



**NUFFIELD
FRANCE**

*Developing people through agriculture
Developing agriculture through people*

Jean Guillaume CAPELLE
SCEA de l'HERMITAGE
2Bis, Place Saint MARTIN
02270 FROIDMONT COHARTILLE
FRANCE

Gestion de l'état biologique des sols en cultures industrielles



REMERCIEMENTS

Le rapport présent s'inspire de nombreuses discussions et visites effectuées en Australie notamment à travers le réseau Nuffield. Il s'inspire également des échanges entretenus avec différents agriculteurs, laboratoires et chercheurs contactés en France ainsi que de mes expériences antérieures en Egypte et Bolivie. Du creuset d'informations ainsi formé, il est difficile de citer telle ou telle personne en particulier car les idées se croisent et s'affrontent. Toutefois, je ne puis que remercier l'ensemble des personnes ayant bien voulu m'accorder de leur temps pour discuter même brièvement du sujet. Une attention particulière au sein du réseau Nuffield Australia à Tony, le Professeur, qui m'a hébergé quelques jours et qui m'a permis de prendre mes marques sur ce pays-continent et qui m'a « hand-droppé » en premier. Aux investisseurs de la ferme El Kawsar, à Don Guillermo Independencia, au laboratoire Biosol, à Olivier Husson, et à toutes les autres personnes ou instances qui ont bien voulu répondre à mes questions et échanger avec moi sur le sujet, je leur transmet ma reconnaissance.

Merci au groupe Terr'Avenir et au GIEE « Tassements de sol » qui me permettent de continuer ma réflexion sur le sujet et de l'élargir encore aujourd'hui.

Je remercie également le Crédit Agricole qui m'a accordé sa confiance et son financement. Ainsi que le bureau Nuffield France dont l'objectif a toujours été de vouloir faire avancer des agriculteurs sur des problématiques actuelles.

Je remercie mes parents, mon père notamment pour m'avoir fait connaître Nuffield mais aussi pour sa gestion de l'exploitation qui m'a permis de partir presque sereinement mais en tout cas avec la certitude que tout tournerait correctement.

Des remerciements chaleureux également à ma fiancée de l'époque devenue épouse et mère depuis et qui, une fois encore a accepter mon voyage, au motif d'une occasion inégalée d'apprendre et d'assouvir (pour quelque temps seulement) ma curiosité.

Merci à tous ceux qui ont et auront échangé avec moi sur les problématiques agricoles dans leur ensemble.

Table des matières

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Le fonctionnement biochimique des sols est complexe et différent pour chaque système de culture. | 6 |
| | Le rappel des grandes bases des connaissances sur les sols demeurent indispensables afin d'éviter certains raccourcis déformateurs. | 6 |
| | Les matières organiques du sol sont présentes sous de nombreuses formes et leurs évolutions dépend de ces formes. | 6 |
| | Un sol riche et diversifié en organismes permet de faire évoluer une multitude d'état de sols. | 8 |
| | Des interactions biologiques entre le sol et les plantes sont associées au volant d'auto fertilité des sols. | 10 |
| | Les organismes du sol peuvent avoir un effet biochimique sur l'auto fertilité. | 10 |
| | La biologie du sol détermine aussi les caractères physico-chimiques de ce dernier. | 11 |
| | Des relations fortes existent entre la biologie des sols et le développement des cultures. | 12 |
| | Quelques exemples de micro-organismes et de leur importance agricole | 14 |
| 2 | Mettre à profit l'activité biologique des sols en agriculture. | 16 |
| | Une agriculture aux nouveaux enjeux | 17 |
| | Les intérêts de l'activité pédobiologique se situent à différents niveaux et à différentes échelles. | 18 |
| | L'activité biologique des sols et son rôle dans la ressource en eau | 18 |
| | L'activité biologique des sols et son rôle dans le changement climatique | 18 |
| | L'activité biologique des sols et son rôle génétique | 20 |
| | L'activité biologique des sols passe nécessairement par une meilleure gestion des teneurs de matières organiques. | 20 |
| | Limiter l'appauvrissement en teneur organique. | 21 |
| | Compenser les pertes et augmenter les teneurs en matières organiques | 21 |
| | Favoriser l'activité biologique des sols | 23 |
| 3 | Créer et entretenir une activité biologique des sols au sein des exploitations | 27 |
| | Des matières organiques à définir selon les sols et les objectifs. | 27 |
| | Entretenir la biologie des sols passe par un raisonnement sur la rotation et les textures de sol. | 28 |
| | Des pistes d'améliorations possibles en système industriel. | 30 |
| | Gérer les tassements de sol | 30 |
| | Maintenir la structure par une couverture longue | 31 |
| | Partir d'une base saine | 32 |
| | Illustrations graphiques et applications | 32 |
| | Les cultures associées. | 34 |
| | Vers de nouveaux intrants | 35 |
| | Des modifications d'itinéraire envisageables. | 36 |

« Nous plaçons désormais la protection des sols au même plan que l'épuration de l'air et de nos ressources en eau ». Margot Wallström, commissaire européen chargée de l'environnement, avril 2002. Modification de la PAC et « paiement vert ». Plan Ecophyto lancé sous un gouvernement de droite en France, prolongé par un gouvernement de gauche. Objectif 4 pour 1000 annoncé lors de la COP21. Il serait possible d'allonger la liste de ces volontés politiques pour l'agriculture. Il serait également possible de relater de la pression sociale sur les pratiques agricoles ou des volontés industrielles de certifier les respects environnementaux de leurs matières premières. Tout cela procède de la même volonté de réduction des impacts négatifs de l'activité agricole sur le secteur public. Il semble que l'évolution de l'agriculture doive prendre ces paramètres conjointement aux problématiques de productivité. Depuis plus de vingt ans que l'on parle des services écosystémiques, ceux ci n'ont jamais été remis en cause et les discussions portent plutôt sur la manière d'y parvenir sans trop affecter la productivité. L'agriculteur a plusieurs leviers à sa disposition : agriculture de précision géographique (passer au bon endroit, modulations de doses) agriculture de précision temporelle (modélisation des dates de traitement par les OAD par exemple), améliorations génétiques, nanotechnologies ou, plus terre à terre, améliorations de la qualité des sols. L'ensemble de ces leviers peuvent dégager une synergie, mais de tous ces leviers, le plus long à mettre en place est celui de l'amélioration des sols. Ces derniers interviennent directement non seulement dans les productions agricoles mais aussi dans les trois problématiques évoquées par Margot Wallström et constitue en cela un facteur non négligeable.

De la même façon que l'on optimise un semoir ou une usine en utilisant l'outil le plus longtemps possible et en investissant dans des améliorations, on peut optimiser un système champ. Cela implique des couvertures longues à même de capter et transformer l'énergie solaire en énergie chimique ou mécanique tout au long de l'année, ou presque. Cela implique également un sol fonctionnel, c'est dire un sol aux caractéristiques physiques adaptées, capable de fournir aux plantes les éléments nécessaires mais aussi qui remplit des co-fonctions écosystémiques. Pour cela, le sol doit avoir une activité propre, et être dans le meilleur des cas, autonome. Il doit être stable et dynamique et donc complexe mais structuré.

La notion de sols vivants ou son corollaire « mort des sols » s'associe fréquemment à un ensemble d'objectifs et de techniques agricoles menant aux couverts permanents, aux techniques culturales simplifiées. Je désapprouve ce terme commercial car un sol est un système et non un organisme, il évolue dans le temps selon des paramètres propres et possède des dynamiques adaptées à son activité. L'objectif de ce rapport n'est pas d'étudier cette notion mais bien d'imaginer le sol comme un écosystème complexe qui fonctionne plus ou moins et dont l'homme fait partie intégrante. Cet écosystème doit fonctionner aussi bien en agriculture biologique qu'en agriculture industrielle et c'est cet aspect souvent non traité de la biologie des sols en système de culture industrielle qui guidera l'approche. Une introduction large sur le fonctionnement biochimique des sols mènera à s'interroger sur les bénéfices agricoles d'un tel sol en terme de productivité et plus largement d'activité agricole afin de partager quelques pistes d'améliorations des systèmes agricoles industriels.

1 Le fonctionnement biochimique des sols est complexe et différent pour chaque système de culture.

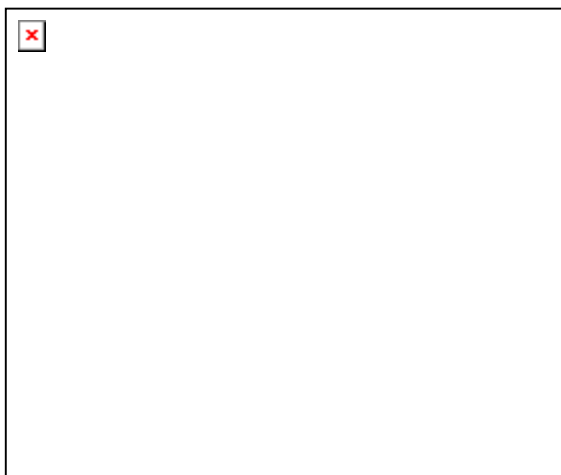
Il est fréquent d'entendre qu'il n'existe pas une mais des agricultures, de la même façon il n'existe pas un mais des fonctionnements du sol. Quelques exemples, appuyés sur des cas concrets permettent de balayer quelques itinéraires ayant des impacts différents sur les sols et leurs activités biologique.

Le rappel des grandes bases des connaissances sur les sols demeurent indispensables afin d'éviter certains raccourcis déformateurs.

Issu de l'altération de la roche mère par des facteurs physico-chimiques, le sol est en évolution perpétuelle au cours des siècles, des années et même des saisons. Certains paramètres évoluent même quotidiennement comme le taux d'eau ou d'air contenu dans ceux-ci (irrigation, pluie) ou l'activité enzymatique. D'autres paramètres peuvent évoluer au cours des saisons comme les proportions des différentes matières organiques et leur agencement spatial dans le sol (déchaumage, apports) ou comme les populations racinaires ou plus largement biologiques (sol peu actif en hiver, sol très actif à la fin du printemps ou à l'automne). D'autres paramètres vont évoluer au cours des années (taux de MO, tassement en profondeur, érosion) voire au cours des siècles (texture des sols, érosions). Bien saisir ces évolutions et le pas de temps sur lequel elles procèdent permet donc d'analyser le suivi des indicateurs pour le paramètre concerné.

Les matières organiques du sol sont présentes sous de nombreuses formes et leurs évolutions dépend de ces formes.

Classiquement un sol se conçoit comme une partie solide (environ 50%) avec des méats contenant une fraction liquide (25%) et une fraction aérienne (25%). Lorsque tous les méats sont remplis d'eau, on parle de capacité de rétention au champ, c'est à dire la part maximale d'eau que le sol peut absorber avant les inondations. Bien entendu, cette fraction dépend du tassement des sols. On considère tout aussi classiquement que la matière organique fait partie de la fraction solide du sol (bien qu'elle puisse se trouver souvent dans la solution du sol, dans sa partie liquide, donc). Cette fraction solide se compose de particules minérales pour 90 à 99% et de matières organiques pour le restant. De ce dixième de fraction solide organique, une partie plutôt stable (l'humus) représente environ 80% et une fraction active en constitue le reste. Au sein de cette matière active, on retrouve environ deux tiers de MO facilement décomposables (débris végétaux principalement) et un tiers d'organismes vivants. Ces derniers se composent de champignons, de levures, d'algues, de protozoaires, de bactéries et de macro organismes faunistique type vers de terre ou insectes du sol. Ces organismes vivants (soit un tiers -MO facilement décomposable/organisme vivant- de 20% - Humus/fraction active- du dixième -partie minérale/partie organique- de la moitié -solide/méats- du sol, *id est* 0,3% du sol total) sont la partie qui va conditionner la biologie des sols. Pour éviter les calculs laborieux, considérons que cela représente entre 0,1 et 0,5% du sol qui vont influencer, suivant les conditions climatiques et physico-chimique du milieu sur l'organisation du sol. Cela peut paraître peu mais il convient de garder à l'esprit que les seuls vers de terre sont en mesure en une année de digérer 10% de la couche arable, soit l'équivalent d'un labour profond tous les 10 ans en terme de terre remuée. Cette fraction du sol est donc loin d'être inefficace et constitue un compartiment incontournable de l'évolution du sol, et notamment des autres compartiments de la matière organique.



