très élevé et un réservoir de matière organique active particulièrement important (20 à 25% en milieu tropical). Dans les milieux tempérés, les flux (production et minéralisation) sont moins rapides qu'en milieu tropical et la part du réservoir actif y est proportionnellement plus faible.

3.2. Structure du sol

Structure du sol dans les systèmes conventionnels

Les systèmes conventionnels cherchent à assurer une bonne structure du sol par un travail mécanique avant la mise en place des cultures. Si cette pratique est relativement simple à mettre en oeuvre (bien que parfois très exigeante en travail), elle comporte de nombreux inconvénients à moyen terme :

- l'amélioration de la structure reste limitée aux horizons travaillés, et est donc superficielle. La création d'une semelle de labour, fréquente avec ces pratiques, empêche la pénétration de l'eau et des racines en profondeur ;
- son impact très négatif sur l'activité biologique et la matière organique font que la stabilité de cette structure du sol ne peut être assurée. Les processus d'agrégation ne peuvent fonctionner et la structure se dégrade rapidement. L'amélioration de la structure par un travail mécanique n'est donc que très temporaire ;
- le sol nu est exposé à l'érosion (éolienne, aratoire ou par ruissellement), et peut s'indurer en surface (en particulier après une forte pluie sur travail du sol trop "fin", avec rupture des agrégats) ou former une croûte de battance (sur les sols "battants").

Structure du sol dans les écosystèmes cultivés en SCV

En semis direct, comme dans un écosystème naturel, la création et le maintien d'une bonne structure du sol sont assurés par :

- la couverture végétale permanente du sol qui remplit la fonction de protection du sol contre l'impact des gouttes d'eau (à forte énergie cinétique), contre l'érosion éolienne et/ou hydrique, et contre le rayonnement du soleil (qui assèche le sol, engendre une forte amplitude thermique et dont les UV sont nuisibles aux organismes biologiques) ;
- l'aération du sol et sa restructuration par la macrofaune (vers de terre, termites, fourmis, collemboles, macroarthropodes, etc.) et par les systèmes racinaires puissants des plantes utilisées dans les associations et successions (avec en particulier

Turn-over de la matière organique

Dans les systèmes conventionnels, la production limitée et la faible restitution au sol de biomasse à C/N bas, associées à une minéralisation irrégulière avec des pics très forts (après labour), font que la matière organique se renouvelle peu et que les pertes sont importantes (et accrues par l'érosion). Il est très difficile dans ces conditions de maintenir un taux de matière organique propice à la production agricole.

A l'inverse, dans les systèmes menés en SCV, les fortes productions et restitutions de biomasse et la création de conditions conduisant à une minéralisation lente et régulière, permettent un turn-over rapide et important de la matière organique et, en conséquence, l'amélioration ou au moins l'entretien du statut organique du sol.

Cela ne signifie pas pour autant que les systèmes en SCV minéralisent moins de matière organique que les systèmes conventionnels : la quantité minéralisée dépend pour beaucoup du taux de matière organique du sol, qui est plus élevé sous SCV qu'en système conventionnel !

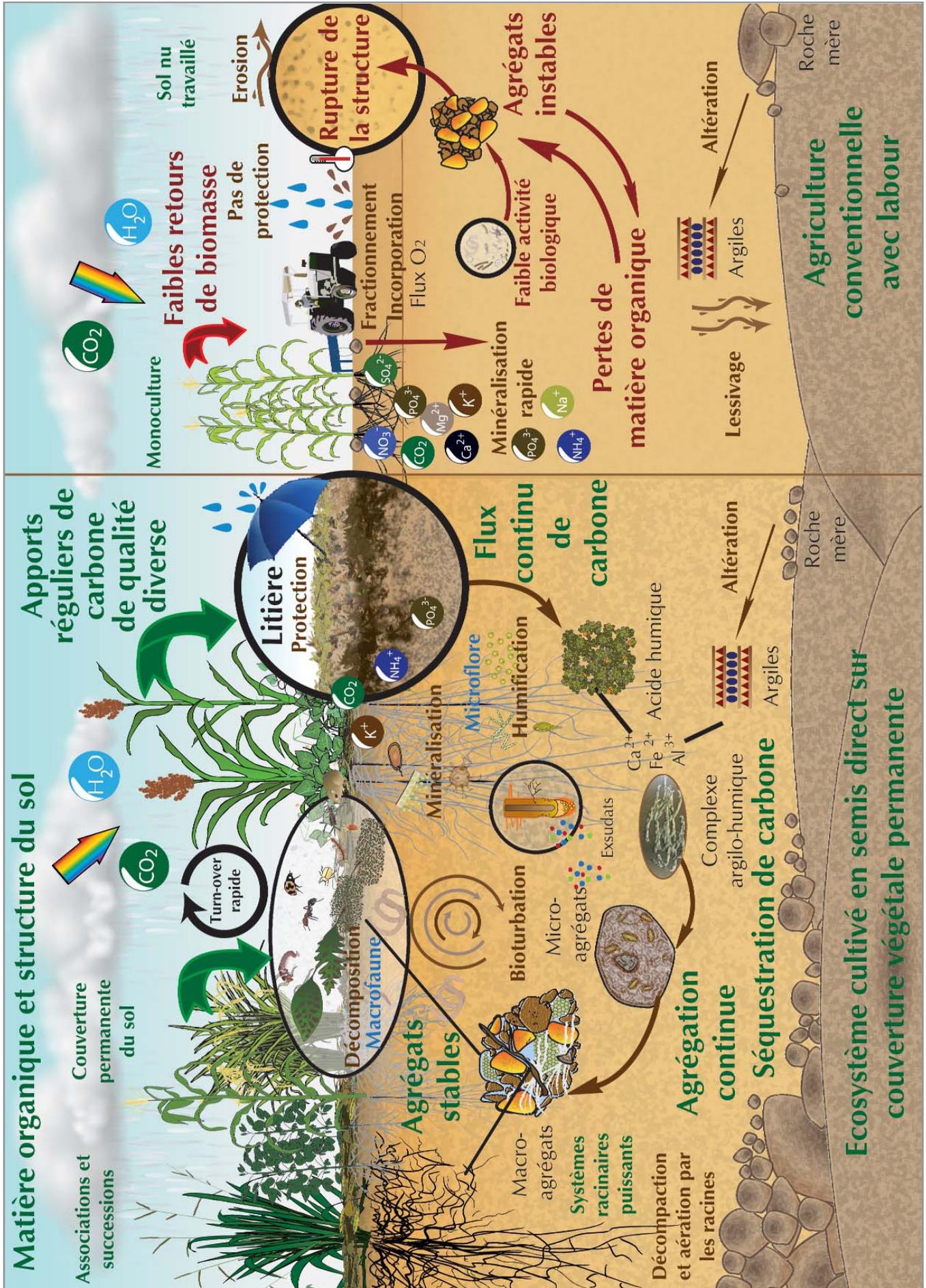
En résumé, les systèmes conventionnels minéralisent rapidement une faible quantité de biomasse et produisent peu d'humus, alors que les systèmes en SCV minéralisent lentement une grande quantité de biomasse et produisent beaucoup plus d'humus.

Microporosité et macroporosité

La macroporosité du sol, qui permet une bonne infiltration et un drainage rapide de l'eau, résulte avant tout du travail par les grosses racines et de l'activité de la macrofaune.

La microporosité du sol, qui permet le stockage de l'eau, est liée aux processus d'agrégation et à l'activité des petites racines.

Principes et fonctionnement du semis direct



Principes et fonctionnement du semis direct

le travail des racines des plantes cultivées en saison sèche). Les systèmes racinaires très denses en surface jouent également le rôle d'une armature flexible et résiliente, et limitent l'impact de la compaction par le passage d'engins lourds en agriculture mécanisée ;

- l'incorporation de matière organique dans le sol : en surface au niveau de la litière, et en profondeur par les racines. Cette matière organique, de qualité variée (des sucres et protéines simples, facilement décomposables jusqu'à la lignine, grosses molécules lentement décomposées, avec une dominance en semis direct de cellulose) va alimenter les différents réservoirs de la matière organique du sol, plus ou moins stables ;
- la formation et la stabilisation des agrégats grâce à une activité biologique intense (rôle de liant de la microflore et bioturbation par la macrofaune), un système racinaire dense et des apports réguliers de biomasse qui constituent à la fois un substrat énergétique pour ces organismes et la matière première de l'humification.

Le travail mécanique du sol des systèmes conventionnels (avec ses effets négatifs) est ainsi remplacé par un travail biologique dans un sol vivant, qui permet le stockage et la protection de la matière organique du sol dans des agrégats stables.

3.3. Fertilité des écosystèmes cultivés

Fertilité des systèmes conventionnels

Dans les systèmes conventionnels, la baisse progressive de la capacité de stockage des éléments nutritifs dans le sol (en particulier du fait de la baisse du taux de matière organique qui influence fortement la capacité d'échange cationique du sol) fait qu'une partie considérable des éléments nutritifs doit être apportée aux cultures, parfois même sans passer par le sol comme dans le cas des engrais foliaires. Les pertes par ruissellement superficiel et lixiviation sont fortes du fait de la grande solubilité de certains engrais, de la rapide minéralisation de la matière organique et du faible enracinement des plantes, tout comme celles liées à l'érosion (facilitée par le travail du sol) et celles par volatilisation sur un sol nu exposé à des températures élevées. La fertilité du système est peu stable et ses performances reposent largement sur des apports extérieurs (quand ils sont accessibles aux agriculteurs). Elles chutent rapidement après l'arrêt des apports d'engrais, d'autant plus que les autres composantes de la fertilité du système "sol" sont souvent défaillantes (en particulier du fait de la faible activité biologique, du faible taux de matière organique et de l'instabilité de la structure du sol), et que les pertes du système sont importantes.