Cette illustration montre les différentes étapes de dégradation de la matière organique végétale. Les organismes composant le sol bien que non visibles ici font également partie intégrante de cette matière et en sont les acteurs et agenceurs principaux permettant son évolution sous différentes formes. Sol de type forestier.

Source : unt.unce.fr
Photo : A. Ruellan

. *Illustration 1: Différents états de la matière organique*

Ainsi, en fonction de la constitution de cette fraction vivante, un même type de sol pourra évoluer différemment selon qu'il regroupe plus de champignons ou de bactéries par exemple, ces deux classes n'étant pas en mesure de décomposer les mêmes molécules. De même, selon les résidus laissés, le sol évoluera différemment vers une proportion plus grande en champignon ou bactérie ou conservera ses résidus intacts (conditions aérobies, anaérobies). La pratique culturale seule ne peut donc pas prédire l'évolution à moyen terme d'un sol ni sa stabilité.

Les **matières organiques fraîches** sont l'un des constituants de la matière organique du sol et sont l'étape de transition entre la matière vivante et le sol. Elles sont essentiellement issues de la mort de cette fraction vivante mais aussi de leurs déjections. On y retrouve notamment les cadavres, les résidus de récolte, les feuilles mortes, les métabolites des organismes vivants ainsi que des cellules microbiennes mortes. On retrouve également dans ce constituant les racines mortes. Leur positionnement dans le sol (feuilles mortes en surface ou racine en profondeur par exemple) influe sur la capacité d'évolution mais aussi sur la teneur en carbone du sol. Généralement formées de substances complexes, leur vitesse de décomposition est considérée comme élevée. Ces grosses molécules sont rapidement décomposées pour former la matière organique transitoire.

Ce terme de **matière organique transitoire** est défini par son devenir biochimique. Il faut y comprendre de la matière organique fraîche décomposée et en cours de stabilisation dont le poids moléculaire va *decrecendo* pour former glucides simples ou acides aminés par exemple. Elles sont cependant considérées comme labiles dont le terme *stricto sensu* regroupe la matière organique fraîche et la matière organique de transition. En effet, une partie de cette matière fraîche est directement humifiée et la taille de leurs molécules augmente par des processus de néosynthèse ou de polycondensation.

Les **matières organiques stables**, l'humus, est très finement décomposé tout en présentant des poids moléculaires élevés. Ces matières stables sont chimiquement très réactives comme en témoigne l'activité des complexes argilo-humiques. Elles sont donc fortement liées aux sols et interagissent avec les éléments minéraux ou organiques, avec les polluants métalliques ou les éléments nutritifs. Par opposition, le **reste de la matière organique du sol** est donc présentée comme étant **libre**.

En somme, la matière organique du sol est complexe et plurielle et sa mesure délicate car évoluant sans cesse entre ses différents « compartiments ». Cette évolution, principalement basée sur l'action biologique des organismes du sol, champignons, bactéries, faune comme racines de culture, constitue le fonctionnement biologique du sol. Il est dès lors aisé d'imaginer des

fonctionnements très différents entre un sol sous couvert permanent sans perturbation profonde et un sol issu de l'agriculture dite « conventionnelle » qui connaîtra des variations importantes d'apport de matière organique lors des déchaumages ou du labour dans des profondeurs très limitées spatialement et donc avec des strates de concentrations différentes.

Un sol riche et diversifié en organismes permet de faire évoluer une multitude d'état de sols.

On retrouve dans le sol toutes les branches phylogéniques du vivant allant des *archées* aux quatre règnes des eucaryotes (organismes contenant des cellules à noyau). Si cette diversité n'est en apparence que scientifique, elle est en pratique, aussi importante puisque diverse quant aux modes de fonctionnement et aux milieux de prédilection de ces différents organismes. Pour rappel, les archées sont des procaryotes (unicellulaire sans noyau) assez similaires aux bactéries si ce n'est leur composition membranaire. Les bactéries sont elles aussi des procaryotes et leurs tailles leur permet de coloniser des nano-milieux dont la diversité ne manquent pas dans les sols : des zones à pH différents ou à teneur hydrique différentes n'auront pas les mêmes dynamiques d'évolution bactérienne, les populations bactériennes de la rhizosphère ou du reste du sol avoisinant sont également très différentes. Parmi les eucaryotes, les quatre règnes sont les protistes (algues et protozoaires), les champignons, les végétaux et les animaux. Là encore ces règnes regroupent des organismes aux actions très différentes les unes des autres. En marge de ces six classes, on retrouve les virus qui n'ont pas d'activité biologique à proprement parler mais dont les incidences sur le fonctionnement du sol et de la culture en place peuvent être importantes. Bien que les interactions entre tous ces organismes soient difficiles à comprendre voire impossible à gérer dans leur intégralité, une approche selon leurs tailles et leurs principaux rôles déterminants dans le sol est possible.

La biomasse microbienne du sol regroupe l'ensemble des micro organismes du sol. Cette biomasse est très faible en comparaison de la biomasse des organismes dits supérieurs, cependant leur nombre impressionnant compense amplement et leur activité est essentielle. Biodégradation des matières organiques, production de nutriments pour les plantes mais aussi pour le reste des organismes du sol, dégradation de certains polluants (cf. phyto-bac) ou fixation d'azote, on considère que les micro-organismes du sol sont responsables de plus de 90% des cycles biogéochimiques (carbone, azote, phosphore). Au regard des défis agricoles de demain : optimisation des rendements, donc de l'azote, séquestration du carbone ou réduction des stocks mondiaux de phosphore, l'importance de cette biomasse si faible n'est pas à négliger. Quelle valeur lui donneront les agriculteurs ?

On retrouve dans cette classe microbienne les bactéries, des champignons, les algues microscopiques, les protozoaires mais aussi les plus petits des nématodes. A titre indicatif de l'importance de cette biomasse, les protozoaires dans leur grande diversité stimulent le renouvellement des autres micro-organismes, ce qui peut avoir une incidence sur la minéralisation de l'azote, ils sont également les principaux prédateurs des bactéries et participent ainsi à la régulation de la chaîne trophique et peuvent avoir un rôle symbiotique dégradant les tissus cellulotiques. Ces types d'organismes, un parmi ceux dont on parle peu quand on évoque les organismes du sol, ont donc un rôle important. Ils se développent dans les dix premiers centimètres du sol, *id est* dans la couche retournée par le labour.

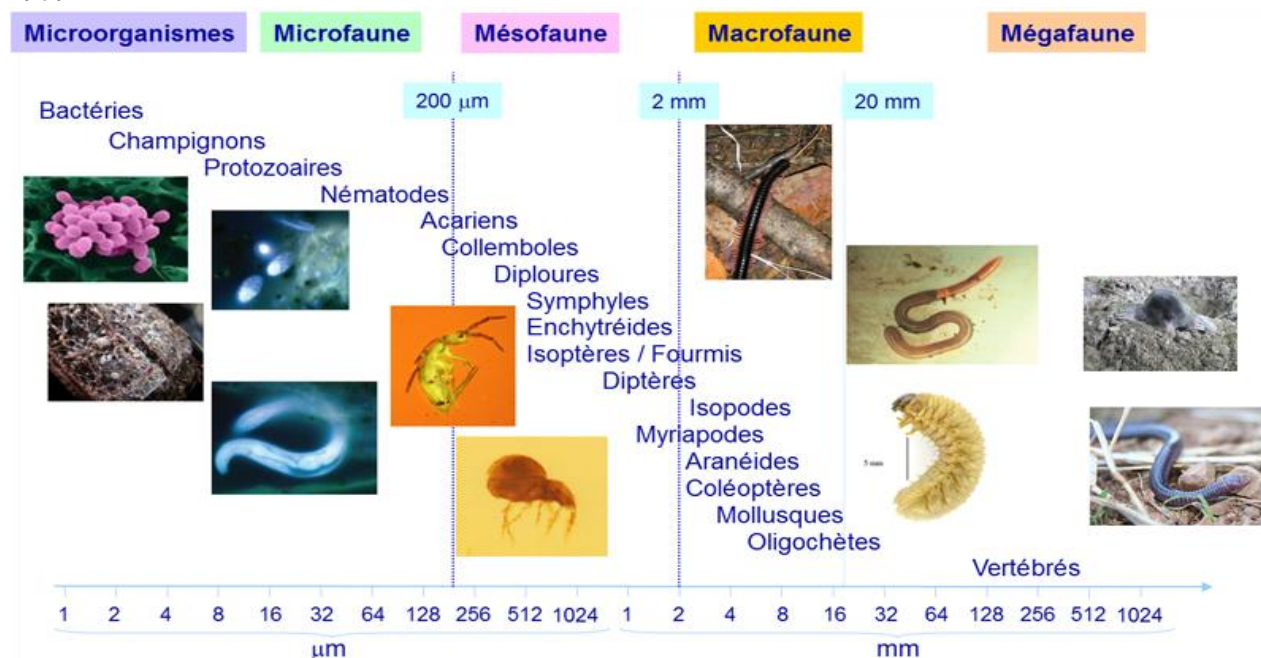
La mésofaune regroupe des organismes de taille supérieure (de 0,2 à 4mm). On y retrouve les nématodes mais aussi les acariens et divers insectes (collemboles). Les nématodes sont principalement présents dans la rhizosphère et dans les matières en décomposition et sont plutôt aquatiques. Ils sont principalement connus comme étant des parasites voire des ravageurs des cultures. Dans les faits, la majorité des nématodes sont neutres vis à vis des cultures et ont un rôle de prédation important d'autres parasites des cultures comme les champignons ou certaines bactéries, dont ils sont aussi des proies potentielles. Proie ou prédateur, parasite ou auxiliaire, les

nématodes témoignent que chaque organisme du sol peut endosser plusieurs rôles et que ces rôles varient en fonction du milieu dans lequel ils évoluent. Au plus le maillage interactif entre les organismes est dense, au plus le sol sera stable et tamponné et donc *a priori* au moins il sera soumis aux fluctuations abiotiques.

La macrofaune et la macroflore sont bien visibles à l'œil nu. Ils représentent de 10 à 10000 organismes par mètre carré (la biomasse microbienne regroupe entre 1 million et 1000 millions d'individus sur la même surface). On y retrouve entre autres les limaces, les vers de terre, les semences et les graines d'adventices. Impossible de passer sur cette classe sans refaire un point sur les lombrics en rappelant les trois classes principales : épigés, à la surface du sol ; anéciques, gros vers de terre à l'apex noir ou noir annelé de rose qui se déplacent verticalement et crée des galeries propices au développement racinaire en sols compacts ou à l'infiltration de l'eau et les endogés qui vivent dans des réseaux horizontaux plus profonds que les épigés sans remonter à la surface. Quels que soient leurs modes de fonctionnement, tous ingèrent et brassent la terre en assurant un contact étroit entre celle-ci et les micro-organismes, influant aussi sur l'aération du sol, concentrant des éléments fertilisants sur les chemins préférentiels des racines.