Fertilité des écosystèmes cultivés en SCV

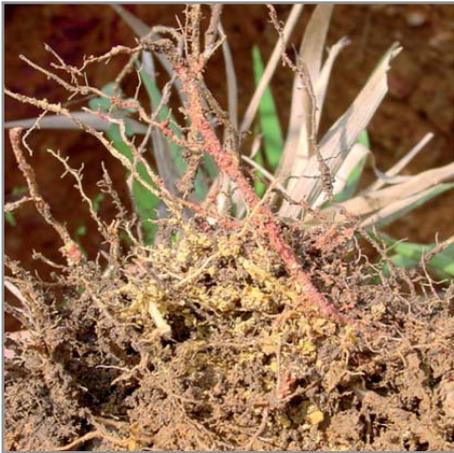
Dans les écosystèmes cultivés en SCV, les éléments nutritifs sont, comme dans un écosystème forestier, concentrés majoritairement dans la biomasse (phytomasse, litière et microflore du sol) qui approvisionne les horizons superficiels du sol. Les plantes cultivées puisent la majeure partie des éléments nutritifs qui leur sont nécessaires dans la litière et les premiers centimètres du sol. La fertilité est globale au système sol/plantes et n'est pas limitée au sol. Grâce aux réserves (dans la phytomasse et la matière organique du sol) et aux faibles pertes, la fertilité des systèmes SCV est stable. Le maintien de cette fertilité est assuré par :

- un turn-over rapide de la matière organique, assuré par une forte production de phytomasse et une activité biologique intense qui permettent d'optimiser les processus d'humification et de minéralisation. Grâce à ce turn-over rapide, la production annuelle de biomasse peut être importante, même sur des milieux pauvres ;
- un taux de matière organique élevé (entretenu par la forte production de biomasse) et en conséquence une capacité d'échange cationique (CEC) élevée, un pouvoir tampon et une capacité de rétention des éléments nutritifs importants ;
- la fixation d'azote atmosphérique, par des légumineuses mais



Maïs + éléusine + crotalaire
Photo : L. Séguy

Principes et fonctionnement du semis direct



Forte activité biologique autour des racines de *Brachiaria brizantha*

Les "pompes biologiques"

Les "pompes biologiques" sont des espèces insérées dans les systèmes et qui remplissent (entre autres) une fonction fondamentale de recyclage et de mobilisation des éléments nutritifs. Par leur système racinaire puissant et profond, leur association avec des mycorhizes et/ou leur stimulation de populations spécifiques de bactéries, elles sont capables de recycler les éléments nutritifs lixiviés en profondeur, d'extraire les éléments peu disponibles et de les transformer en une importante biomasse qui rejoint la litière du sol et permet, au final, d'alimenter les plantes cultivées. Le mil par exemple est un excellent recycleur de potasse, alors que le stylosanthes est capable de recycler les bases (en particulier le calcium) et les oligo-éléments (B, Cu, Zn, Mn, etc.) et de mobiliser le phosphore.

aussi par des bactéries libres (type *Azotobacter sp.*, *Azospirulum sp.*, *Arthrobacter sp.*, etc.) et/ou des champignons du type trichodermes et actinomycètes, stimulés par les exsudats racinaires des plantes (comme l' *Eleusine coracana* ou les brachiarias pour *Azotobacter sp.*);

- la solubilisation des éléments nutritifs par oxydation ou chélation, sous l'action des bactéries qui se développent dans un environnement favorable (porosité, aération, humidité, substrat énergétique, etc.) et riche en matière organique;

- l'extraction des éléments fixés ou en très faible quantité dans le sol, par association des plantes avec des mycorhizes et/ou stimulation sélective (par les exsudats racinaires) de populations de champignons et/ou de bactéries libres du sol capables de remplir cette fonction de mobilisation des éléments nutritifs (champignons du genre *Trichoderma* et bactéries des genres *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Rhizobium*, *Burkholderia*, etc. pour le phosphore, bactéries du genre *Bacillus* pour le potassium et le manganèse, *Thiobacillus* pour le cuivre, etc.). Cette fonction est spécifique des "pompes biologiques", plantes utilisées en couverture qui ont des aptitudes variées à influencer le milieu (potentiel redox, pH, etc.) et stimuler les différentes populations de la microflore;

- le maintien d'une structure favorable à l'enracinement des plantes en profondeur ce qui permet l'exploration d'un grand volume de sol;

- une minimalisation des pertes, que ce soit:

- par érosion, grâce à la protection du sol par la couverture végétale permanente;

- par lessivage, grâce à la stabilisation des argiles dans le complexe argilo-humique;

- par lixiviation des sels solubles, grâce au recyclage des éléments nutritifs par des "pompes biologiques", plantes au système racinaire qui se

- développe en profondeur (en particulier durant la saison sèche pour puiser l'eau);

- par volatilisation (CH_4 , N_2O , SO_2 , etc.), grâce à la couverture végétale (températures tamponnées) et le fonctionnement aérobie de la microflore dans un milieu bien aéré, etc.

La capacité à limiter ces pertes dépend cependant des systèmes SCV mis en place. Les meilleurs systèmes qui associent une très forte production de biomasse tout au long de l'année (et en particulier lors des pics de minéralisation), l'utilisation de plantes aux systèmes racinaires très profonds (en particulier en saison sèche) et l'apport de fertilisation minérale sur les plantes de couverture (au système racinaire profond) plutôt que sur la culture ont des niveaux de pertes très faibles, voire nuls. Au delà d'une amélioration de la fertilité des sols, certains couverts végétaux (graminées du genre *Brachiaria* et légumineuses des genres *Cassia* et *Stylosanthes* en particulier) permettent de remplir (via leur forte production de biomasse même en condition de forte acidité, qu'ils tolèrent très bien) une fonction de neutralisation de l'acidité (et par là de l'aluminium) même sur les sols ferrallitiques les plus désaturés.

Cependant, à la différence d'un écosystème forestier naturel sans aucune sortie d'éléments nutritifs du système quand il n'est pas exploité, un écosystème cultivé sous SCV subit des pertes d'éléments nutritifs par exportation des productions. La gestion de la fertilité passe donc par un retour au système (sol + phytomasse) des éléments exportés, sous forme organique (fumier, compost) ou minérale (engrais chimiques).

Principes et fonctionnement du semis direct

3.4. Alimentation des plantes (en éléments nutritifs)

Alimentation irrégulière et déséquilibrée dans les systèmes conventionnels

La nutrition des plantes

Le carbone (42 à 50%), l'hydrogène (6%) et l'oxygène (42 à 44%), issus de la photosynthèse à partir du gaz carbonique et de l'eau, représentent en moyenne plus de 95% de la matière sèche d'une plante. L'azote représente 1 à 2% de cette matière sèche, et provient directement ou indirectement de l'air, fixé par voie biologique (bactéries) ou chimique (engrais azotés). Mis à part une partie du soufre (0,4% des plantes) qui provient également de l'air (SO₂), tous les éléments minéraux des plantes proviennent du sol. Avec C, O, H, N et S, le potassium (2 à 2,5%), le calcium (1 à 1,5%), le phosphore (0,4%) et le magnésium (0,4%), c'est à dire les macro-éléments majeurs, constituent plus de 99% de la matière sèche des plantes. Les autres macro-éléments (Cl, Na, Si) et les oligo-éléments (B, Cu, Mn, Fe, Mo, Co, etc.) représentent moins de 1% de la matière sèche totale.

Tous ces éléments minéraux (cations ou anions) sont absorbés dans la solution du sol par les racines. Ils sont solubles, et donc assimilables par les plantes, sous leur forme oxydée (cas de N, P, S, Ca, Mg et Se), ou chélatée (pour les autres).

En agriculture conventionnelle, la nutrition des plantes est très dépendante des apports extérieurs d'éléments fertilisants. Des apports au sol sous forme organique (fumier, lisier, compostage) permettent de limiter les pertes de matière organique du système et apportent les éléments nutritifs aux plantes de manière relativement régulière. Ils sont cependant souvent difficiles à gérer (disponibilité, difficultés de transport et d'épandage, etc.). Quand, comme très souvent en agriculture conventionnelle, ces apports se font sous forme essentiellement d'engrais minéraux (plus faciles à manipuler), la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes est très irrégulière. On observe un pic après les applications (ce qui entraîne des pertes par lixiviation et ruissellement) puis des manques par la suite. L'équilibre de cette alimentation des plantes est également dépendant des apports et est difficile à atteindre.

Alimentation régulière et équilibrée dans les écosystèmes cultivés en SCV

La gestion des systèmes en SCV permet d'accroître rapidement la fertilité du sol, et en particulier la quantité d'éléments nutritifs disponibles pour les cultures. Ils permettent d'améliorer leur alimentation de manière générale.

Ces systèmes permettent en particulier une alimentation régulière et équilibrée des plantes grâce à une décomposition et une minéralisation progressives de la biomasse, obtenues par :

- une régularité des apports de phytomasse ;
- une diversité de la qualité des apports, avec des vitesses de minéralisation différenciées des plantes utilisées pour constituer les couvertures végétales. Une couverture végétale à base de légumineuses se minéralise rapidement (en particulier leurs feuilles très riches en azote) et restitue au sol les éléments nutritifs qui peuvent être directement utilisés par les cultures suivantes dès le début de leur cycle. A l'inverse, les graminées au ratio C/N et à la teneur en lignine et polyphénols élevés, en particulier celles à grosses tiges (sorgho, maïs, mil) se décomposent lentement et libèrent les éléments nutritifs plus tard, permettant l'alimentation des cultures suivantes plusieurs mois après leur apport à la litière ;
- la non perturbation du sol qui permet de maintenir une protection des couches supérieures de la litière, alors que les couches en contact avec le sol sont minéralisées.

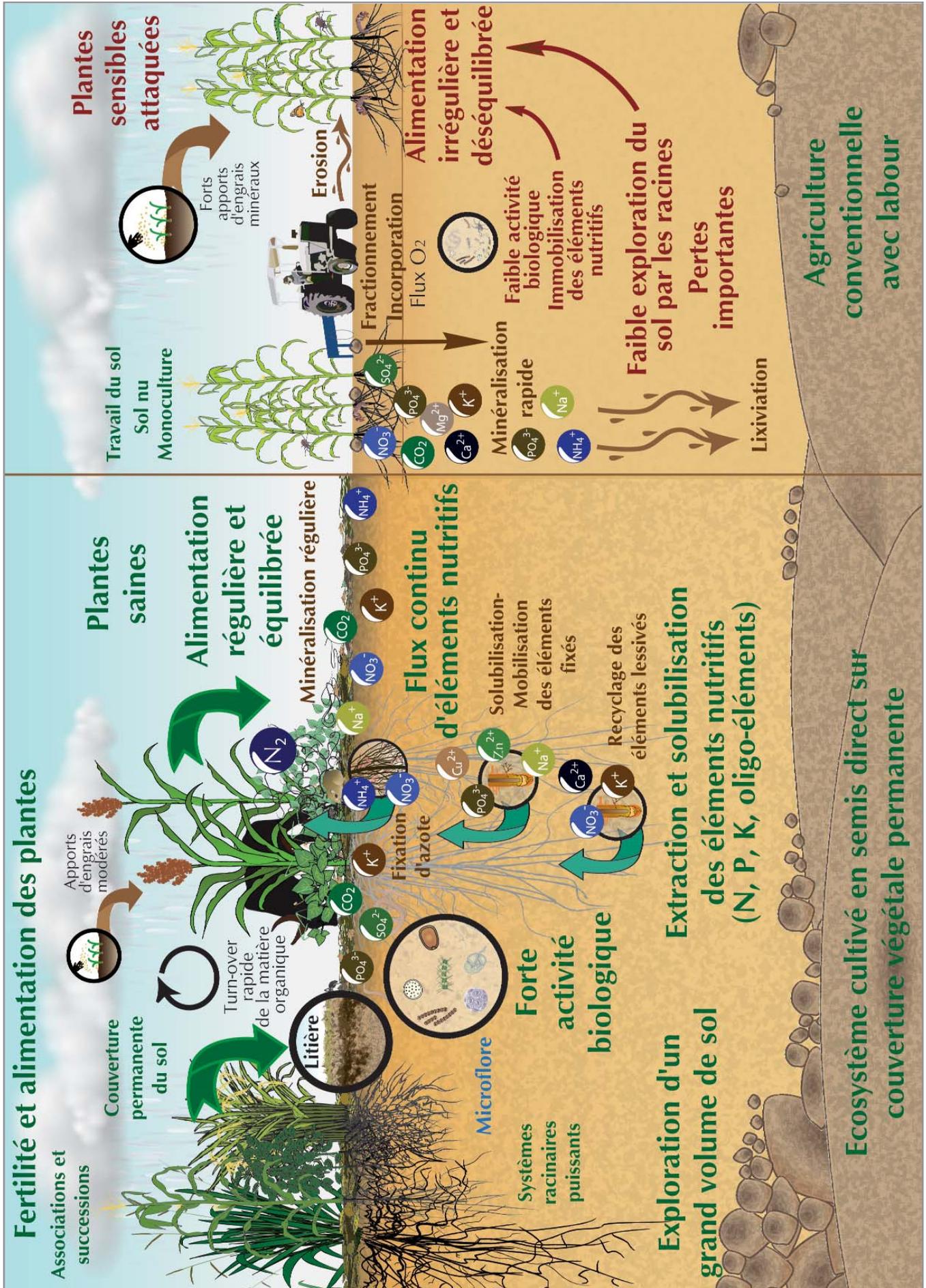
Au delà de son rôle fondamental dans les processus de minéralisation de la matière organique, qui permet une alimentation régulière des plantes, la microflore (et en particulier les bactéries, les mycorhizes et les trichodermes) augmente la quantité d'éléments nutritifs accessibles aux plantes (très forte augmentation de la surface d'échanges comme dans les associations symbiotiques avec les mycorhizes, solubilisation par les bactéries, etc.).