Enfin, la mégafaune est constituée de taupes et rongeurs types campagnols, mulot.

Illustration 2: Classification des organismes du sol d'après Swift et Al. 1979



Il est également possible d'avoir une approche fonctionnelle dans le classement des organismes du sol et en octroyant à chacun des groupes précédemment cités des impacts sur le sol, sur les autres compartiments biologiques des sols et *in fine* sur la production végétale.

Les symbiotes, activateurs de croissance des plantes, pathogènes, recycleurs de nutriments ou agents de contrôle biologique jouent un rôle dans l'agrégation, la décomposition, la biodégradation des molécules, la disponibilité des nutriments ou le contrôle biologique. Ils modifient la physiologie des plantes et des autres organismes des sols avec des impacts variés sur la biomasse végétale en fonction de l'état d'équilibre acquis.

Les microprédateurs minéralisent les nutriments, modifient les populations microbiennes et ont en cela des effets principalement indirects sur la production végétale.

Les transformateurs de matière organique fraîche, fragmentent cette dernière et la minéralise.

Les « ingénieurs du sol » participent à la bioturbation ainsi qu'à la dynamique des matières organiques, au cycle des nutriments. Ils créent des micro-climats pour les autres organismes du sol et participent à leur dissémination. Leur impact sur la biomasse végétale est très varié.

Les plantes proprement dites ont des impacts sur l'agrégation, sur le cycle des éléments bien sûr, apportent de la matière organique fraîche, influencent les rhizobactéries ayant une action positive sur la croissance des plantes (PGCR), absorbent les nutriments minéralisés et l'eau.

L'homme joue sur la compaction des sols, apporte de la matière organique sous différente forme, perturbe le sol et participe à la régulation des populations via ses façons culturales et ses engins agricoles. Même extérieur au sol, ce dernier exerce une telle action que l'approche fonctionnelle ne peut pas l'ignorer.

Ce descriptif sommaire des organismes du sol laisse entrevoir des interactions fortes entre le sol, les organismes qui y vivent et y meurent, les plantes et les hommes.

Des interactions biologiques entre le sol et les plantes sont associées au volant d'auto fertilité des sols.

Concernant l'évolution de la matière organique, les organismes biologiquement actifs du sol ont un impact primordial associé aux conditions pédo-climatiques du milieu. Cette évolution va influencer sur les propriétés des sols.

Les organismes du sol peuvent avoir un effet biochimique sur l'auto fertilité.

L'auto-fertilité des sols est comprise comme l'ensemble des processus permettant au sol de fournir aux plantes ce dont elles ont besoin pour assurer leur développement au sens strict ou au sol d'assurer un fonctionnement durable et équilibré au sens large . En fonction des sols et des cultures, ce volant peut être plus ou moins important. Dans la mesure où une part non négligeable d'éléments minéraux est exportée avec la récolte, il est impossible de fonctionner en cycle fermé et un apport exogène devra nécessairement et obligatoirement être présent pour maintenir un potentiel de fertilité. Dans certaines situations, les stocks d'éléments immobilisés dans le sol permettent de s'affranchir de l'apport d'un élément durant quelques années en permettant au sol de libérer ce stock. Le cas est fréquemment cité en ce qui concerne le phosphore ou le potassium. Le fonctionnement global de ce volant est connu de tous et se traduit économiquement par le terme d'optimisation des apports. Bien que les deux notions soient quelque peu différentes, l'objectif est le même : assurer le maintien d'une fertilité en effectuant le moins d'apport possible, c'est le niveau de fertilité demandé qui peut éventuellement varier en fonction des autres façons culturales.

Il est possible de considérer le volant d'auto-fertilité comme étant la quantité (d'azote par exemple) d'élément à apporter pour produire une tonne de produit. Dans ce cas, pour un même sol, l'auto-fertilité sera très différente entre une protéagineuse à cycle long (luzerne) et un produit dont la demande est axée sur la protéine (blé). On peut également parler de volant sur une rotation ce qui permet de raisonner à l'échelle d'une succession culturale mais qui peut engendrer des soucis de pilotage sur le long terme lorsque les systèmes agricoles sont appelés à évoluer, soit par des contraintes de marché, soit par des contraintes environnementales dont les contraintes climatiques. C'est pourtant à cette échelle que la notion prend l'essentiel de sa valeur.

Cette auto-fertilité repose sur trois points principaux. Premièrement la quantité de matière organique que le sol reçoit (hors apport exogène mais avec résidus de cultures). Deuxièmement, la part qu'il est capable de transformer (qualité des apports, agencement spatial de ces derniers et organisation biologique du sol). Troisièmement la part qu'il est en mesure de restituer (partie stable humifiée, partie libre lessivée, partie minéralisée fixée et enfin partie minéralisée restituée aux cultures et donc état physique du sol et volume de sol exploré par les racines).

Dans ce schéma, la matière organique fraîche sera l'origine principale des éléments restitués aux plantes, suivant les mêmes processus, elle sera aussi l'origine principale de pollution des eaux par les nitrates puisque les éléments minéralisés non captés par les racines seront alors en partie

lessivés. L'auto-fertilité des sols passe donc par deux étapes supplémentaires pour être valorisée au mieux, d'une part un sol physiquement fertile, c'est à dire correctement structuré avec des caractéristiques physico-chimiques propices au développement des plantes ou à l'humification et d'autre part une couverture racinaire permettant de valoriser ces éléments. A défaut, énergie solaire et carbone atmosphérique, voire azote atmosphérique dans le cas de couvert de légumineuse, se chargeront de maintenir un flux de matière organique fraîche.

La pertinence des semis directs sous couvert en zone de forte minéralisation prend naissance ici. Son extension à d'autres systèmes agricoles s'explique par d'autres de ses avantages évoqués en partie deux. Dans ce cas concret que l'on peut rencontrer entre autres à Madagascar, le gain des SDSCV (Semis Direct Sous Couvert Végétal) par rapport à une agriculture conventionnelle européenne ou nord américaine tient à un renouvellement constant de la matière organique et à une structuration des sols plus résilientes durant les saisons pluvieuses. Le sol est maintenu par les racines et les productions d'exsudats même en cas de saturation de la parcelle. Les chaleurs aussi bénéfiques à la minéralisation qu'à l'activité des plantes adaptées permettent un flux important de matière organique fraîche. Le système est adapté à un turn over rapide de cette MO et le gain en productivité pour ces raisons de volant de fertilité mais aussi de structure et de conservation des sols rapidement altérables est important. Au delà de l'importance du turn over, les gains sur la structure des sols et leurs capacité à limiter les pertes par érosion ou infiltration ont permis d'étendre l'intérêt de ce procédé à d'autres régions climatiques.

La biologie du sol détermine aussi les caractères physico-chimiques de ce dernier.

Comme il vient d'être évoqué précédemment, le flux de matière organique dans le sol n'est pas le seul facteur jouant sur la fertilité de ces derniers. Des facteurs physico-chimiques entrent également en jeu. La capacité d'échange cationique en fait naturellement partie et la composition du sol influe donc sur cette capacité du sol à fournir non seulement des nutriments mais aussi des conditions de culture favorable. En Australie, la valorisation de certaines terres agricoles très sableuses peut se faire par un piochage profond ayant pour but de remonter de l'argile. Cet argile, même en faible quantité va permettre d'obtenir une certaine productivité au sol via son pouvoir de rétention d'eau, mais aussi en permettant la formation d'un CEC indispensable au bon fonctionnement de sol agricole. Sans argile, pas de CEC, l'intérêt de la matière organique, même en faible quantité diminue. Si cette technique est purement de valorisation physique des sols, elle entraîne une amélioration biologique à terme et la formation d'un sol plus stable.

Outre cet aspect, la matière organique stable cette fois-ci joue des rôles importants dans la fertilité physique des sols : stabilité structurale en permettant des complexes plus lourds et des stockages d'éléments sans risque de lessivage, une meilleure résistance à la battance et à l'érosion. Indirectement, la porosité du sol se trouve améliorée et la réserve utile également. L'eau tombée sur cette surface s'infiltré mieux et peut donc être valorisée en profondeur par les racines, devenant moins rapidement un facteur limitant la croissance végétale. En outre, cette fraction stable va également être en mesure de minéraliser lentement et tamponner les décroissances de minéralisation dues à l'épuisement du stock de matière organique fraîche.

Si le complexe humique entretient des liaisons fortes avec les argiles, les exsudats ou production de la matière organique vivante peuvent également jouer ce rôle de façon ponctuelle mais efficace dans le cadre de la rétention de l'eau, des micro organismes ou des éléments minéraux fertilisants. La terre collante aux racines lorsqu'on les déterre en est un bon indicateur. Cela prouve bien que cette terre est liée à la plante et moins soumise au lessivage des limons fins ou à l'érosion. Le rôle des matières organiques est particulièrement important dans les sols à textures limoneuse et au potentiel battant qui demeureraient nus en période pluvieuse.

Au niveau de la structure même du sol, l'agencement des agrégats de terre issus d'une activité biologique sont plus arrondis et plus friables que des agrégats issus d'une alternance de conditions climatiques favorables (gel, alternance pluie/secheresse) qui produit des agrégats aux

arêtes plus vives avec moins de méats. Cette différence permet de se représenter rapidement le niveau d'activité biologique lors d'un test à la bêche ou de l'établissement d'un profil.

Cependant, dans son ensemble, un sol correctement entretenu et ayant de bons ratios de matière organique libre et stable ainsi qu'un fonctionnement biologique sain ne verra pas obligatoirement son potentiel de fertilité s'améliorer. Cette activité biologique dans les sols n'est pas à proprement parler le principal facteur limitant des rendements de nos parcelles mais elle en est un des paramètres sur lequel il est possible d'agir pour maintenant et pour demain.

Des relations fortes existent entre la biologie des sols et le développement des cultures.

Dans le système agricole, la biologie des sols revêt une importance particulière eu égard aux impacts que peut avoir le sol sur le développement de la (des) culture(s) en place. Dans cette relation, les plantes exercent en retour une pression sur le sol et ses constituants. L'action physique des racines, l'absorption des nutriments, la restitution possible des résidus ou encore la protection de la surface sont assez documentés. La production d'exsudats par les racines l'est un peu moins et, dans le cas que nous étudions particulièrement intéressante en ceci qu'elle participe grandement à l'activité biologique de la rhizosphère. En effet, les racines produisent des exsudats racinaires se composant de deux grandes fractions : les **mucilages**, essentiellement composés de polysaccharides et de protéines et des **molécules solubles plus simples** telles qu'acides aminés, phénols, stérols, vitamines, etc. Bien qu'il ne s'agisse pas à proprement parlé d'exsudat, il convient de rajouter l'ensemble des cellules exfoliées de la coiffe. Environ 5 à 30% des produits issus de la photosynthèse seraient ainsi restitués au sol soit, en terme de carbone entre 1 et 3 tonnes de Carbone/Ha/an ou 30 à 40% des entrées carbonées du sol. Autant de « briques » du vivant aptes à stimuler l'activité biologique du milieu. A partir de ces exsudats, se forment de véritables réseaux trophiques interdépendants. En orientant les exsudats, la racine serait capable d'orienter et/ou réguler les populations de micro-organismes et donc les fonctions remplies par ceux-ci. En effet, ces organismes peuvent faciliter la solubilisation d'éléments nutritifs, ils peuvent également synthétiser des substances de croissance ou fixer/mobiliser des ressources non utilisables par la plante (fixation symbiotique ou libre). En outre, le renouvellement permanent des micro-organismes représente une source non négligeable de nutriments. Un équilibre entre les molécules exsudées et celles assimilées est donc créé avec une relation entre la racine et les populations du sol. Notons que de la même manière que les exsudats peuvent attirer des organismes symbiotiques ou commensaux, ils peuvent également attirer des organismes parasites. Ainsi, les racines de colza sont à même d'exsuder des stimulants de synthèse d'enzymes microbiennes capables de solubiliser le soufre. Ces exsudats peuvent aussi limiter les populations de micro-organismes, c'est le cas par exemple de l'émission de composés phénoliques et/ou antibiotiques qui limitent les populations en concurrence sur la mobilisation du phosphore. La plante a ainsi une meilleure disponibilité de cette substance en s'assurant le quasi monopole de l'élément facilement disponible. Les graminées peuvent, quant à elles produire des acides aminés appelés phytosidérophores ayant une grande affinité avec les ions Fe^{3+} et facilitant ainsi l'absorption de fer par les racines. Des bactéries libres produisent le même type d'acides aminés.

Avec un autre règne, celui des champignons cette fois, les racines de nombreux végétaux sont capables d'établir des relations de type symbiotique. Il s'agit de la mycorhization. Toutes les plantes exceptées les crucifères et les chénopodiacées en possèdent. La symbiose mycorhizienne arbusculaire exige cependant des champignons spécifiques à chaque plante. Ces organismes, purement symbiotes ont toutefois la capacité de survivre dans le sol sous forme de spores. Cette forme de résistance permet notamment l'élaboration de produits inoculables à la parcelle mais ne suffit généralement pas à assurer l'inoculation naturelle d'une culture. Recevant de la plante son alimentation carbonée à travers les saccharides, le champignon émet des hyphes à travers le sol, prolonge le système racinaire et complète la nutrition de la plante en mobilisant des ressources

normalement immobilisée pour la racine végétale soit par sa capacité chimique soit par son pouvoir physique : un mycélium pénètre des structures beaucoup plus fines que les radicelles et peut ainsi mobiliser des ressources physiquement inaccessibles. Pour illustrer encore la complexité du système, ces mycélium sont également en mesure d'entretenir des relations avec des colonies bactériennes. En outre, le champignon pourrait émettre un signal impliquant la fermeture des stomates de la plante jouant un rôle de fusible avant une situation de stress hydrique irréversible. L'acide jasmonique ou l'éthylène peuvent également être produits par le champignon et en diffusant dans la plante modifier sa croissance. D'autre part, le mycélium est en perpétuel renouvellement et possède la capacité de faire migrer facilement son cytoplasme vers des zones de croissance. Ainsi, lorsqu'un espace physique s'appauvrit, le système arbusculaire peut, à moindre coût énergétique, procéder à la colonisation rapide (quelques millimètres par jour) d'un nouveau micro-milieu. Le résidu micellaire participant au flux de matière organique et au réseau de porosité du sol à des échelles facilite les remontées capillaires. Également sur un plan structural, la glomaline produite par les champignons participent à la structuration du sol.

Un autre exemple de relation entre la plante et le système sol est l'impact de la présence de parasites racinaires sur les populations d'auxiliaires au niveau foliaire. C'est à dire qu'il existe une communication entre le sol et l'appétence d'une plante. L'expérience menée par Rasmann et Turlings (2007) consiste à exposer des racines de maïs à des agresseurs racinaires et foliaires et d'étudier ensuite le comportement de leurs prédateurs. En présence d'un unique agresseur, le comportement de l'auxiliaire est de se diriger vers la plante agressée par sa proie. En revanche, en présence simultanée des deux agresseurs, les auxiliaires ne semblent plus être autant attirés ce qui laisse à penser que l'auxiliaire n'est pas attiré par la seule présence de sa proie mais bel et bien par la réaction de la plante à cette présence et que cette réaction varie selon l'état de stress de la plante. En d'autres termes, l'action des auxiliaires n'est pas seulement conditionnée par leur présence à la parcelle mais aussi par la dynamique biologique du sol. Cela pourrait également être le cas pour certains ravageurs.

D'un point de vue physico-chimique, le pH est un facteur relationnel fort entre le sol et la plante sur lequel la littérature scientifique a amplement communiqué. Moins souvent évoqué en raison de la complexité des mesures, de leurs fluctuations et des difficultés d'interprétation d'un point de vue agronomique, le potentiel d'oxydo-réduction semble également être un facteur important entre le sol et la plante. Ce potentiel possède une action sur le développement des populations du sol, voire la capacité de la plante à réagir aux agresseurs, incluant les pathogènes aériens. Concrètement le potentiel Eh du sol influence le type de population de micro-organismes: à très faible Eh, *id est* sol très réduit, les bactéries anaérobies sont privilégiées, à Eh faible (<0 mV), les populations de bactéries aérobies prédominent sur celles des champignons et à Eh moyen (>250mV) ce sont les populations fongiques qui prédominent. Les réactions chimiques micro locales peuvent altérer ce potentiel et participent à l'élaboration de micro-milieus propices à différentes populations. Pennington et Walters (2006) estiment que les populations de plantes naturellement présentes dans des milieux humides sont en mesure de caractériser le potentiel Eh de ces sols tant ce facteur est important dans le développement des plantes. Dans cet équilibre, le forme des intrants peut jouer un rôle important. Ainsi, l'apport d'une forme d'azote oxydée NO₃- induit sur le riz de sévères attaques de pyriculariose quand la forme réduite NH₄⁺ n'induit pas ces attaques (Osuna-Canizalez et al. 1991). Autrement dit, la composition physico-chimique du sol influe sur la capacité des phytopathogènes à se développer. Pour Olivier Husson (également spécialiste des SCV au CIRAD), le triptyque Eh-pH-résistivité permet de dresser un état trans disciplinaire d'un sol et d'en comprendre le fonctionnement agricole. Pour aller plus loin, des plages de ce triptyque définiraient un sol « idéal » (évidemment associé à une culture donnée) dans laquelle la plante pourrait se développer en limitant son appétence pour les pathogènes (y compris foliaires puisque la chaîne d'oxydo-réduction conditionnent les réactions chimiques du sol jusqu'aux émissions de composés volatils) et en optimisant le coût énergétique de son développement grâce à une distribution globale de l'énergie utilisée pour la plante mais aussi pour les organismes liés.

Quelques exemples de micro-organismes et de leur importance agricole

Cette liste est non exhaustive mais permet de se rendre compte que nos connaissances sur les organismes du sol au niveau agricole, mais aussi au niveau scientifique couvrent très peu la complexité de ce milieu.

Azospirillum : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui fixe l'azote atmosphérique chez la plupart des végétaux et le transforme en ammonium (20 à 40 kilos par hectare).

Bacillus Amyloliquefaciens : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui génère une enzyme phythase qui permet de libérer d'avantage de phosphore organique du sol. Elle colonise les racines et ralentie les champignons nuisibles et génère également des auxines (hormone de croissance).

Bacillus Megaterium : une des plus grosses bactéries rencontrées dans les sols. Cette bactérie est capable de produire des endospores (résiste à la sécheresse). Elle est impliquée dans le cycle du phosphore (minéralisation microbienne du phosphore organique). Elle produit également une pénicilline amidase (antibiotique).

Bacillus Radicola : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui s'associe au *Rhizobium*. Cette bactérie est productrice de phytohormones ce qui permet de développer le système racinaire du végétal.

Bacillus Subtilis : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol. C'est une bactérie rhizosphérique phytoprotectrice des racines (PGPR). Elle crée un bio film adhésif et protecteur (mucilage microbien).

Coniothyrium Minitans : champignon filamenteux qui crée une barrière physique et stimule le développement racinaire par libération d'éléments nutritifs et minéraux. Elle détruit les sclérotés du sclérotinia par production d'enzymes cellulosiques et grâce à la production de molécules à activité biocide (peptaibols).

Lactobacillus Rhamnosus : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui sécrète des enzymes permettant de dégrader la matière organique fraîche (lignine, cellulose,...). Elle inhibe également certains germes pathogènes.

Lactobacillus Faciminis : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol qui sécrète des enzymes permettant de dégrader la matière organique fraîche (lignine, cellulose,...). Elle inhibe également certains germes pathogènes.

Mycorhizes (Glomus intraradices et mosseae) : la mycorhize est une association entre les racines des plantes et des champignons. Elle existe chez 95% de toutes les plantes à fleurs et à graines. En milieu sauvage, elle est essentielle à la survie des deux partenaires. Chez la plante, elle augmente sa capacité d'absorber les minéraux essentiels et sa résistance aux maladies des racines. Elle permet au champignon de tirer les glucides directement de son partenaire, sans la compétition des autres micro-organismes.

Phanerochaete sp : champignon filamenteux qui produit des enzymes qui dégradent la lignine et la cellulose.

Pseudomonas spp : bactérie aérobie stricte et libre dans le sol. C'est une bactérie rhizosphérique phytoprotectrice des racines (PGPR). Elle crée un bio film adhésif et protecteur (mucilage microbien). Elle a également la capacité de solubiliser le fer.

Rhizobium : bactérie aérobie stricte qui fixe l'azote atmosphérique en association avec des plantes hôtes (légumineuses) et le transforme en ammonium (20 à 40 kilos par hectare).

Trichoderma (hazarnium et atroviride) : champignon filamenteux qui crée une barrière physique et stimule le développement racinaire par libération d'éléments nutritifs et minéraux. Elle détruit les champignons pathogènes par production d'enzymes cellulosiques et grâce à la production de molécules à activité biocide (peptaibols).

Ces micro-organismes sont ici listés de façon lisible mais leur véritable intérêt se trouve dans l'étude de la biologie intégrée de ces systèmes, c'est à dire de la manière dont ils interagissent entre eux pour former un système complexe et stable. En effet, chacun de ces systèmes vivants réagira différemment selon les sols et leurs compositions tant physico-chimiques que biologiques.

Pour aller plus loin sur la complexité de ces relations trophiques :

(Blanchart Eric, Villenave Cécile, Viallatoux A., Barthès Bernard, Girardin C., Azontonde A., Feller Christian. IRD, 2006) Long-term effect of a legume cover crop (Mucuna pruriens var. utilis) on the communities of soil macrofauna and nematofauna under maize cultivation, in southern Benin

Knops JMH, Bradley KL, Wedin DA (2002) Mechanisms of plant species impacts on ecosystem nitrogen cycling. Ecology Letters 5: 454–466

(Tuffen, F.; Eason, William R.; Scullion, John) The effect of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on growth of and 32P transfer between Allium porrum plants

2 Mettre à profit l'activité biologique des sols en agriculture.

Ces données générales sur l'activité biologique des sols se complètent par des bénéfices réels ou supposés sur l'agriculture et ses enjeux. En tant que fournisseur alimentaire, le secteur agricole se doit d'anticiper les demandes et opportunités des futurs marchés. Aujourd'hui, en France, le secteur de la grande distribution demeure le modèle de base de l'accès à la nourriture, lui-même alimenté par les industries agro-alimentaires. La réalité économique actuelle qui ne prévoit pas d'évolution majeure du pouvoir d'achat mais plutôt une stagnation de celui-ci implique une baisse constatée des chiffres d'affaire de cette grande distribution. Dans le même temps, les surfaces au sol dédiées à ce type de commercialisation continuent à décroître ce qui laisse présager une concurrence accrue entre ces acteurs. La guerre des prix dans ce réseau de distribution ne laisse pas de perspectives d'amélioration, notamment sur la pression exercée sur les fournisseurs avec, en début de chaîne le secteur agricole.