3.5. Bilan hydrique (et alimentation des plantes en eau)

Faible efficacité de l'utilisation de l'eau par les systèmes conventionnels

Les pratiques conventionnelles, avec labour et sol nu, engendrent un ruissellement important, une faible infiltration de l'eau (due à la perte rapide de la macroporosité reconstituée par le labour) et une forte évaporation (liée à la forte température du sol en surface). La faible microporosité n'est pas propice à un bon stockage de l'eau dans le sol, ce qui fait que la réserve en eau est faible. De plus, la création fréquente d'une semelle de labour sous travail répété

Principes et fonctionnement du semis direct



Principes et fonctionnement du semis direct

du sol constitue un frein à l'enracinement en profondeur des plantes. Le volume de sol exploré par les racines est faible et en conséquence la réserve utile en eau est très faible.

Dans de telles conditions, l'alimentation hydrique des plantes dépend très fortement de la régularité des apports en eau. En culture pluviale sans accès à l'irrigation, la croissance des plantes est rapidement limitée après quelques jours sans pluies, en particulier durant les stades sensibles des cultures comme la floraison.

Optimisation de l'utilisation de l'eau par les systèmes SCV

Dans les systèmes SCV, la couverture végétale permet de réduire fortement le ruissellement et laisse plus de temps à l'eau pour s'infiltrer. De plus, l'infiltration est rapide du fait de la bonne macroporosité créée et entretenue par la pratique du semis direct. Cette infiltration rapide permet d'éviter l'engorgement en cas de précipitations abondantes (effet "chasse d'eau").

La microporosité également créée et entretenue par les pratiques SCV offre au sol une forte capacité de stockage (ce qui limite le lessivage malgré la forte infiltration). Une forte infiltration et une capacité de stockage élevée conduisent à la constitution d'une réserve en eau importante. Cette réserve en eau est facilement accessible pour les plantes qui développent en SCV des systèmes racinaires profonds dans un sol bien structuré. La réserve utile en eau est en conséquence très importante.



Forte production sur sol sableux en milieu semi-aride

Outre la réduction des pertes par ruissellement, le semis direct permet de réduire les pertes en eau par :

- réduction de l'évaporation, par la couverture végétale ;
- réduction des pertes par lessivage, du fait de l'utilisation de l'eau profonde par les systèmes racinaires profonds, en particulier durant les périodes sèches (remontées capillaires) ;

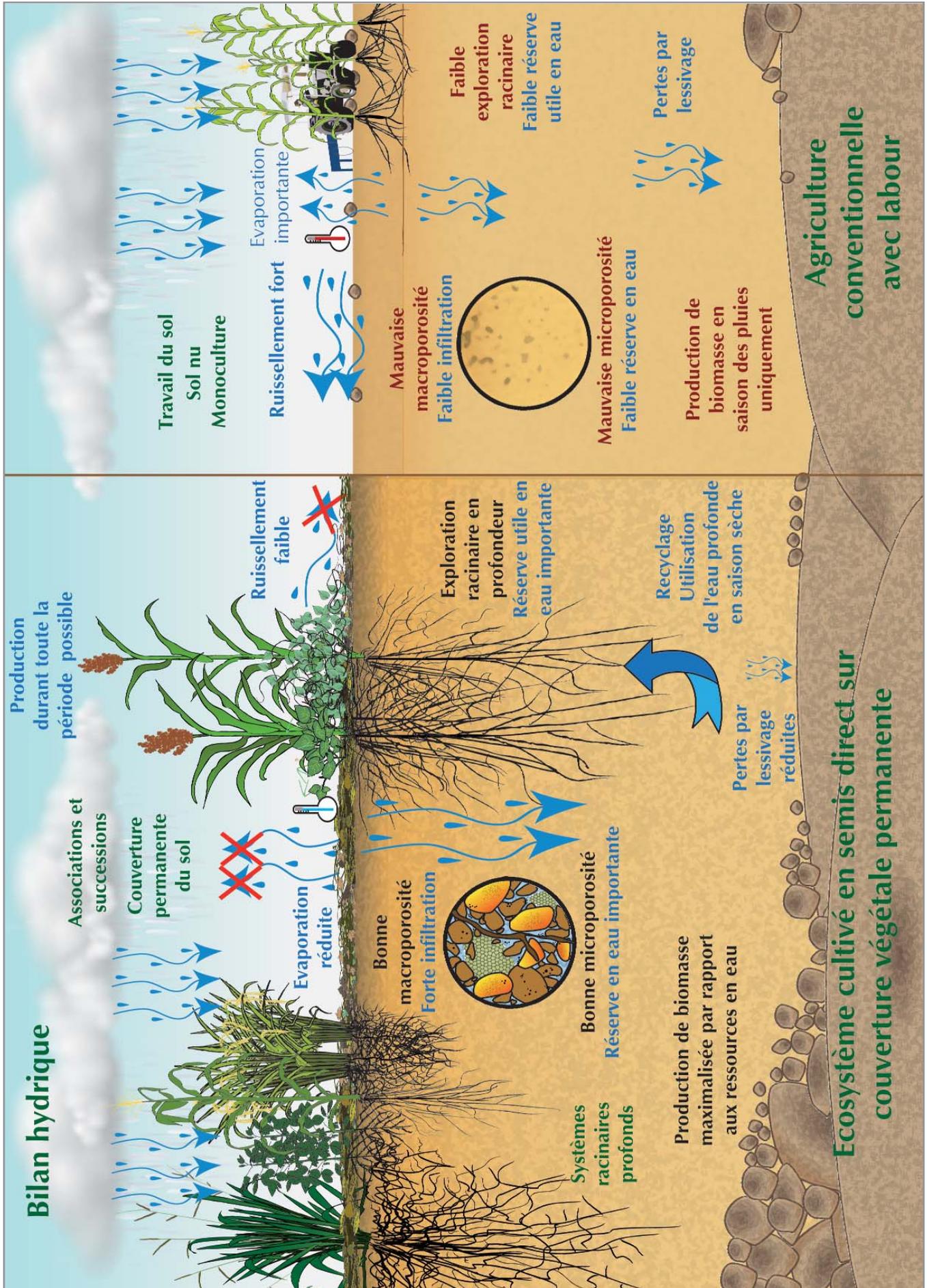
Les aléas climatiques sont ainsi tamponnés : pertes réduites, réserves importantes utilisées en cas de période de sécheresse et infiltration rapide durant les périodes fortement arrosées. De plus, le semis direct permet de semer les cultures dès les premières pluies utiles et ainsi de caler le cycle des cultures sur la période climatique la plus favorable (ce qui est particulièrement intéressant dans les climats à longue saison sèche).

Enfin, la condensation de la rosée est beaucoup plus importante sur une couverture végétale (surfaces d'interception plus importantes) que sur un sol nu. Ces "précipitations occultes" peuvent contribuer largement à l'alimentation en eau des plantes dans des milieux à faible pluviométrie mais forte humidité de l'air (bords de mer par exemple).

En conséquence, les plantes ont une alimentation en eau plus régulière, sans excès important ou sécheresse prolongée, et la période permettant une bonne alimentation hydrique des plantes est étendue. Des cultures deviennent possibles en semis direct dans des zones agro-écologiques où elles ne pourraient pas se développer avec des techniques conventionnelles.

Au delà d'une meilleure alimentation hydrique des cultures, une bonne gestion des systèmes SCV doit permettre d'optimiser la production de biomasse (indispensable au bon fonctionnement des SCV) par rapport à la quantité d'eau disponible au niveau d'une parcelle (qu'elle soit issue des précipitations ou de l'irrigation). L'eau stockée dans un sol bien structuré est donc utilisée autant que possible par des plantes pour produire en périodes "marginales" (pluies aléatoires, difficilement utilisables par les cultures) comme en saison sèche (grâce à leur système racinaire profond et l'utilisation des remontées capillaires) une forte biomasse qui alimente la litière et améliore le fonctionnement du sol et des systèmes conduits en SCV. Cette production de biomasse en saison sèche permet d'augmenter fortement la production totale et est d'autant plus intéressante qu'elle se fait à une période de faible minéralisation, avec un différentiel "production - pertes" très positif, et qu'elle permet une très bonne couverture du sol pour la culture suivante, bien qu'elle se fasse juste après une longue saison sèche.

Principes et fonctionnement du semis direct



Principes et fonctionnement du semis direct

3.6 Santé des plantes

Santé des plantes en agriculture conventionnelle

La quasi totalité des pratiques en agriculture conventionnelle, avec une vision à court terme, conduisent rapidement à un affaiblissement des plantes et à l'augmentation de leur sensibilité aux attaques d'insectes et de maladies.

La faible activité biologique, liée en particulier à la perturbation du sol, à la baisse du taux de matière organique et à l'utilisation de pesticides, et la faible restitution au sol de matière organique conduisent à :

La théorie de la trophobie

Dans sa théorie de la trophobie, Chaboussou (1985) explique que la sensibilité des plantes aux insectes et maladies (champignons, bactéries et virus) est avant tout le fait d'un déséquilibre nutritionnel. Un mauvais fonctionnement de la synthèse des protéines conduit à l'accumulation, dans les tissus des plantes, d'acides aminés libres (en particulier asparagine), de sucres réducteurs et d'azote minéral. Ces éléments solubles sont la base de l'alimentation des insectes, champignons, bactéries et virus qui, quand ils les ont à leur disposition, se développent mieux et plus rapidement. A forte concentration, ces éléments solubles rendent les plantes sensibles aux attaques, alors que les bioagresseurs se développent peu sur des plantes qui ne contiennent que très peu de ces éléments fondamentaux pour leur alimentation.

Un tel déséquilibre physiologique de la plante, avec dominance de la protéolyse sur la protéosynthèse est fonction de son stade physiologique mais est surtout lié à :

- l'agression de la plante par des pesticides: insecticides, fongicides et surtout herbicides qui perturbent la protéosynthèse des plantes (leur sélectivité n'étant jamais absolue);
- une fertilisation minérale déséquilibrée, en particulier lors des apports d'azote et en cas de manque de potasse;
- des carences en oligo-éléments (Mn, Cl, B qui sont des activateurs d'enzymes et Cu, Fe, Zn et Mo qui sont des composants des enzymes);
- des stress hydriques (inondation, sécheresse).

- une alimentation irrégulière et déséquilibrée des plantes (avec en particulier des carences en oligo-éléments);
- des défenses naturelles amoindries (pas de production d'antibiotiques naturels et d'éliciteurs par la microflore).