Conjointement, le consommateur se frustre de cette stagnation et il cherche à mieux valoriser chacune de ses dépenses. Cette valorisation peut, en fonction des groupes de consommateurs, porter sur trois points principaux. Premièrement, améliorer le rapport quantité/prix, le consommateur achète un prix au kilo. Deuxièmement améliorer le rapport entre le qualité/son prix, le consommateur est alors prêt à acheter moins de produits mais à une qualité supérieure. Troisièmement, le consommateur-citoyen intègre dans sa conception qualité le coût environnemental du produit. Ces trois classes de consommateur co-existent et sont miscibles, les agricultures répondant aux différentes contraintes inhérentes à ces demandes en existent de même. Notons que le citoyen peut changer de comportement en tant que consommateur mais si le citoyen désire déplacer sa consommation du deuxième vers le troisième point, le consommateur devrait suivre cette tendance à moyen terme de sorte que la qualité de production devienne de plus en plus importante. Aujourd'hui, les agro-industriels réservent une part de marché aux producteurs s'inscrivant dans cette démarche : le critère de durabilité devient une clause d'accès au marché. Appuyé par certains scandales alimentaires (le lait chinois demeure un exemple de prédilection), la qualité de production a le vent en poupe. Ce que l'on retient comme changement majeur dans nos rayons durant la dernière décennie est l'arrivée des produits du commerce équitable qui a ouvert la porte à la gamme bio tous deux basés sur un modèle de production engagée. Sans que cela ne soit aussi visible, le reste des produits industriels suit et a suivi cette même voie : Bonduelle signe ce type d'engagement qualité de production avec ces producteurs, Unilever pratique des audits réguliers de ses fournisseurs sur ces notions, McCain limite l'accès à ses usines aux producteurs détenteurs de GlobalGAP, d'autres industriels demandent vraisemblablement le même type d'engagement.

Si ce ralentissement au niveau de la grande distribution devait impacter profondément le système agro-industriel, il serait important pour l'agriculteur de disposer de potentiels agricoles suffisamment larges pour lui permettre de répondre à de nouveaux modes de mise en marché avec de nouveaux critères. De plus, l'expérience acquise en terme de qualité de production ne devrait pas être perdue mais poussée vers une meilleure valorisation en adéquation avec les préoccupations citoyennes des années à venir, à savoir l'intégration progressive et indirecte de la notion de coût environnemental au niveau de l'alimentation mais aussi et surtout au niveau de son quotidien. L'agriculture ne peut pas passer à côté de cet enjeu et, à mon sens, se doit d'être pro active sur ce point. Des informations et des applications précises doivent appuyer une gestion des sols agronomique visant non seulement une optimisation des intrants mais aussi des services écosystémiques réels.

Une agriculture aux nouveaux enjeux

L'agriculture du XXe siècle a su, avec brio, répondre aux enjeux de sécurité alimentaire même si nombre de personnes dans le monde étaient et demeurent en sous nutrition ou en malnutrition, cette agriculture a su produire ce qu'il lui était demandé de produire. Les reports de stocks existants depuis des décennies sont bien la preuve que le problème de malnutrition ne peut être imputé à la quantité produite mais surtout à d'autres paramètres parfois politiques, parfois économiques comme les guerres, les infrastructures, les capacités d'achat, le manque de défense de certaines populations, des savoirs mal répartis, etc. Les stocks mondiaux ont rarement été vides quand la majorité de la population a rarement mangé à sa faim. Si l'enjeu de la sécurité alimentaire n'est pas qu'agricole, il faudra néanmoins parvenir à des gains conséquents et écologiquement viables de productivité. Les facteurs affectant cette mutation rapide de l'économie alimentaire mondiale sont, selon Tom Arnold (DG de Concern Worldwide et ancien président du comité de l'agriculture de l'OCDE entre 1993 et 1998), le changement climatique et la rareté des ressources, l'évolution des modes de consommation et des structures de marché, ainsi que les chaînes mondiales d'approvisionnement. Au niveau de l'agriculteur, l'évolution des modes de consommation impacte directement sur son mode de production de même que les chaînes mondiales d'approvisionnement le mettent directement en concurrence avec d'autres moyens et types de productions. En d'autres termes, les cours sont communs mais les marchés deviennent spécifiques, une nouvelle classe de produit se crée sous nos yeux. Il fallait produire des quantités suffisantes pour assurer la sécurité alimentaire, la qualité sanitaire des produits s'est ensuite répandue quand la sécurité alimentaire signifiait se nourrir de produits sains, aujourd'hui la qualité de production s'ajoute quand la sécurité alimentaire devient aussi celle de demain. Il s'agit en outre de produire pour répondre à des besoins mais aussi des préférences de marché (on vend des brisures de riz dans certaines régions d'Afrique pour le coût d'accès à l'aliment et du riz bio dans d'autres pour son caractère durable).

Dans cette optique, tant par cette demande sociétale que par la demande de durabilité et de stabilité d'un monde à 10 milliards d'individus, la concurrence pour la terre, l'eau et les ressources va s'amplifier. Largement tributaire de ces points, l'agriculture est au cœur de ces enjeux. Elle est aussi amenée à faire varier ses domaines d'action en rentrant pleinement dans un rôle d'acteur majeur sur les changements climatiques à deux niveaux. Le premier en tentant par tous les moyens à disposition d'amoindrir les effets néfastes de ce réchauffement sur la production agricole, le second en organisant l'équilibre le plus optimum possible entre l'offre alimentaire et la production de gaz à effet de serre, dont la séquestration du carbone dans les sols. Un autre enjeu de l'agriculture de demain sera vraisemblablement le marché de la bioénergie conférant à l'agriculteur non plus seulement un rôle de producteur d'aliment mais un rôle de producteur de biomasse avec de nouvelles perspectives d'optimisation des sols agricoles. Il est encore une autre fonction possible pour l'agriculture de demain qui est parfois évoquée : celle de réservoir génétique. Le potentiel génétique des sols est une ressource extrêmement dense pour les recherches futures notamment pour les domaines des biotechnologies, de la pharmacie et de la phytopharmacie. En 2015, une bactérie du sol a permis aux chercheurs d'isoler la teixobactine, un potentiel antibiotique sans résistance connue et au fonctionnement peu commun puisque ce peptide s'attaque aux lipides des bactéries Gram+ et non aux glycopeptides, défensines et lantibiotiques comme c'est le cas des derniers antibiotiques utilisés. Le potentiel des sols, immense, a encore très peu été exploré et pourrait constituer une source majeure de solutions médicales dans les décennies à venir.

Les intérêts de l'activité pédobiologique se situent à différents niveaux et à différentes échelles.

L'activité biologique des sols et son rôle dans la ressource en eau

Le sol est un acteur majeur du cycle de l'eau. Interface entre l'atmosphère et les nappes, les sols ne constituent cependant pas seulement une phase transitoire de cet élément mais bel et bien la partie principale de ce cycle. Recevant les précipitations et restituant l'eau aux nappes et rivières, les sols altèrent la qualité de l'eau et tamponnent les débits en aval. Une grande partie des mécanismes du cycle de l'eau se déroulent dans le sol et grâce aux activités biochimiques de ce dernier. L'importance des micro-organismes dans ce cycle et leurs rôles d'épuration intéressent les industries de collecte et de fourniture d'eau potable et impactent ainsi directement la fonction agricole. La création des bassins de captage témoigne de l'importance de cette interface sol et de l'importance, au niveau sociétal, que peuvent avoir les activités agricoles. Les pressions pour retirer certaines molécules chimiques de l'usage agricole viennent également en partie de ce secteur.

Le pouvoir épurateur de certaines bactéries du sol limite ainsi les contaminations des ressources hydriques. C'est le même procédé que les stations d'épuration qui font jouer le rôle auto épurateur du sol. Un bémol toutefois, si certaines molécules peuvent être dégradées par l'activité biologique des sols, les produits de leur décomposition ne le sont pas nécessairement et peuvent demeurer dans le sol. Les boues d'épuration montrent bien que cette épuration n'est pas parfaite et sans conséquence sur l'agriculture. Au niveau du sol, l'agriculteur et à plus large échelle la société, n'a pas intérêt à stocker des polluants dans le sol et il n'est sûrement pas plus aisé de décontaminer un sol que de l'eau. Ceci étant, la fonction de filtration de l'eau au niveau des parcelles agricoles concerne essentiellement la précipitation de molécules atmosphériques volatiles d'une part et les effets directs des applications agricoles. Pour ces derniers, la dégradation trop rapide des molécules peut être contre productive. D'autre part, la fraction de sol utilisée en agriculture excède rarement trois à quatre mètres et est donc relativement vite traversée par les eaux.

D'autant plus qu'un sol possédant une bonne activité biologique, notamment une bonne activité lombricienne, va diminuer le temps de passage de ces eaux dans ces horizons. L'effet agricole sur la qualité de l'eau relève donc autant des pratiques que de l'activité biologique des sols. L'activité biologique a en revanche une très forte influence sur la répartition entre les eaux de ruissellement et d'infiltration et possède donc un effet direct sur l'érosion des sols. Un sol rendu plus poreux par l'activité structurante des organismes sera plus à même de stocker de l'eau et d'en restituer une partie aux plantes via l'activité horizontale des vers endogés notamment. D'autre part, cette activité étant indissociable d'un niveau correct de matière organique, l'effet d'éponge de cette dernière va amplifier le phénomène de stockage hydrique dans les horizons explorables par les plantes et favoriser la résistance aux phases de sécheresses. En doublant les taux de matière organique de nos sols, il serait ainsi possible d'économiser l'irrigation sur environ 50% des surfaces concernées. Ce chiffre souligne plus l'importance potentielle de la matière organique et de l'activité biologique en matière de réserve utile qu'un objectif à atteindre.

L'activité biologique des sols et son rôle dans le changement climatique

Deux éléments majeurs seront abordés ici comme étant des facteurs agricoles forts en guise de changement climatique. Le carbone d'une part dont le gaz participe aux fameux gaz à effet de serre (GES) et l'azote pour les mêmes raisons (le protoxyde d'azote a un pouvoir de réchauffement 310 fois supérieur à celui du CO₂). Pour le carbone, le puits que représente le sol se traduit essentiellement par le taux de carbone duquel on déduit le taux de matière organique du sol. La

relation est intéressante puisque l'inverse est vrai également, plus le taux de matière organique est important, plus le carbone séquestré l'est en grande partie. Cette relation s'explique très simplement puisque c'est la définition même de la matière organique, c'est à dire l'ensemble des matières s'articulant autour d'un squelette carboné. De fait, une grande partie des composés biologiques possèdent cette structure (acides aminés, polypeptides, sucres, cellulose et même gaz, pétrole, calcaire si l'on considère les activités biologiques passées). C'est cette faculté du vivant à organiser le carbone et les autres éléments qui fait le lien entre l'activité biologique et la matière organique, ainsi que sa capacité à produire son rétro processus. Le sol est donc aussi un fournisseur de dioxyde de carbone pour l'atmosphère. Compte tenu du taux généralement faible de matière organique dans les sols agricoles, le potentiel puits de carbone est important. A contrario cette matière organique, en se décomposant relâche du CO₂ dans l'atmosphère et il s'agit ainsi de trouver un équilibre entre stockage et libération. A terme, des sols à l'équilibre, même à haut taux de matière organique, ne stockent pas plus de carbone qu'un sol à faible teneur, lui aussi à l'équilibre. Pour être plus clair, les sols ont un potentiel de stockage de carbone tant qu'ils sont en transition d'un modèle à un autre. Une fois l'équilibre atteint, le potentiel de stockage égale le relargage de CO₂.