Ces déséquilibres nutritionnels (aggravés lors des apports d'engrais minéraux, en particulier l'azote), mais aussi l'utilisation d'herbicides pour contrôler les adventices (d'autant plus nécessaire que les cultures se développent lentement), conduisent à un mauvais fonctionnement physiologique des plantes. Les processus de formation des protéines en particulier sont perturbés, ce qui conduit à l'accumulation d'acides aminés libres, de sucres réducteurs et d'azote minéral dans les tissus. Ces éléments sont le substrat privilégié pour divers bioagresseurs qui trouvent alors dans ces plantes déjà affaiblies des conditions très favorables à leur développement. Le déséquilibre nutritionnel des plantes favorise en conséquence la pullulation d'insectes et les épidémies. Dans ces conditions de fortes attaques des plantes, le recours à l'utilisation de pesticides pour essayer de réduire le nombre d'agresseurs est la "réponse" technique la plus simple (bien que coûteuse et possiblement polluante) en agriculture conventionnelle.

Ces "solutions" chimiques ont une certaine efficacité à court terme (ce qui a permis leur développement rapide malgré leur coût important), mais présentent de très nombreux inconvénients à moyen terme, dont :

- les risques de pollution;
- la rupture des équilibres écologiques au sein du système, par la destruction des prédateurs des insectes nuisibles;
- la destruction de la vie du sol, conduisant à une moindre disponibilité des éléments nutritifs et, en conséquence, entraînant des déséquilibres nutritionnels et privant les plantes de la protection par la microflore (trichodermes, etc.);
- la perturbation de la protéosynthèse des plantes par les pesticides.

En conséquence, la sensibilité des plantes est accrue et le développement des bioagresseurs est favorisé. A moyen terme, la "solution" chimique ne fait donc qu'accroître les problèmes, ce qui explique les difficultés de l'agriculture conventionnelle à obtenir des cultures saines.

Principes et fonctionnement du semis direct

Santé des plantes en semis direct sur couverture végétale permanente

La santé des plantes cultivées dans des systèmes SCV est assurée de manière intégrée par :

- une alimentation (en eau et éléments nutritifs) équilibrée et régulière. La forte réserve utile en eau, le stockage des éléments nutritifs sous forme organique, la minéralisation régulière, la mobilisation d'éléments fixés dans le sol, la solubilisation de ces éléments nutritifs (action des micro-organismes, pH et potentiel redox du sol favorables) font que les plantes ont à leur disposition l'eau et les éléments nutritifs, y compris les oligo-éléments, qu'elles peuvent puiser facilement dans le sol tout au long de leur cycle. Des plantes bien nourries (alimentation régulière et équilibrée, en quantité suffisante) ont un bon fonctionnement physiologique, sont très saines et peu attaquées par les bioagresseurs. Le riz par exemple est remarquablement sain après stylosanthes et il est très peu touché par la pyriculariose après une association eleusine + crotalaire ;
- la production par les micro-organismes (bactéries et champignons du sol) de toute une série de substances : antibiotiques (production de *Pseudomonas sp.* contre *Fusarium sp.*, pourriture des racines, etc.), hormones de croissance, éliciteurs (qui renforcent les défenses immunitaires naturelles contre *Xanthomonas campestris*, *Pseudomonas syringae*, *Colletotrichum lindemuthianum*, etc.). L'incidence des maladies fongiques comme la fusariose, les pourritures des racines (*Rhizoctonia sp.*) les fontes de semis (*Pythium sp.*) est fortement réduite dans des sols avec amendements organiques dans lesquels se développe une forte activité microbienne, comme en semis direct sur couverture végétale permanente ;
- la colonisation par les microbes (bactéries et champignons) et les nématodes qui détruisent les propagules des pathogènes (spores de *Cochliobolus sp.* par exemple) ;
- la création de conditions peu favorables au développement de bactéries pathogènes (milieu bien aéré en particulier) et la suppression de la transmission des bactéries pathogènes du sol aux feuilles par effet "splash" (effet des gouttes d'eau qui frappent le sol et projettent des fragments de sol contaminé sous les feuilles) ;
- la protection des plantes contre les nématodes phytoparasites par les mycorhizes ;
- l'utilisation de mélanges d'espèces (cultures associées) et/ou de variétés : les variétés/espèces résistantes sont moins touchées et permettent de limiter la transmission des maladies aux variétés moins résistantes (mais employées pour leur fort potentiel de production) ;
- l'utilisation raisonnée des herbicides (et autant que possible la non utilisation de ces produits), de manière à perturber le moins possible la physiologie des plantes (application avant les cultures, sur une couverture végétale épaisse, à faible dose, etc.).

Les traitements fongicides sont réduits autant que possible du fait de leur effet très néfaste sur la microflore du sol (qui à l'inverse a un effet très positif sur l'alimentation et la santé des plantes). Ils se limitent au traitement de semences (en particulier pour les légumineuses) quand nécessaire. Un traitement en végétation se réalise à faible dose, uniquement quand il est absolument indispensable, ce qui peut être le cas les premières années, avant que l'ensemble des effets bénéfiques des SCV se fasse sentir.

L'utilisation de produits biologiques pour renforcer les défenses naturelles des plantes (éliciteurs) est également possible.

Outre l'alimentation équilibrée des cultures qui réduit fortement la sensibilité des plantes, le contrôle des bioagresseurs, en particulier des insectes ravageurs se fait selon les principes de lutte intégrée par :

- reconstitution d'un équilibre écologique avec les prédateurs naturels des insectes nuisibles ;



Libellule mangeant un cercopide

Principes et fonctionnement du semis direct

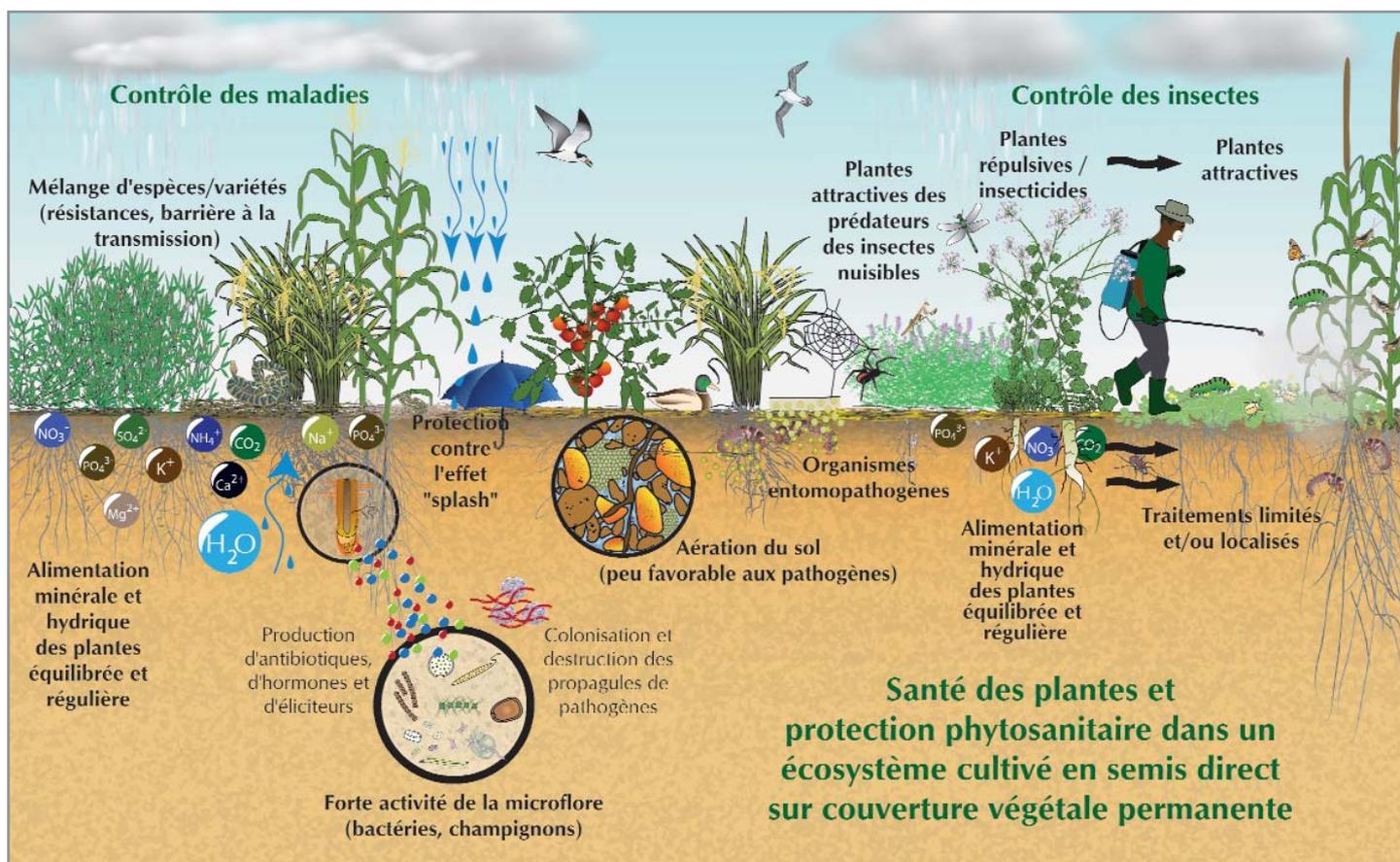


Chenille attaquée par un champignon entomopathogène

- l'inoculation avec des organismes entomopathogènes (champignons comme *Metharizium spp.* ou *Beauveria spp.*; bactéries comme *Bacillus thuringiensis*; nématodes comme *Steinernematidae sp.*), qui sont placés dans des conditions très favorables à leur développement; et/ou
- l'utilisation de plantes produisant des substances insecticides ou répulsives. La vesce velue et le radis fourrager, par exemple, sont utilisés à Madagascar pour réduire la pression des *Heteronychus sp.* et le genre *Desmodium* est connu pour repousser les borers. A l'inverse, des plantes attractives de certains insectes (comme l'*Arachis pintoï* qui attire les punaises, le mil pour les criquets ou le genre *Pennisetum* pour les borers) sont utilisées pour "détourner" les prédateurs des cultures (approche "Push-Pull"). Un insecticide est appliqué localement sur ces plantes attractives quand la pression des insectes y est forte.

Ces principes de lutte intégrée, qui ne sont pas propres aux systèmes SCV, trouvent par contre dans ces systèmes des conditions qui facilitent leur application (plants mieux alimentés et donc moins sensibles, reconstruction des équilibres écologiques favorisée par la faible perturbation, biodiversité, etc.) ou en accroissent les effets bénéfiques (conditions très favorables au développement des organismes inoculés, etc.). A l'inverse, les systèmes conventionnels en compliquent la mise en œuvre et en limitent l'efficacité.

Si la pression des bioagresseurs est très forte (en particulier les premières années le temps que l'amélioration des sols permette une alimentation équilibrée des plantes et qu'un équilibre écologique se soit restauré), l'utilisation de pesticides peut être nécessaire pour conduire certaines cultures. Il est cependant préférable pendant ces premières années d'éviter de cultiver des plantes particulièrement sensibles aux bioagresseurs présents, ce qui permet de limiter l'emploi de pesticides. Cela favorise le retour rapide d'un équilibre écologique et évite de déséquilibrer les processus de protéosynthèse et d'accroître la sensibilité des plantes.