Cependant, il convient de bien se représenter les différentes formes de carbone et leurs places relatives pour évaluer l'impact possible d'une variation même minime du taux de carbone stocké dans les sols sur la composition atmosphérique. L'immense majorité du carbone se trouve sous forme de roches : environ 99,9% du carbone est sous forme CaCO₃. En rajoutant le carbone dissous dans l'eau des océans, on atteint 99,99%. Le reste est contenu dans l'atmosphère, les sols (y compris pétrole et gaz) et les organismes vivants. Considéré comme inactif du point de vue des émissions de GES, les roches n'interviennent pas dans le réchauffement climatique. Les quatre dernières fractions sont quant à elles interconnectées. Globalement, l'activité humaine génère l'émission de 10 Gigatonnes de CO₂ par an dont 5GT s'accumulent dans l'atmosphère. On considère qu'environ 700GT sont actuellement stockés dans les sols (couche superficielle), environ 17GT en France, soit 60T/Ha en moyenne. Selon l'INRA le potentiel additionnel de stockage du carbone dans les sols agricoles pourrait être de 0,1 à 0,3GT/an pendant vingt ans soit entre 20 et 40 GT dans les politiques les plus volontaristes. A émissions constantes, cela permettrait d'absorber 3 à 4% des émissions françaises. Pour cela, il faut favoriser les entrées (fumiers, composts...) et limiter les sorties. A ce titre, l'essai d'Arvalis mené sur 40 ans à Boigneville montre qu'à l'équilibre un sol en labour et un sol en TCS ne montrent pas de différences significatives sur la capacité de stockage de carbone.

En somme, améliorer la séquestration de carbone dans les sols consiste d'une part à conserver au niveau national les terres à haute valeur carbonée et d'autre part à encourager des pratiques d'apport de biomasse. Le lien avec l'élément azoté intervient ici puisque favoriser le développement de la biomasse revient à améliorer le potentiel de séquestration de carbone dans les terres appauvries. Comme mentionné ci dessus, l'apport azoté présente un risque de volatilisation avec un risque d'aggravation du taux de GES (t.eq. CO₂) émis. L'optimisation de l'efficacité de ce type d'engrais est de facto primordiale afin que d'une part la culture ne connaisse jamais de stress azoté et que d'autre part, les pertes soient limitées au maximum. La difficulté de cette efficacité est de faire concorder la disponibilité en azote avec les pics de consommation de la plante, pics de consommation qui diffèrent d'une espèce à l'autre et qui ne sont pas nécessairement en corrélation avec les évolutions climatiques annuelles favorisant la minéralisation de cet élément. Cependant, la décomposition de la matière organique peut se raisonner comme un apport quasi continu d'azote disponible pour la plante et les relations trophiques de la rhizosphère peuvent stimuler des activités microbiennes favorisant cette minéralisation. Conjointement, les apports exogènes complémentaires doivent se raisonner plus finement et s'effectuer avec des doses modulées et plus faibles afin de limiter les pertes par volatilisation sans oublier que ces apports azotés complémentaires induiront une minéralisation plus rapide de la matière organique et donc une libération plus rapide de l'élément carboné. Les formes d'engrais utilisées sont également importantes d'une part par leur stabilité dans le temps d'autre part par les effets induits sur les organismes du sol.

Pour résumer, augmenter les entrées de matières organiques sur les sols et en limiter les

perdes peut impacter positivement la séquestration du carbone, favoriser ces entrées via la biomasse nécessite une optimisation de la gestion azotée, elle même source de GES. Dans l'ensemble les modèles de gestion fine de ces paramètres ne sont pas développés au niveau agricole mais c'est une voie potentielle d'amélioration des pratiques pour le future. Voie qui passe nécessairement par la matière organique et sa dégradation et donc par la vie dans les sols. Le modèle AMG de l'INRA de Laon et son OAD Simeos-AMG développé par Agro-transfert permet cependant de simuler les évolutions de MO selon différents paramètres d'apports et de pratiques culturales sur le long terme. Enfin, cette évolution possible de séquestration atteint un seuil maximal atteignable en une trentaine d'année au delà duquel le système agricole n'est plus suffisant pour poursuivre la séquestration et où un changement d'affectation des sols deviendrait nécessaire (forêts, prairies permanentes et production alimentaire en découlant) si l'on souhaite poursuivre l'augmentation de la séquestration du carbone dans les sols.

Notons que, dans ce contexte, en 2013, l'Union Européenne a adopté la décision 529/2013/EU qui prévoit de comptabiliser les variations de stock carbonés dans les sols arables d'ici 2021 : une politique de transition donc, mais *de facto* ponctuelle.

L'activité biologique des sols et son rôle génétique

La vie ne s'exprimant pas sans code génétique et compte tenu de la grande diversité potentiellement présente dans les sols, le réservoir génétique des sols est important. Peu étudié jusqu'à présent, il constitue un champ d'exploration important pour les recherches futures. Malheureusement ce bénéfice social n'est pas comptabilisable et peut difficilement devenir une source de revenu complémentaire pour l'exploitant agricole. Il faut toutefois garder cet intérêt à l'esprit dans une optique de revalorisation de l'activité agricole et de son intérêt dépassant la seule production alimentaire.

Enfin, notons que l'agriculture possède également un rôle important à jouer au niveau énergétique tant d'un point de vue d'optimisation de l'énergie solaire que de la production d'énergies utilisables par l'homme. Cette remarque porte également sur les sols et l'utilisation de cette énergie pour le nourrir via la production de biomasse.

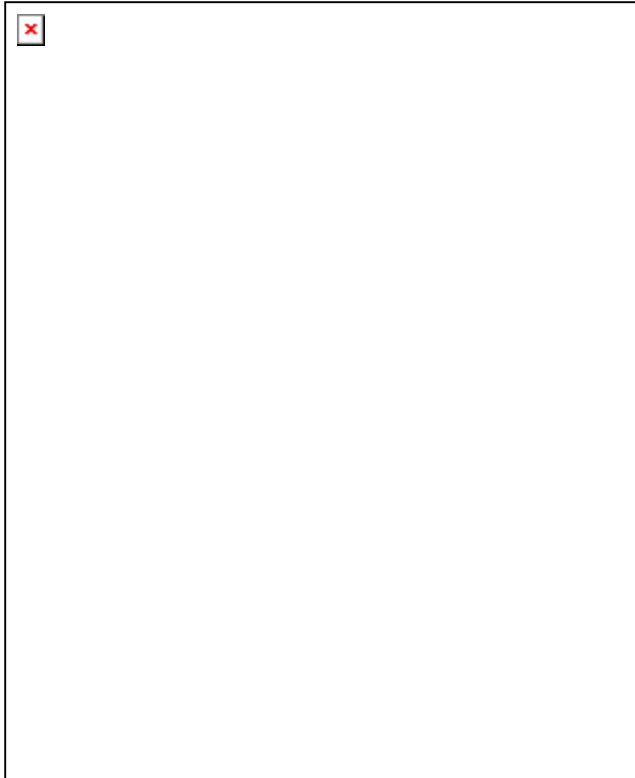
L'activité biologique des sols passe nécessairement par une meilleure gestion des teneurs de matières organiques.

Offrir aux organismes la possibilité de se développer et construire un équilibre entre les populations en corrélation avec ses pratiques, tel est réellement l'objectif de l'agriculteur soucieux de développer la pédobiologie de ses sols. Cela induit fréquemment des remises en question profondes des habitudes.

Limiter l'appauvrissement en teneur organique.

Contrairement à une idée reçue, tous les sols agricoles ne s'appauvrissent pas en matière organique, l'étude du GIS-sol entre les périodes 1990-1995 et 1999-2004 montre des tendances sur dix ans à la baisse mais aussi à la stabilité voire à la hausse en fonction des régions.

Selon cette étude dont la synthèse est disponible sur : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/f/1964/1115/evolution-matieres-organiques-sols-agricoles.html>, 28% des cantons sondés présenteraient ainsi une certaine stabilité, 12% une hausse du taux de carbone dans les sols et 17% présenteraient une baisse significative sur cette période. Notons que les 43% restant correspondent à un manque de données.



D'autre part, la diminution de taux de carbone dans ces sols est en partie due à des changements de destination des sols et non aux modes de culture.

Toutefois, il est admis que certaines pratiques culturales tendent à faire diminuer les teneurs en matière organique des sols. Dans le cas du labour, on parle essentiellement d'une diminution des teneurs par dilution alors que dans le cas de la culture de pomme de terre, il s'agit d'une vraie perte par décomposition et exportation de la parcelle.

Concrètement ces pratiques tendant à appauvrir le sol sont celles modifiant les horizons du sol et exposant la matière organique à une minéralisation intense en surface comme le buttage. La baisse des populations de micro-organismes due à ces bouleversements a un effet inverse en stoppant la dégradation biologique des matières organiques. La fertilisation et la protection chimique sont aussi souvent cités comme des facteurs d'appauvrissement en matière

organique. Certes, la présence d'azote accélère les processus de décomposition mais la protection chimique aurait plutôt un rôle sur la dynamique des matières organiques et non sur leurs teneurs. L'irrigation, dont la fonction est de maintenir un sol frais est aussi source de réduction des teneurs en MO, l'humidité étant indispensable à l'activité biologique. Dernier point moins souvent évoqué mais néanmoins important, les récoltes exportent de la biomasse hors des parcelles en quantités très importantes. Où se situe l'optimum entre le coût total (pertes de MO et d'activités biologiques incluses) de chaque tonne produite et la valeur de marché correspondante ? Est-il réellement au rendement le plus élevé ?

Compenser les pertes et augmenter les teneurs en matières organiques

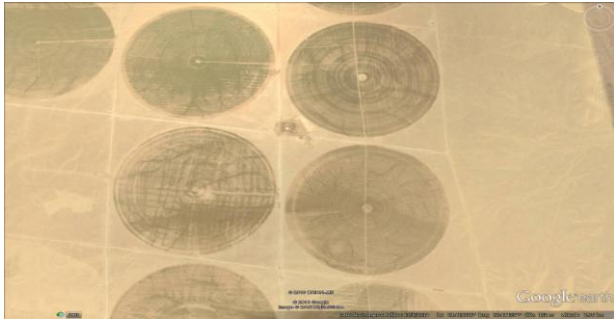
Afin de pallier à la diminution des teneurs en matières organiques dans les sols agricoles, il est au minimum nécessaire de compenser les fuites de matières organiques qu'elles soient anthropomorphiques ou naturelles. Ces apports peuvent être exogènes via la vinasse, les fumiers, lisiers et autres composts ou endogènes via la production de biomasse dans la parcelle et la restitution d'un maximum de biomasse lors des récoltes.