Principes et fonctionnement du semis direct

3.7. Contrôle des adventices

Contrôle des adventices en agriculture conventionnelle

Le contrôle des adventices en agriculture conventionnelle repose sur le travail du sol et l'utilisation d'herbicides sélectifs des cultures (quand ils sont accessibles). Cette approche permet un bon contrôle des principales adventices tant que celles-ci n'ont pas développé de résistance aux herbicides employés. L'agriculture conventionnelle "s'adapte" à ces résistances par la mise au point, par l'industrie chimique, de matières actives de plus en plus performantes, mais aussi de plus en plus coûteuses et souvent polluantes.

En l'absence de ces herbicides (souvent inaccessibles, ou à des coûts prohibitifs en petite agriculture familiale dans les pays du Sud), le sarclage manuel des parcelles est souvent la seule pratique abordable. Il engendre cependant des temps de travaux considérables. Le contrôle des adventices est difficile à réaliser à temps, ce qui fait que l'enherbement est très souvent un des premiers facteurs limitant la production dans ces conditions.

Contrôle des adventices en SCV

En SCV, la fonction de contrôle des adventices est assurée en priorité par l'insertion dans les systèmes de culture de plantes (cultures ou plantes de couverture) capables de dominer naturellement la plupart des adventices, qui produisent une forte biomasse (alimentant ainsi la couverture végétale) et qui sont facilement maîtrisables. Cette domination des adventices se fait par compétition pour la lumière (ombrage), compétition pour les éléments nutritifs et/ou effets allélopathiques (production de substances interférant avec la germination et/ou la croissance des plantes, véritables herbicides naturels). Ces substances sont libérées par les plantes vivantes (exsudats racinaires en particulier) ou lors de leur décomposition. Des plantes comme l'avoine ou le sarrasin sont particulièrement efficaces pour "nettoyer" les parcelles infestées grâce à leurs très forts effets allélopathiques. Les couvertures à base d'espèces du genre *Sorghum* permettent de contrôler la peste végétale qu'est le *Cyperus rotundus* (capable de se développer à travers de nombreux paillages). Une plante comme le *Stylosanthes guianensis* contrôle parfaitement le striga grâce à son épais paillage et ses effets sur la germination des graines (il déclenche la germination mais n'est pas parasité par le striga, dont la plantule meurt rapidement faute d'hôte). Ces plantes qui contrôlent naturellement les adventices permettent de réduire progressivement leur stock semencier dans le sol et font baisser leur pression sur les cultures suivantes.

Le contrôle de ces plantes peut se faire mécaniquement (fauche, roulage, décapage manuel) ou chimiquement (par utilisation d'herbicide total ou sélectif) en fonction de leurs caractéristiques (cf. Volume II. Chapitre 2.). Les plantes annuelles (avoine, vesce, mucuna, etc.) sont en général facilement contrôlées par simple fauche ou roulage, ou encore avec des herbicides à faibles doses. Les plantes vivaces (*Brachiaria spp*, *Cynodon dactylon*, Kikuyu grass, etc.) demandent des doses d'herbicide plus élevées et sont de manière générale plus difficiles à contrôler mécaniquement, à l'exception du *Stylosanthes guianensis* qui bien que pérenne peut se contrôler facilement par simple fauche au ras du sol. Certaines plantes peuvent aussi être contrôlées par apport d'urée (cas du trèfle par exemple), submersion (dans les rizières) ou naturellement par le gel (climat tempéré ou sub-tropical d'altitude).

Ce contrôle peut être total dans le cas des couvertures mortes, ou temporaire/localisé pour les couvertures vives qui ne sont maîtrisées que le temps de la culture et/ou sur les lignes de culture, et qui recolonisent la parcelle après la récolte.

Le type de plantes à incorporer dans les successions/associations de cultures dépend donc de la flore adventice, des cultures à mettre en place (certaines plantes peuvent avoir des effets allélopathiques sur certaines cultures) et des moyens disponibles pour contrôler les plantes de couverture.



Contrôle des adventices par la couverture végétale
Riz après *stylosanthes*

Principes et fonctionnement du semis direct

Les herbicides en SCV

Dans des systèmes SCV installés, avec forte production de biomasse, l'utilisation des herbicides est limitée au nettoyage des parcelles (si nécessaire) avant semis et/ou au contrôle des couvertures végétales pour celles qui ne peuvent pas être contrôlées mécaniquement. Dans ce cas, le contrôle se fait par utilisation d'herbicides totaux, appliqués avant les cultures, en général à faible dose, sur un sol couvert par une forte biomasse, ce qui réduit leur impact sur les cultures et les risques de pollution. L'utilisation d'herbicides "sélectifs" des cultures est limitée autant que possible, d'autant plus que l'efficacité des herbicides de pré-levée est faible sur un paillage, avec un sol riche en matière organique. Un herbicide de post-levée peut éventuellement être utilisé (si il est disponible) en cas "d'accident", quand la couverture, insuffisante, a mal contrôlé les adventices.

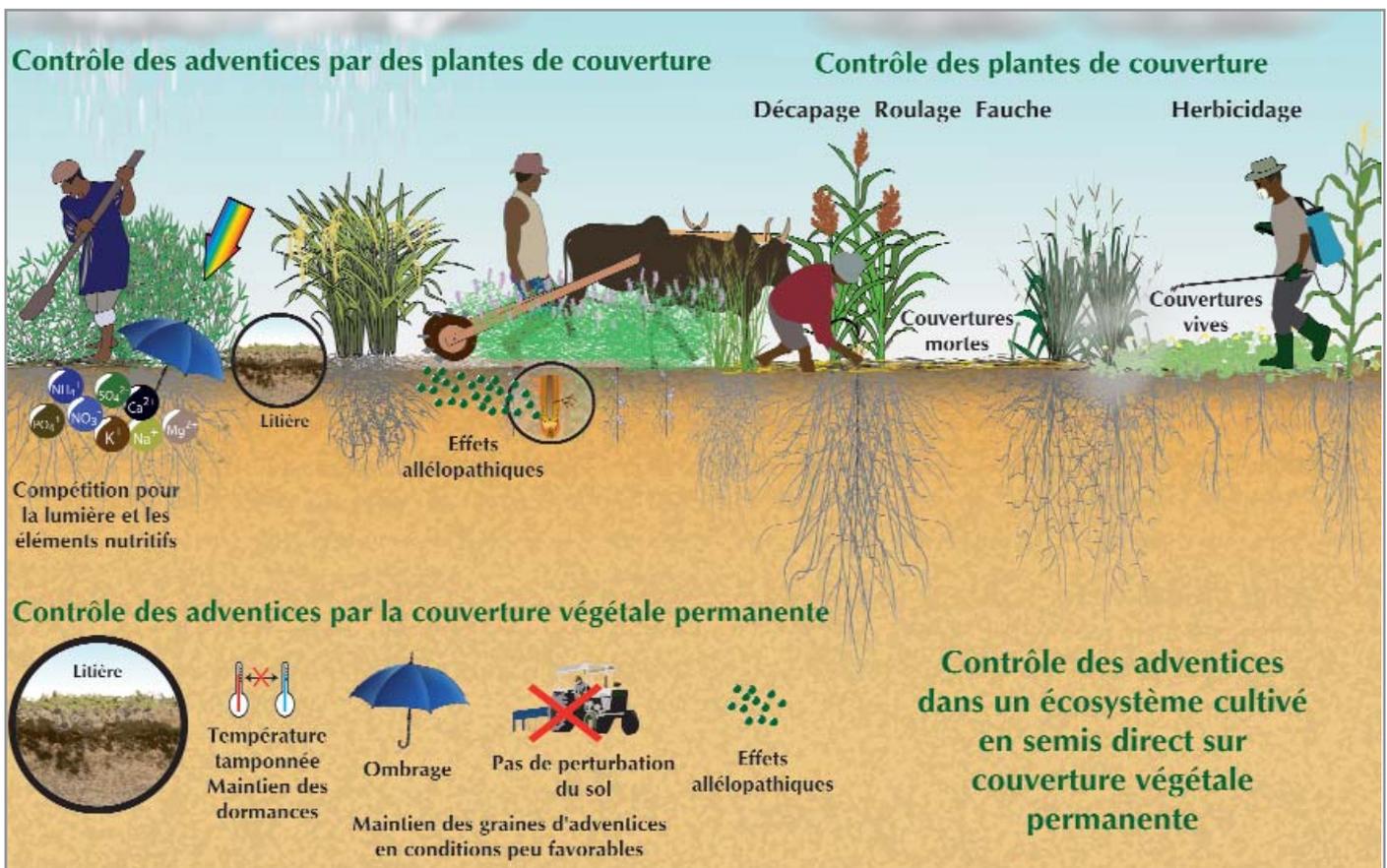
Durant la ou les premières années de préparation des systèmes SCV, avant qu'une biomasse suffisante pour contrôler les adventices soit obtenue, l'utilisation d'herbicides est souvent nécessaire. On cherche cependant à la limiter autant que possible, en cultivant en premier des plantes relativement faciles à nettoyer (comme le maïs) que l'on associe à des plantes de couverture qui contrôlent rapidement les adventices.

Dans la culture suivante, la couverture végétale du sol (morte ou vivante, obtenue à partir des résidus de récolte et/ou de plantes de couverture) joue un rôle d'ombrage et peut avoir un effet allélopathique. Suffisamment épaisse, elle empêche la levée de la plupart des adventices.

De plus, l'absence de perturbation du sol permet d'éviter de replacer en conditions favorables de germination les graines d'adventices présentes dans les sols (d'où l'importance de bien maîtriser le semis pour éviter de "polluer" la parcelle en remontant en surface du sol contenant des graines d'adventices). Dans de telles conditions, seules les graines issues de la fructification dans la parcelle des plantes qui n'auraient pas été contrôlées à temps et celles transportées par le vent et les animaux (principales sources d'infestation en SCV) sont à même de germer.

Le contrôle des adventices en SCV passe donc avant tout par la couverture végétale. L'année "zéro" de préparation des SCV doit permettre de contrôler totalement les adventices vivaces et de constituer la couverture végétale épaisse qui assurera le contrôle des adventices annuelles par la suite. Durant cette année de préparation des SCV, le contrôle des adventices est assuré "classique-

ment" par labour et utilisation d'herbicides sélectifs des cultures, auxquels s'ajoute la mise en place de plantes associées qui vont contribuer à réduire la pression des adventices et à produire



Principes et fonctionnement du semis direct

la couverture végétale pour la saison suivante. Le contrôle des adventices, les années suivantes, dépend avant tout de la quantité et de la qualité de la biomasse produite et maintenue au sol, et du stock de graines d'adventices. Le contrôle des adventices éventuellement levées à travers la couverture (insuffisante) exige soit des herbicides sélectifs (parfois difficiles à trouver, surtout dans des systèmes associant plusieurs plantes aux caractéristiques différentes), soit le passage d'un herbicide total de manière localisée (avec un cache ou un balai-herbicide), soit enfin l'arrachage manuel (long à réaliser). Le recours au binage est déconseillé, le travail du sol, même superficiel, modifiant la dynamique de la matière organique, accélérant la décomposition de la couverture et remontant les graines d'adventices en position favorable à leur germination.

3.8. Température du sol

Température du sol en agriculture conventionnelle

En agriculture conventionnelle, le sol nu est exposé aux radiations du soleil (dont les UV très nuisibles aux micro-organismes). Cette exposition permet un réchauffement rapide du sol (intéressant au printemps dans les milieux tempérés), mais conduit à une très forte amplitude thermique et à des températures extrêmes (en particulier en milieu tropical), peu favorables au développement d'organismes vivants.