Les apports exogènes ont un coût plus importants (achat, transport, manutention, épandage)

mais permettent d'apporter de nouveaux éléments à la parcelle, a contrario les productions de biomasse endogène ne peuvent que redistribuer les éléments déjà présents dans la parcelle avec, sous certaines conditions toutefois, des enrichissements en azote ou phosphore issus des concentrations atmosphériques. D'un autre côté, les apports exogènes sont ponctuels et massifs et donc source potentielle de débordement des réservoirs d'éléments naturels (interdiction d'épandages hivernaux) et ne favorisent pas une activité biologique continue et une dynamique des populations de micro-organismes équilibrée quand la gestion des productions endogènes entretiennent cette activité biologique équilibrée sans perturbation majeure. A ce titre, deux modes de gestion de ces biomasses sont envisageables. L'une dite « verte » correspond à une gestion où les apports organiques sont restitués sous forme fraîche et souvent massivement par destruction mécanique avec incorporation éventuelle au sol. L'autre dite « brune » consiste à détruire chimiquement ou naturellement (gel, sécheresse) le couvert et à laisser la matière organique s'incorporer au sol au fur et à mesure que les organes de la plante s'étiolent. Cela présente l'avantage de stopper la plante à un stade où sa décomposition biochimique sera optimale et/ou de limiter ses prélèvements sur les ressources hydriques du sol tout en préservant une couverture du sol limitant l'érosion. Utilisée et étudiée dans l'état de Victoria, cette gestion brune permet de contrôler en partie la nature des apports organiques dans le temps mais présente le désavantage de décomposer les phases d'activité biologiques. Dans un premier temps, une activité d'accompagnement de croissance végétative, dans un second temps, un processus de décomposition lent. Tout au long de cette période, le sol reste cependant protégé par une couverture physique, voire, dans la deuxième phase, une protection d'ombrage limitant l'évaporation de la solution du sol, ou son évapotranspiration dans la mesure où toutes les activités du couvert sont stoppées.

La gestion exogène permet de choisir le type d'apport, la date de cet apport ainsi que sa fréquence et de le classer selon sa valeur amendante et ou fertilisante. L'Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO) exprime la capacité de stockage de carbone dans le sol. Il est exprimé en pourcentage et plus celui-ci est élevé, plus la matière apportée est stable dans le temps, ce qui signifie qu'il se décompose moins et doit donc être privilégié pour sa fonction d'amélioration structurante. L'indice C/N est également très utilisé et permet de déterminer la tendance de dynamique de décomposition de la matière : supérieur à 12, la dynamique est faible et la matière organique a tendance à s'accumuler ; inférieur à 10, la dynamique est forte et les teneurs diminuent. Des C/N élevés provoquent des faims d'azote par l'effet des micro-organismes sur la réorganisation de la matière organique. A ISMO et C/N élevé (effet fertilisant direct limité mais incidence à moyen terme sur les teneurs en matières organiques), les produits devraient être appliqués sur des sols pauvres en matières organiques. Si l'effet fertilisant est recherché, des ISMO et C/N faibles seront privilégiés, plutôt dans des sols correctement pourvus.

La gestion endogène ne permet pas cette approche d'amélioration ciblée mais permet toutefois de limiter les pertes. Agro-Transfert dans son modèle Simeos considère que l'obtention régulière de biomasses de 3T en culture intermédiaire a la même valeur d'amélioration en MO que l'apport de 10T de fumier de bovin. En outre, ce mode de gestion permet d'autres avantages agronomiques d'importance comme la protection des sols, le recyclage d'éléments tels que l'azote ou le soufre, une incidence sur l'état hydrique des sols, fractionnement des sols par les racines, etc. Le choix des espèces a également des répercussions sur les cultures suivantes : stock d'azote avec les légumineuses, contrôle des parasites (radis, moutardes nématicides) par exemple. Il est possible de jouer sur le mode de destruction et la date d'incorporation. Dans ce mode de gestion, il est souvent recherché la meilleure biomasse possible en évitant la lignification, et surtout la faim d'azote. Agronomiquement, un apport azoté sur ces cultures intermédiaires en début de cycle serait donc valorisé positivement via une production de biomasse plus importante et assurant plus rapidement les fonctions du couvert. Les mélanges sont également des possibilités offertes par la gestion endogène soit pour les effets individuels des espèces, soit pour leur synergie soit pour assurer que, quelles que soient les conditions climatiques, le couvert sera assuré. Ces paramètres, stricto sensu hors de la problématique de la gestion organique, complètent l'intérêt endogène. Enfin, et surtout, la couverture prolongée, jusqu'à être permanente, des sols induit une activité biologique continue dont



le facteur limitant ne sera pas la présence ou non d'une rhizosphère qui demeure l'interface entre le sol et l'usine énergétique que constitue la photosynthèse.

Ces deux modes de gestion ne sont absolument pas antinomique et se complètent relativement bien dans une démarche de redressement des taux de teneurs organiques. Les possibilités agronomiques sont nombreuses mais doivent toutefois demeurer concordantes avec les réalités de la parcelle. Des fientes dans les sables pour remonter le taux d'humus à moyen terme associées à l'implantation de légumineuses en interculture début septembre dans le nord de la France risquent d'être peu concluants.

L'idée de modifier la texture des sols afin de favoriser la CEC et d'optimiser la présence de matière organique dans certains sols prend particulièrement de l'intérêt dans les cas extrêmes. C'est le cas notamment de certains sols australiens fortement sableux en surface mais reposant sur une couche d'argile profonde. Le travail en profondeur permet de remonter cette argile et a un double intérêt. Dans ce contexte, l'intérêt premier est évidemment d'améliorer la texture du sol et d'augmenter la réponse aux faibles précipitations, à plus long terme, ce renforcement en argile peut permettre de mieux gérer les résidus et d'optimiser les intrants en en conservant une plus grande partie dans le sol. Cette idée peut être étendue à des actions plus radicales. En Egypte, autour de la ville de Samalut (Al Mynia), des périmètres irrigués voient le jour au milieu du désert. En dépit de l'eau présente en abondance dans le sous sol, on remarque des veines de cultures beaucoup plus développées. La vue satellite montre bien l'impact historique d'un réseau hydrographique vieux de plusieurs milliers (millions?) d'années. Dans ce rêve égyptien d'irriguer la vallée du Nil et de produire plus de denrées agricoles, la livraison régulière d'argile par camions est une option envisageable, même sur trois milles hectares. Un investisseur souhaitait même reconstituer entièrement un sol agricole en important de la terre issue des terrassements de différents sites d'urbanisation. Proches de la vallée du Nil, ces sites offraient une terre alluviale et surtout possédant déjà une activité biologique et l'ensemble des qualités nécessaires à l'agriculture. Effectivement, dans ces sols trop sableux pour maintenir des teneurs de matière organique, ce type d'amélioration foncière est une condition *sine qua non* pour parvenir à gérer la ressource hydrique. Une des idées derrière cette amélioration était de valoriser les fientes de volailles issus d'un atelier de poules pondeuses qui étaient actuellement revendues car pas assez bien valorisées sur le site sablonneux. Ainsi, chaque type de sol et chaque système agricole doit être en mesure de savoir raisonner ses apports exogènes en fonction de ses contraintes et potentiels.

Favoriser l'activité biologique des sols

Avoir des teneurs en matières organiques compris entre 2 et 4% ne suffit cependant pas à assurer une activité biologique dans nos sols. Des teneurs importantes sont même parfois le signe d'une activité faible. Les tourbières en sont l'exemple le plus extrême. Viser des teneurs élevées est donc une gageure. Ce sont bien les étapes d'humification et de minéralisation de ces matières qui possèdent un intérêt agronomique majeur et ces étapes sont directement corrélées à l'activité biologique. En ce sens, l'étude des **flux de matières** est bien plus important que l'étude de l'état des teneurs.

Afin de favoriser cette activité biologique, certains paramètres sont primordiaux. Les facteurs suivants, non exhaustifs, en sont les principaux conditionneurs:

- La texture du sol (complexe argilo-humique)
- L'état d'oxygénation (asphyxie hydrique, tassement).
- L'humidité du sol (tassement, périodes climatiques)
- La température (périodes climatiques)

– La biodiversité initiale (destruction des microsystèmes par les façons culturales)

- La texture du sol conditionne la capacité de lier les éléments organiques et de les rendre biodisponibles.

L'activité biologique des sols est possible dans tous les types de sol, du plus sableux au plus argileux mais est plus ou moins importante. Mais surtout, l'impact de cette activité sur la composition en éléments biodisponibles pour les plantes varie en fonction de la texture. Afin de créer des complexes argilo humiques (CAH) faisant office de stock faiblement liés au sol, la présence d'argile dans des quantités minimums est indispensable. Cette argile possédant également des qualités de mise en réserve hydrique, elle est souvent recherchée par l'agriculture dans un premier temps en tant que facteur d'amélioration physique de la qualité des terres agricoles. Elle permet en outre de fixer les éléments au sol et en améliore sa fertilité minérale. Dans une optique de perdurance humique, l'argile est également primordiale car elle permet, outre les CAH, de réunir assez facilement certains des autres facteurs nécessaires à une bonne activité humique. Aération par les phases d'humectation/séchages et humidité par les complexes ionisés qu'elle forme. Un sol sableux ou limoneux aura plus de mal à conserver les métabolites de l'humification qu'un sol argileux ce qui se traduira par des apports plus fréquents en matière organique pour une teneur similaire.

- L'aération du sol contribue à une activité biologique aérobie performante sur le plan des transferts énergétiques.

L'aération d'un sol est impactée par l'activité humaine mais aussi son activité biologique. Dans des conditions aérobies, le processus de respiration, par opposition à la fermentation, permet de métaboliser des molécules plus simples et de dégager de ce catabolisme une quantité d'énergie bien supérieure à la voie anaérobie. Dans ce système, métabolites et développement des populations permettent de rendre biodisponibles une grande quantité d'éléments qui resteraient fixés dans les liaisons chimiques de molécules moins dégradées.

Afin de parvenir à un sol correctement aéré, il convient de jouer sur sa structure soit par des actions anthropiques soit par des actions biologiques. Dans le même temps, limiter tassements et inondations limite voire annule le besoin d'un recours anthropique.

Le Control Traffic Farming (CTF) développé entre autre chez MM. Swift, New South Wales, consiste à consacrer des parties de parcelles aux engins motorisés. Les voies des tracteurs et les largeurs d'outils sont adaptés en conséquence et l'utilisation de GPS permet, année après année de conserver ces passages . Le reste de la parcelle ne reçoit jamais ou qu'occasionnellement des roues de tracteur. En conséquence, le tassement est fortement limité sur la partie productive du champ : racines et organismes du sol effectuent la création des porosités améliorant l'infiltration de l'eau et l'aération du sol. La rotation doit donc être adaptée afin que la parcelle ne reçoive que des cultures adaptées à cette largeur de travail imposée, l'utilisation du GPS permet de s'affranchir d'une partie de ces contraintes en permettant une déconnexion entre les largeurs de travail et le recouvrement sur semoir.

Dans cette idée de laisser le sol assurer lui même une porosité biologique et de bouleverser le moins possible la structure du sol, la technique du strip till permet de ne travailler que la partie semée (en écartement de 45, cette partie semée ne représente que 10 à 15% de la parcelle). A la clef, un sol apte à permettre le développement des racines sous la graine et une activité biologique préservée de la destruction mécanique des outils. Cette technique a toutefois un champ d'application plus restreint puisqu'elle ne concerne que les cultures à écartements importants et ne concerne que la phase de semis.