Température du sol en SCV

Dans les systèmes SCV, la couverture végétale joue le rôle de couverture thermique. Elle protège le sol du rayonnement solaire et limite les pertes de chaleur par rayonnement pendant la nuit. La température du sol sous une couverture végétale est donc tamponnée, et l'amplitude thermique y est limitée.

En milieu tropical, les températures extrêmes sont ainsi évitées, créant des conditions favorables au développement de l'activité biologique, concentrée dans les premiers centimètres du sol. En milieu tempéré, cette couverture peut en revanche ralentir le réchauffement du sol au printemps et entraîner un retard à la levée et une faible activité biologique. Il est cependant possible de "jouer" sur l'albédo de la couverture : à l'inverse d'une couverture claire qui renvoie une partie importante du rayonnement, une couverture sombre permet de conserver l'énergie et accélère le réchauffement du sol. On peut également découvrir seulement la ligne de semis (roues-étoiles sur semoirs de semis direct, situées à l'avant des disques ouvreurs) pour que le sol se réchauffe plus rapidement. De plus, sur les sols engorgés, un meilleur drainage interne, obtenu par les pratiques SCV, fait que la quantité d'eau du sol à réchauffer est moindre qu'en pratique conventionnelle. Le réchauffement du sol demande une plus faible énergie et se fait plus rapidement.

3.9. Transformation des xénobiotiques

Pollution par les systèmes conventionnels

Dans les systèmes conventionnels, les herbicides et pesticides appliqués (parfois en très forte quantité) arrivent sur un sol nu. Ils peuvent être rapidement fixés par les colloïdes du sol et/ou entraînés par ruissellement, lixiviation et/ou érosion, polluant les sols, la nappe phréatique et/ou les cours d'eau voisins.

Détoxification par les systèmes SCV

A l'inverse, dans des systèmes en SCV, herbicides et pesticides sont interceptés par la couverture végétale qui limite aussi les transferts par ruissellement et lixiviation. Le fonctionnement de la litière et du sol sous SCV permet également la bioremédiation des xénobiotiques polluants, dégradés comme dans un bioréacteur sous l'effet des champignons (type basidiomycètes, pleurotes, *Aspergillus sp.*, etc.) et des bactéries, ou incorporés dans des composés organiques moins toxiques et peu mobiles. Les couverts à base de sorgho, sont très efficaces à remplir cette fonction de détoxification, en particulier par leur forte teneur en lignine qui fournit un substrat pour ces champignons décomposeurs de lignine. De plus, les mycorhizes jouent un rôle important dans la protection des plantes contre les métaux lourds.



Contrôle total des adventices par la couverture végétale vive
Maïs sur Arachis repens

Principes et fonctionnement du semis direct

3.10. Bilan

Le fonctionnement du sol en agriculture conventionnelle

L'agriculture conventionnelle repose sur le travail du sol qui a pour objectifs de le préparer pour la mise en place des cultures (lit de semence) et de réduire la pression des adventices.

L'introduction du travail du sol dans un écosystème pour le mettre en culture a cependant pour conséquence de modifier profondément la dynamique de la matière organique, fondamentale pour le bon fonctionnement de l'écosystème "sol". En accélérant la minéralisation, le travail du sol augmente les besoins en biomasse pour maintenir le niveau de matière organique alors qu'en parallèle, la production de phytomasse est limitée par le manque de diversité des cultures et leur faible intensité (monoculture, peu d'associations ou de successions). En conséquence, le travail du sol en agriculture conventionnelle conduit à une perte de matière organique du sol, d'autant plus que le sol mis à nu est exposé à l'érosion. Cette perte de matière organique s'accompagne d'une baisse de l'activité biologique (par

diminution du substrat organique mais aussi par perturbation et mise à nu du sol), qui entraînent en conséquence :

Impacts négatifs des pratiques conventionnelles sur l'activité biologique

Les pratiques conventionnelles ont de nombreux impacts négatifs sur les organismes du sol :

- le labour détruit une partie de la macrofaune et crée des conditions difficiles pour les micro-organismes : exposition aux rayonnements UV du soleil et forte température en surface, mauvaise aération en profondeur, faible humidité du fait d'une mauvaise porosité, etc. ;
- la perte de matière organique liée au labour et l'exportation des pailles (fréquente en système conventionnel), équivaut à une baisse des ressources nutritives pour les micro-organismes ;
- certains engrais chimiques sont néfastes aux micro-organismes (chlorures, sulfates, etc.) ;
- herbicides et surtout insecticides et fongicides ont des effets très négatifs sur les organismes vivants du sol.

- le lessivage des argiles, la lixiviation des bases et des éléments nutritifs et une baisse globale de la fertilité ;
- la déstructuration des sols, qui amplifie la baisse de l'activité biologique (perte d'habitats) et conduit à un enracinement superficiel et une mauvaise utilisation de l'eau et des éléments nutritifs par les plantes ;
- la dégradation de la santé des plantes, du fait :
 - d'une mauvaise nutrition, irrégulière et déséquilibrée ;
 - de la destruction de la microflore (bactéries, mycorhizes, trichodermes, etc.), qui ne remplit plus son rôle de "digestion" des éléments nutritifs et ne fournit plus aux plantes les éliciteurs et antibiotiques qu'elle produit naturellement ; et
 - de déséquilibres écologiques, permettant la prolifération de nuisibles.

Pour pallier à ces nouvelles contraintes induites par le travail du sol, l'agriculture conventionnelle intensive s'est tournée vers :

- une intensification du travail du sol, pour compenser (à court terme) la déstructuration des sols, et
- une approche chimique, pour compenser la baisse de fertilité chimique du sol (apports d'éléments nutritifs sous forme d'engrais), contrôler les mauvaises herbes (utilisation d'herbicides toujours plus puissants) et protéger les cultures dont les défenses naturelles étaient affaiblies par leur mauvaise nutrition et la faible activité biologique du sol.

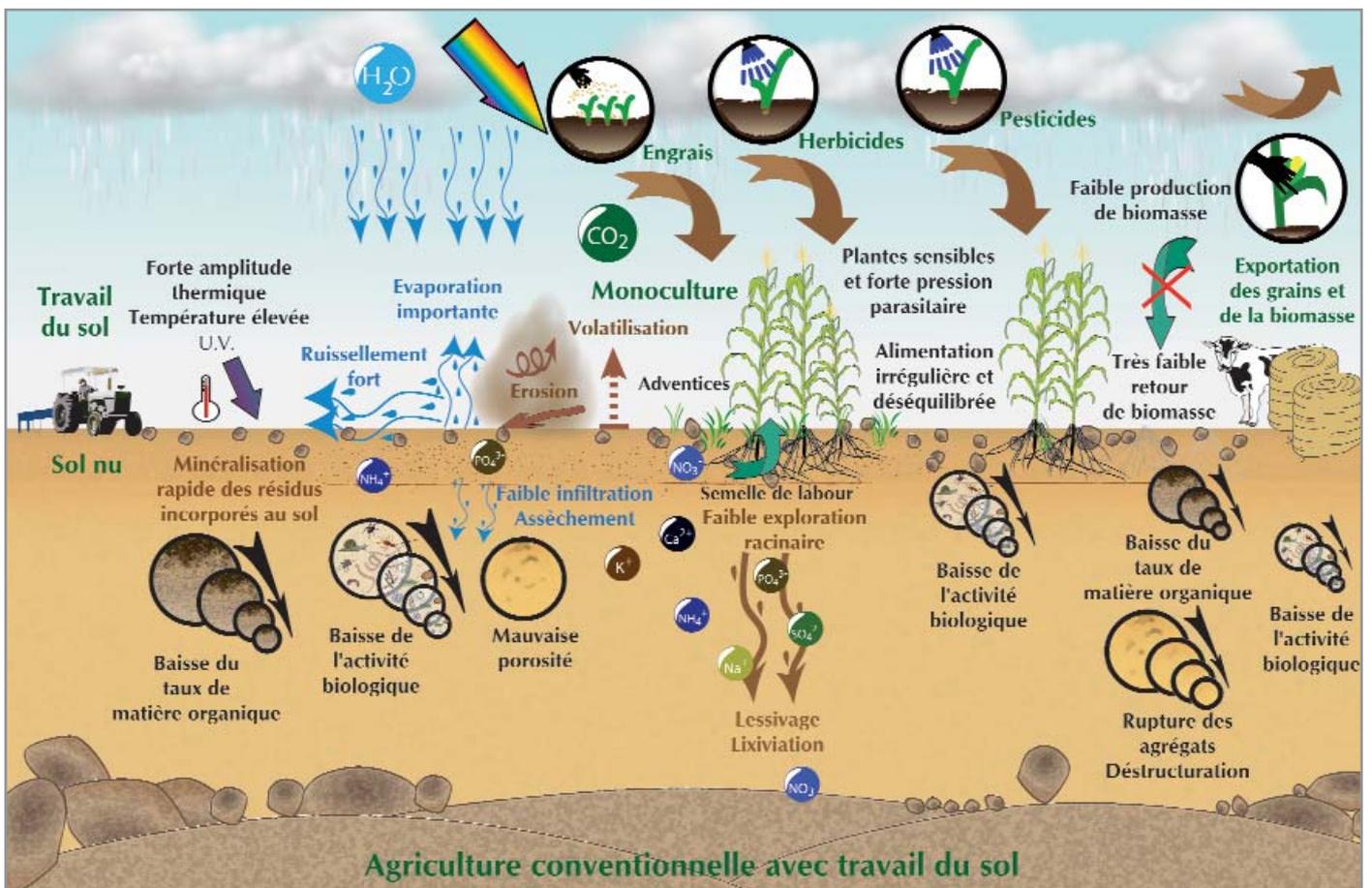
Une telle approche, développée dans les climats tempérés, a permis d'obtenir des résultats intéressants à court terme du fait essentiellement des caractéristiques de ces milieux : la minéralisation lente qui fait que les pertes de matière organique sont faibles, la bonne fertilité initiale des sols qui permet une production de biomasse relativement importante, l'intensité modérée des pluies et donc de l'érosion, l'accès aux intrants dans de bonnes conditions, etc. A moyen terme, la dégradation progressive des sols et l'évolution des marchés (baisse des prix de vente, augmentation des prix des intrants alors que leurs besoins augmentent) font que : i) la mise en oeuvre de pratiques sortant de la logique "chimique" (lutte intégrée, fertilisation raisonnée) est difficile ; ii) la tentation d'appliquer des doses croissantes, est forte ; et

Principes et fonctionnement du semis direct

iii) l'agriculture conventionnelle intensive ne peut exister que soutenue par des subventions (pourtant amenées à disparaître). Les problèmes environnementaux engendrés par l'utilisation massive de la chimie la remettent également en question (pollution des nappes et des rivières, perturbation de la faune, résidus dans les produits, santé des utilisateurs, etc.).

Transférées en milieu tropical, sous un climat très agressif (minéralisation très rapide, précipitations intenses) ces pratiques conventionnelles sont catastrophiques (en dehors des milieux très particuliers de rizières). Elles engendrent une érosion intense et une perte rapide de la matière organique du sol (d'autant plus rapide que les résidus de culture sont exportés ou brûlés), conduisant à une dégradation générale des sols. La perte de production qui s'en suit fait que les retours de biomasse au système pour maintenir la fertilité sont insuffisants. L'écosystème ainsi cultivé avec travail du sol entre dans un cercle vicieux de dégradation, qu'il est très difficile de quitter. Des apports de matière organique au sol (restitution de tous les résidus et apports d'engrais organiques) ne suffisent bien souvent qu'à ralentir la dégradation du sol engendrée par son travail, en particulier quand l'érosion est importante. L'option "chimique" de compensation des "dégâts", très coûteuse et difficilement accessible, n'est pas adaptée du tout aux milieux tropicaux, même pour une agriculture commerciale intensive. Elle ne permet pas de maintenir la fertilité du sol, est très polluante et très peu rentable à moyen terme.

Pour la grande majorité des petits agriculteurs sous les tropiques, cette "option chimique" n'est même pas accessible (connaissance, disponibilité et surtout coût des intrants). Les pratiques conventionnelles avec travail du sol conduisent alors, plus ou moins vite selon les conditions (climat, fertilité initiale du sol, pente, usage des feux, etc.), à une dégradation de ce qui est bien souvent leur unique capital : le sol. Cette dégradation du sol s'accompagne d'une baisse tendancielle des rendements, jusqu'à l'impossibilité de cultiver les cultures les plus exigeantes (on doit alors se tourner vers des cultures peu exigeantes, mais peu prisées, comme le manioc), et peuvent même conduire à l'obligation d'abandonner la terre. Ces pratiques avec travail du sol ne font qu'augmenter la précarité des petits agriculteurs, déjà en situation très délicate dans une économie mondialisée.



Principes et fonctionnement du semis direct

Une des “erreurs” majeures de l’agriculture conventionnelle, qui explique en partie sa “fuite en avant” vers une agriculture chimique (très profitable à l’agro-industrie), est d’avoir négligé l’importance de l’activité biologique des sols dans le fonctionnement d’un écosystème cultivé. Elle n’a ainsi considéré le sol que comme un support physique pour les plantes et un réservoir d’éléments nutritifs. En pensant que le maintien de bonnes caractéristiques physiques et chimiques du sol était suffisant pour assurer la production végétale, l’agriculture conventionnelle s’est privée des multiples fonctions et services écosystémiques rendus par la macrofaune et la microflore du sol, y compris ceux indispensables au maintien de ces caractéristiques physiques et chimiques (humification, agrégation, bioturbation, etc.). Un sol mort, sans activité biologique, ne peut que se dégrader (physiquement et chimiquement). La nutrition des plantes, privée de la fonction de “digestion” (solubilisation des éléments nutritifs) normalement remplie par les micro-organismes du sol, ne peut se faire que sous forme de “perfusion” par apport d’engrais minéraux solubles (pour les éléments que la chimie sait rendre solubles), ponctuels et très difficile à équilibrer.



Labour manuel (plus de 100 jours/ha)
Hautes terres malgaches

La méconnaissance de l’importance de l’activité biologique du sol a fait que les “solutions” techniques proposées par l’agriculture conventionnelle, supposées répondre aux nouvelles contraintes, ne s’adressaient qu’aux symptômes (mauvaise nutrition des plantes, maladies et insectes) sans “s’attaquer” aux causes des problèmes (dégradation biologique des sols, déséquilibres écologiques, etc.). Pire encore, les “solutions” apportées pour le “traitement” à court terme de ces symptômes (de maladies, de carences, etc.) conduisent très souvent à l’aggravation des causes en affaiblissant la microflore du sol (effets néfastes du travail du sol, des engrais, des herbicides, des insecticides et surtout des fongicides), en perturbant le fonctionnement des plantes (alimentation, protéosynthèse, etc.) et en détruisant les équilibres écologiques (effets des insecticides et du travail du sol).

De plus, du fait des contraintes économiques (adaptation aux marchés) mais surtout par volonté, consciente ou non, de simplification du métier d’agriculteur, d’agent de vulgarisation ou d’agronome, une composante fondamentale des systèmes de culture (la nature des cultures et leur ordre de succession/association) a progressivement perdu son rôle dans la gestion agronomique des parcelles et des exploitations. Les “solutions” proposées se limitent très souvent à des adaptations de l’itinéraire technique (variétés, pesticides, engrais, etc.) et négligent les possibilités de “piloter” les écosystèmes par les associations et successions de cultures, qui influencent fortement la matière organique et l’activité biologique du sol.

Le fonctionnement du sol dans les systèmes d’abattis-brûlis

Dans les systèmes traditionnels d’abattis-brûlis, la période sous jachère, si elle est assez longue, permet de regagner en partie la fertilité (physique, chimique et surtout biologique) des sols perdus rapidement pendant les périodes de cultures avec travail du sol (et brûlis), sur des pentes souvent fortes. Cependant, à partir d’une densité de population supérieure à 15 ou 20 hab/km², la pression foncière permet difficilement une jachère suffisamment longue pour régénérer convenablement les sols. Au delà de 40 hab/km², la pression sur la terre est telle que la régénération des sols est très limitée et ne permet plus de compenser les pertes. Les sols se dégradent, les rendements baissent et les cycles d’abattis-brûlis s’accroissent, aggravant dans un cercle vicieux la dégradation des sols et les baisses de rendement.

Le fonctionnement d’un écosystème cultivé en SCV : intensification écologique

A l’inverse de l’agriculture conventionnelle qui introduit une perturbation majeure dans l’écosystème (le travail du sol), le semis direct sur couverture végétale permanente s’inspire du fonctionnement d’un écosystème naturel, sans le perturber mais en l’intensifiant. Ainsi, la dynamique de la matière organique en SCV est proche de celle d’un écosystème naturel et les organismes vivants du sol y jouent un rôle fondamental. Globalement, l’utilisation massive

Principes et fonctionnement du semis direct

d'énergie culturelle industrielle de l'agriculture conventionnelle est remplacée par un emploi vertueux et écologique d'énergie culturelle biologique.

La gestion de ces systèmes en SCV repose sur un modèle de fonctionnement intégré de cet écosystème cultivé. Elle vise en premier lieu, à travers une forte production et restitution de biomasse, à augmenter le taux de matière organique du sol (puis à le maintenir à un niveau satisfaisant) et à accroître l'activité biologique (intensité et biodiversité) qui sont essentielles à leur bon fonctionnement. Le pilotage de ces systèmes se fait par l'intermédiaire des plantes qui, par leur aptitude à produire une forte biomasse de qualité variée et à stimuler de manière sélective l'activité biologique, permettent de remplir diverses fonctions agronomiques. L'écosystème "sol", façonné par les pratiques culturales, n'est pas cantonné à un rôle de support pour les plantes et de réservoir d'éléments minéraux. Il joue un rôle fondamental et remplit diverses fonctions supplémentaires :

- dans le stockage, la mobilisation et la régulation des flux des éléments nutritifs et de l'eau ;
- d'effet tampon des aléas climatiques ;
- dans la régulation des bioagresseurs, etc.

Ainsi, les principales fonctions agronomiques sont assurées avant tout par la biodiversité fonctionnelle dans les systèmes (qui est perdue dans les systèmes conventionnels). Tout en assurant la production de cultures (répondant aux besoins des agriculteurs et aux exigences des marchés), ces systèmes incluent des plantes choisies pour assurer des fonctions écosystémiques fondamentales (décompactation des sols, recyclage et mobilisation d'éléments nutritifs, contrôle des adventices et des insectes, etc.).

Les itinéraires techniques ne font que contribuer à rendre ces systèmes performants en leur permettant d'exprimer leur potentiel.

De plus, le mode de fonctionnement des systèmes SCV fait que les effets sur l'environnement d'éventuelles "erreurs de conduite" (fertilisation excessive ou application de pesticides en forte quantité) sont limités par la couverture végétale et l'activité biologique, contrairement aux systèmes conventionnels où de tels excès engendrent une forte pollution.

Les systèmes de culture en SCV sont conçus et adaptés pour lever en priorité les principales contraintes agronomiques identifiées et hiérarchisées. Ils s'adressent activement aux causes des problèmes plus qu'à leurs symptômes, en protégeant (prévention) et en restaurant (remédiation) les sols et les équilibres écologiques. Ils rendent en plus un certain nombre de services écosystémiques, avec en particulier un impact très positif dans le domaine de la séquestration du carbone et la réduction des gaz à effet de serre (alors que les systèmes conventionnels "perdent" du carbone).

De par leur conception même, les systèmes SCV doivent évoluer en permanence pour s'adapter aux évolutions des contraintes majeures (qui sont progressivement levées). Comme pour un écosystème naturel, cette capacité à évoluer est une des conditions de leur durabilité. Pour réintroduire la diversité nécessaire au bon fonctionnement

Trois principes indissociables

Les trois grands principes fondamentaux des SCV (pas de perturbation du sol, couverture permanente et diversité des cultures) sont indissociables et fonctionnent en interaction, avec de nombreuses synergies. Le système dans sa globalité est supérieur à la somme de ses composantes.

Par exemple, le maintien d'une couverture végétale permanente n'est pas possible si le sol est perturbé et si cette couverture n'est pas alimentée par une phytomasse importante. De plus, l'application de seulement un ou deux de ces trois principes ne permet pas de maintenir et encore moins d'augmenter le stock de matière organique du sol.

L'application "isolée" de ces principes ne peut avoir un effet marqué que dans certaines conditions très particulières. Dans les milieux très secs par exemple, le maintien de résidus de récolte, même en faible quantité (1-2 t/ha), a un impact marqué sur l'infiltration de l'eau et permet d'améliorer remarquablement la production en levant la contrainte principale (l'alimentation hydrique des plantes).

Des fonctions encore méconnues

Chaque plante est capable d'assurer diverses fonctions et de rendre divers services écosystémiques. Les fonctions remplies par une espèce sont cependant très variables et restent très mal connues. Les plantes agissent très souvent en interaction avec la microflore stimulée de manière sélective par les exsudats racinaires. La compréhension de ces phénomènes et la découverte des capacités des diverses plantes à rendre des services spécifiques est un champ de recherche fondamental pour l'amélioration des performances des systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente.

Principes et fonctionnement du semis direct

Une grande diversité de systèmes SCV

Chaque système SCV a un potentiel plus ou moins élevé pour rendre des services écosystémiques divers. De plus, les conditions de réalisation de ces systèmes leur permettent ou non d'exprimer ce potentiel.

En conséquence, la capacité à rendre un service écosystémique donné est spécifique à chaque système, et à ses conditions de réalisation (production effective de biomasse en particulier).

Les systèmes les plus performants sont ceux qui permettent de remplir rapidement de nombreuses fonctions.

Un système ne peut pas remplir toutes les fonctions avec un même niveau d'efficacité. Par contre, la très grande diversité des systèmes SCV permet de choisir les systèmes les plus adaptés à un moment donné, pour remplir des fonctions agronomiques prioritaires et lever les contraintes majeures dans une situation donnée. Au fur et à mesure de l'évolution des situations, les systèmes doivent s'adapter pour assurer les fonctions qui sont devenues prioritaires.

agronomique des sols, on est amené à gérer dans le temps et dans l'espace des populations de plantes qui rendent des services divers, en associations ou en successions (intra ou inter-annuelles).

Une conséquence fondamentale est qu'il existe une très grande diversité de systèmes SCV. Ces systèmes sont conçus pour assurer en priorité des fonctions écosystémiques qui permettent de lever les contraintes majeures (compaction, fertilité, adventices, bioagresseurs, etc.) rencontrées dans une situation donnée (unité agronomique donnée, dans une exploitation donnée, elle-même faisant partie d'un terroir). Pour une fonction écosystémique donnée, l'impact des systèmes SCV sur la production et l'environnement est donc, par nature, fonction du système de culture choisi (avec son potentiel à rendre ce type de service) et des conditions de sa réalisation (qui permet ou non l'expression de ce potentiel). Les systèmes SCV les plus robustes sont ceux qui sont capables d'assurer les fonctions écosystémiques attendues dans des conditions de réalisation variées. On cherche également à rendre ces systèmes aussi résilients que possible, c'est à dire capables de retrouver un fonctionnement et un développement normal après avoir subi une perturbation importante. Enfin, les systèmes SCV mis au point doivent s'intégrer au mieux dans les exploitations, avec les contraintes et les moyens des agriculteurs, et répondre à leurs demandes et leurs besoins, dans

un contexte socio-économique donné (demande et opportunités des marchés, limitation des risques, etc.).

4. Les conditions de fonctionnement des systèmes SCV

Les systèmes SCV reposent fondamentalement sur la qualité et la quantité de la biomasse produite et restituée à la litière et au sol (biomasse aérienne et racinaire). La qualité de la biomasse joue sur les types de fonctions écosystémiques assurées, alors que la quantité influence directement l'intensité de ces fonctions. Il existe un seuil d'apport de biomasse au sol au delà duquel les systèmes fonctionnent convenablement en SCV, et en dessous duquel ils fonctionnent mal. Ce seuil correspond à la quantité de matière organique minéralisée. Il est variable en fonction essentiellement du climat, de la qualité de la biomasse, du sol et de son mode de gestion (travail ou non). Si les apports sont supérieurs à ce seuil, les sols (et les cultures) en bénéficient et ce d'autant plus fortement et rapidement que le différentiel "biomasse restituée – biomasse perdue par minéralisation" est important.

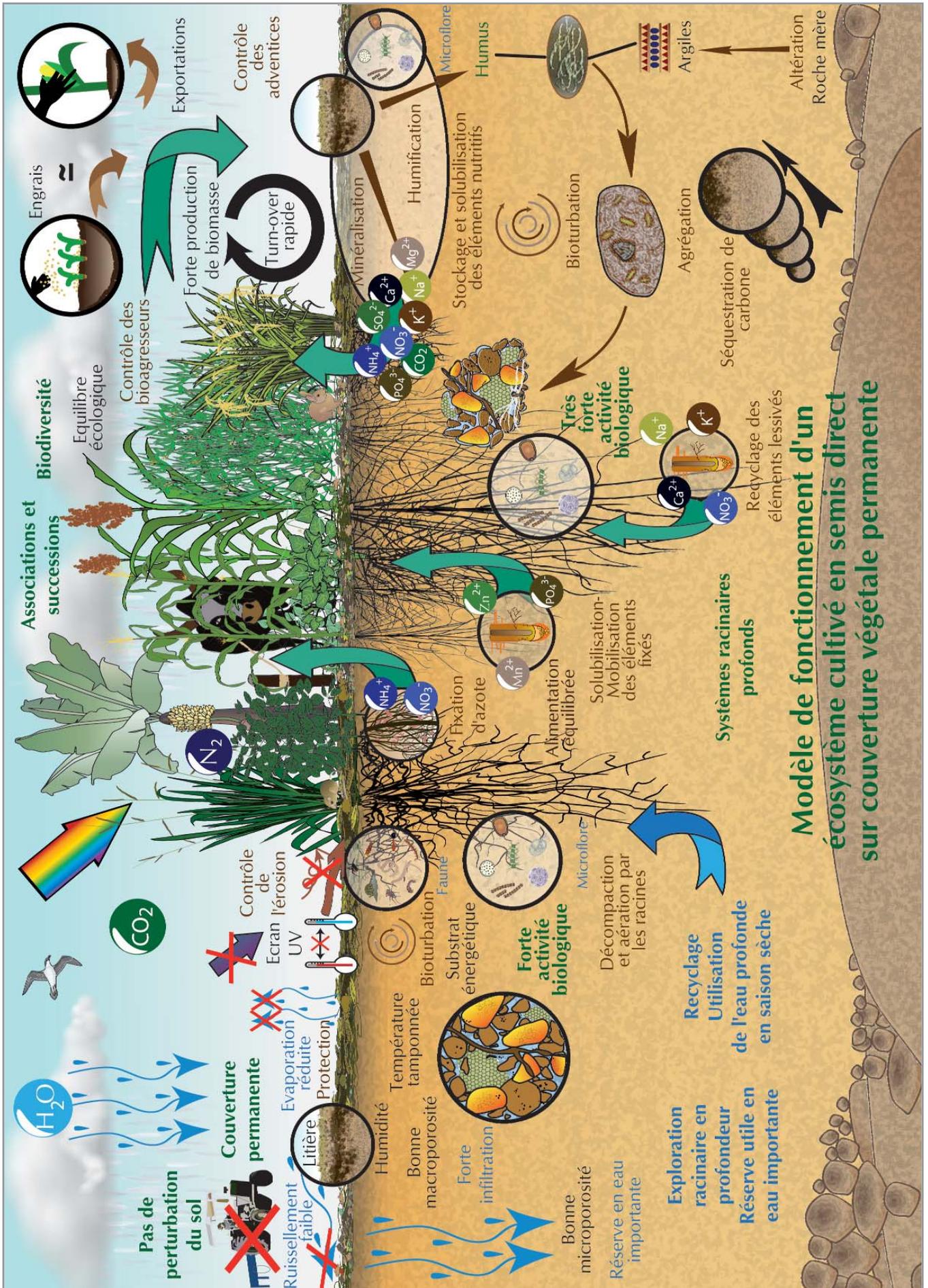
Inversement, des systèmes avec restitution de matière organique inférieure aux pertes (cas de systèmes à faible production de biomasse et/ou forte exportation, pour l'alimentation animale en particulier) ne permettent pas de maintenir durablement le niveau de matière organique des sols. Ils ne font que ralentir leur dégradation et n'assurent correctement qu'un nombre limité de fonctions agronomiques, ce qui limite leurs performances et leur intérêt. Très souvent, ces systèmes qui

entrent dans le terme générique d'agriculture de conservation, ne permettent pas de maintenir une couverture végétale permanente. Ils ne correspondent donc pas, en toute rigueur, à la définition du semis direct sur couverture végétale permanente qui est un type particulier d'agriculture de conservation (et qui offre une grande diversité de systèmes, basés sur un certain nombre de principes à respecter).



Couverture végétale permanente du sol
Forte production de biomasse

Principes et fonctionnement du semis direct



Modèle de fonctionnement d'un écosystème cultivé en semis direct sur couverture végétale permanente

Principes et fonctionnement du semis direct

Pour bénéficier rapidement des effets des pratiques SCV, il est nécessaire d'obtenir un fort différentiel "biomasse restituée au sol – biomasse perdue" dès les premières années d'entrée dans des systèmes SCV. Ce fort différentiel permet à ces systèmes de remplir leurs fonctions écosystémiques, et conduisent à une amélioration rapide des sols et à la restauration d'équilibres écologiques. Ces améliorations, dans un cercle vertueux, facilitent l'obtention d'une production importante de biomasse et permettent d'alimenter facilement la "pompe" des SCV les années suivantes. Sur des sols dégradés, l'obtention d'une forte production de biomasse les

premières années passe par la restauration de la fertilité par apport d'engrais (organiques ou minéraux), écobuage et/ou utilisation de plantes de couverture capables de produire une forte biomasse sur des sols peu fertiles. Plus les sols sont dégradés, plus "l'amorce" des systèmes SCV est difficile, longue et/ou coûteuse. En dessous d'un certain niveau de dégradation, elle n'est pas rentable durant les premières années et nécessite un investissement. En revanche, dans de très nombreuses situations agronomiques, la grande diversité des systèmes et des itinéraires techniques possibles en SCV permet d'adapter les pratiques à la grande diversité des situations socio-économiques. Elle permet de proposer des systèmes économiquement rentables, durables et motivants, compatibles avec les moyens et les niveaux de risques acceptables par les différents types d'exploitations. La diversité des systèmes possibles et leurs intérêts, ainsi que leur facilité de mise en œuvre, dépendent cependant largement des conditions biophysiques (climat, sols, etc.) et socio-économiques (systèmes agraires, systèmes d'élevage, conditions de marchés, règles communautaires, etc.). Certains milieux peu contraignants (espace et moyens disponibles, faible pression sur la biomasse, etc.) offrent de nombreuses possibilités d'améliorations, par des systèmes faciles à gérer. A l'inverse, des milieux contraignants (forte pression sur la biomasse, faible potentiel de production, moyens limités, etc.) demandent une adaptation fine des systèmes SCV et de leur gestion.



Maïs + niébé
Forte teneur en matière organique
de l'horizon de surface

Pour en savoir plus...

Chaboussou, F. 1985. Santé des cultures : une révolution agronomique. La maison rustique, Flammarion, Paris. ISBN : 2-7066-01-50-7 . 271 p.

De Moraes Sá, J.C. ; Cerri, C.C. ; Piccolo, M.C. Feigl, B.E. ; Buckner, J. ; Fornari, A. ; Sá, M.F. ; Séguy, L. ; Bouzinac, S. ; Venzke-Filho, S.P. ; Paulteti, V. ; Neto, M.S. 2004. Le semis direct comme base de système de production visant la séquestration du carbone. *Revista plantio direto*, 14 (84) : 45-61.

Gobat, J.M. ; Aragno, M. et Matthey, W. 1998. Le sol vivant. Bases de pédologie-Biologie des sols, ISBN : 2-88074-367-2, Presses polytechniques et universitaires romandes, Collection Gérer l'environnement. 550 p.

Magdoff, F. and Weil, R.R. editors. 2004. Soil organic matter in sustainable agriculture. CRC Press LLC, ISBN 0-8493-1294-9, 398 p.

Séguy, L. ; Bouzinac, S. et Maronezzi, A.C. 2001. Systèmes de culture et dynamique de la matière organique. Un dossier du semis direct. CIRAD-CA, Agronorte Pesquisas-Groupe MAEDA, TAFA/FOFIFA/ANAE. 320 p.

<http://agroecologie.cirad.fr/content/download/7131/34698/file/1172915043.pdf>

Séguy, L. ; Bouzinac, S. et al. 2008. La symphonie inachevée du semis direct dans le Brésil central. Le système dominant dit de "semi-direct". Limites et dégâts, éco-solutions et perspectives : la nature au service de l'agriculture durable. CIRAD, Embrapa, AgroNorte, UEPG, Codetec, USP, Facual. 214 p.

<http://agroecologie.cirad.fr/content/download/7200/35181/file/1212319668.pdf>

Uphoff, N. T. (ed.) ; Ball, A.S. (ed.), Fernandes, E.C.M. (ed.) ; Herren, H. R. (ed.), Husson, O. (ed.) ; Laing, M. V. (ed.) ; Palm, C. (ed.) ; Pretty, J. (ed.) ; Sanchez, P. (ed.) ; Sanginga, N. (ed.) ; Thies, J. (ed.). 2006. Biological approaches to sustainable soil systems. CRC Press, Boca Raton. ISBN -10: 1-57444-583-9. 764 p.