Enfin, l'abandon de toute introduction d'éléments ferreux dans le sol (charrues, herses, fraises, etc.) constitue l'aboutissement de cette idée de laisser le sol assurer son propre

fonctionnement et créer sa propre porosité.

Dans toutes ces techniques, il est impératif de ne pas anéantir le travail de plusieurs années par des opérations en mauvaises conditions. La récolte notamment doit s'effectuer sur sol portant et sec. Ce n'est pas toujours le cas dans les cultures industrielles ou les impératifs d'usines peuvent primer sur les impératifs météorologiques. En outre, certaines cultures ne peuvent pas être pratiquées, notamment celles nécessitant des cycles longs dont les périodes de récolte correspondent à des périodes potentiellement pluvieuses (maïs, pomme de terre dans le nord de la France par exemple).

Plus conventionnellement, la solution classique du labour permettant à la fois de déstructurer un sol tassé et d'enfouir les graines d'adventices est privilégiée par beaucoup d'agriculteurs. Elle présente le défaut majeur d'engendrer un bouleversement profond du sol et de limiter le développement des populations du sol et par conséquent sa capacité à assurer un fonctionnement biologique optimal de ce dernier. Ces labours, s'il a été décidé de les conserver, devraient être mieux raisonnés en prenant en compte l'état hydromorphique du sol mais aussi les températures de celui-ci afin de minimiser tant que faire se peut son impact sur la biologie des populations en place.

- L'humidité du sol et la température impactent le développement et la mobilité des populations du sol.

Outre l'oxygène, l'humidité du sol influe sur le développement des populations en les préservant de la dessiccation et en assurant une certaine mobilité de celles-ci, soit via la solution du sol soit en améliorant la plasticité de celui-ci. Les températures, en favorisant les réactions biochimiques, favorisent les vitesses de développement des populations et par conséquent d'humification et de minéralisation. Dans un climat chaud et humide, la matière organique a des cycles très courts ; maintenir une activité biologique en permanence demande donc un apport permanent de matière organique. A Madagascar, le CIRAD a ainsi développé des systèmes de semis direct sous couvert végétal afin d'assurer cette perdurance. Fait intéressant, chaque micro-région possède un système différent et adapté aux conditions météorologiques locales, aux cultures pratiquées ainsi qu'aux risques divers (inondation, sécheresse par exemple). Dans l'Aisne, sous un climat un peu moins tropical, le processus de minéralisation est moins rapide et limité par les températures hivernales. En été cependant, sous l'irrigation nécessaire à des cultures à forte valeur ajoutée, ce processus est également assez rapide. Sous pomme de terre, culture réputée pour provoquer un appauvrissement en matière organique dans les sols (irrigation, surfaces de sol exposées à l'air par les buttes et exportation de terre attenante aux tubercules -souvent argileuse-), cet appauvrissement peut être prévenu par des apports massifs anticipés (humokal ou vinasses par exemple) ou par des apports correctifs après culture. Une autre approche s'inspirant du modèle de SDSCV serait de mettre en place à l'automne une couverture d'engrais vert (éventuellement sur labour précoce) résistant au gel et de le conserver jusqu'à la plantation sous une forme non lignifiée (variétés de moutarde à montaison très tardive).

- La biodiversité initiale conditionne la capacité du sol à développer des populations variées et suffisantes.

Toutes les conditions étant réunies, l'activité biologique d'un sol dépend fortement de son état initial. On considère généralement qu'il faut environ quatre ans pour développer une activité biologique suffisante pour assurer les différentes fonctions évoquées dans ce rapport et que plus le système est diversifié et ancien, plus il est résilient. Cela dépend énormément de l'activité biologique initiale mais aussi du type de système que l'on souhaite mettre en place. Il est clair que la recolonisation biologique d'un sol ne se fait pas uniquement en ajoutant du fumier. Cependant, mycorhize, inoculum *Rhizobium japonicum* sur soja, *Coniothyrium minitans* contre le sclerotinia se répandent déjà en grandes cultures industrielles. Attention toutefois, ces inoculations ont des actions très ciblées et reconnues indispensables. Les inoculations globales de micro-organismes en bidon

apportent rarement la garantie de l'amélioration du système car leurs compositions ne sont pas nécessairement adaptées à l'itinéraire de la parcelle.

3 Créer et entretenir une activité biologique des sols au sein des exploitations

Comme il a été vu auparavant, gérer l'activité biologique des sols ne se résume pas à apporter de la matière organique sur ces derniers. Il faut que les conditions préalables de modalités culturales soient compatibles afin de bien valoriser cet apport qu'il soit exogène ou endogène. Cependant, sans cette matière organique, quasiment aucune activité biologique n'est possible.

Des matières organiques à définir selon les sols et les objectifs.

Plus que la matière organique, ce sont ses flux qui rendent pertinente l'approche en terme de fertilité des sols et d'activité biologique, non seulement pour la phase d'humification/minéralisation mais aussi sur son potentiel effet de protection (équilibre prédation/parasitisme, biodiversité génétique, résilience du système, etc.). Ainsi suivant l'objectif poursuivi par l'agriculteur, l'apport organique doit varier.

- Une approche purement fertilisante visera des unités d'éléments fertilisants à un prix intéressant avec des effets sur la vitesse de libéralisation des éléments, c'est l'effet vinasses de sucrerie sur betteraves ou pomme de terre.
- Une approche structurante visera une vitesse de décomposition plus lente avec des matières organiques sous forme difficilement décomposable. En sol sableux, cet effet limitera également les pertes dues à une minéralisation éclair. Ce sont alors des matières organiques de type broyats de déchets végétaux très lignifiés et plus ou moins grossiers. Du tout venant de branches en décomposition peut également faire l'affaire (comme il peut être pratiqué en Touraine).
- Une approche court terme tablera sur des éléments riches en azote et se décomposant rapidement. Les composts de fientes de volailles ont cet effet. Compte tenu de la vitesse de décomposition, l'effet à deux ans est très limité, celui à plus long terme nul s'il n'est pas suivi.
- Une approche d'entretien est plutôt orientée vers des éléments stabilisés à vitesse de décomposition intermédiaire.
- Une approche autonomie misera sur l'apport de matière organique issu de la mise en place des couverts obligatoires de CIPAN. Selon les objectifs, date de destruction et variétés pourront jouer sur le taux de lignification et donc le pouvoir structurant ou engrais de la culture. Le retour des résidus de récolte s'inscrit également dans cette approche.
- En Tasmanie, la diversification vers la transformation d'huile de colza en carburant permet de récupérer des tourteaux qui sont compostés après avoir été mélangé à des déchets issus de la transformation de produits de la pêche, cette nouvelle activité génère donc un co-produit dont le travail de compostage et de mélange permet de faire varier la composition. Ce compost est ensuite utilisé sur les cultures. L'objectif est ici l'autonomie organique rendue possible par l'activité raffinage.
- Plus classiquement, l'autonomie organique peut également être atteinte par les activités d'élevage. Ces matières peuvent être transformées par compostage ou par l'adjonction de produits riches en micro-organismes décomposeurs afin de stabiliser le produit et de le rendre plus rapidement assimilable pour les cultures. On peut alors perdre un peu d'effet de structuration physique des sols en raison d'une grande proportion de pailles pré digérées par ces organismes. En contrepartie, la structuration biochimique est améliorée si le taux d'argile est suffisant. Attention donc aux limon-sableux battants où l'effet structurant sera moins fort dans un premier temps.

Entretien la biologie des sols passe par un raisonnement sur la rotation et les textures de sol.

En agriculture industrielle, nous l'avons vu, la liberté d'intervention dans les parcelles est réduite afin de pouvoir répondre aux besoins des usines. Cela concerne les dates de récolte et parfois d'implantation de la culture et conditionne en partie les passages en parcelle. Dans le même temps, la rentabilité de la culture en place se joue sur l'obtention d'une qualité minimale acceptable pour la bonne transformation industrielle et le rendement au sein de cette qualité. Clairement l'accent de productivité est alors orienté vers le rendement. La gestion des sols est secondaire pour la culture concernée et deux stratégies de gestion peuvent s'opposer et se compléter. La première de ces stratégies est de gérer la vie des sols à l'échelle de la rotation en acceptant une dégradation de cette biologie l'année où une culture industrielle est implantée et en tentant de stimuler cette activité dans le reste de la rotation. Cette dynamique par à coups présente le désagrément de consacrer une partie de l'énergie contenue dans les sols à des développements rapides et massifs des populations d'organismes aux dépens de l'humification et de la minéralisation. Cela se traduit par une reprise de ces processus plus tardive et plus lente.

La seconde stratégie consiste à ensemercer le sol avec des micro-organismes spécifiques visant à rétablir au plus tôt une population satisfaisante. Sur les cultures d'automne suivant une culture aux résidus particulièrement difficiles à dégrader cela peut permettre un meilleur lit de semence et une plus rapide biodisponibilité des éléments issus de la dégradation de ces résidus ligneux. Sur les cultures de printemps implantées précocement, l'effet semble plus aléatoire car le climat (essentiellement les températures) ne permet pas de valoriser cet ensemencement. Pour les cultures de printemps plus tardives nécessitant un sol réchauffé, et pour lesquels l'activité biologique a repris, on peut rechercher un effet « boost » en concentrant la biodisponibilité des éléments autour de la levée pour accompagner au mieux le développement des plantules et gagner quelques jours de végétation, gage d'un gain de rendement. Cela ne peut cependant pas se substituer à un entretien organique régulier et au suivi attentif des structures de sols.

En plus de cette activité de dégradation, l'inoculation présente un avantage potentiel en permettant l'introduction de micro-organismes spécifiques apportant un gain pour une culture cible soit en améliorant sa fertilisation soit en la préservant de certains pathogènes. C'est le cas du Contans, antagoniste du développement des sclérotés sur légumineuses. C'est aussi l'inoculation des graines de soja par *Rhizobium japonicum* permettant l'enrichissement de la plante et du sol en azote ou encore potentiellement des mycorhizes sur pommes de terre par exemple. (L'essai mycorhize mené sur la ferme en 2012 n'a pas apporté de résultat probant. La répétition de ces essais en 2015 et 2016 au sein de la coopérative légumière ne semble pas présenter plus de résultat bien que l'impact ait ponctuellement été constaté.)

Quoiqu'il en soit, l'utilisation de ces inoculats, dans la mesure où ils constituent une charge économique supplémentaire ne peut pas se faire pour le plaisir et doivent être réfléchis en fonction des gains attendus et vérifiés sur l'exploitation pour la culture considérée voire pour la variété. La mycorhize en est un bon exemple avec des gains de rendement attendus sur des variétés à petit calibre provenant principalement d'un gain de calibre mais dont l'effet agronomique est amoindri dans le cas des variétés à gros calibre (tous les tubercules sont déjà dans le calibre commercial). En conséquence, l'intérêt agro-économique peut se vérifier sur certaines variétés et conditions, sur d'autres il s'agit d'un investissement à perte. De la même façon, l'effet « boost » recherché par un processus de minéralisation accéléré par l'inoculation de micro-organismes peut être obtenu plus économiquement par la localisation de l'engrais. De plus, cette minéralisation accélérée induit une diminution accélérée du taux de matière organique ligneuse, le flux de transition entre les différents états de matière organique est déplacé et la stabilité des populations de micro-organismes affectée. Cependant, d'autres effets complémentaires (friabilité, préparation du lit de semences) plus difficilement chiffrables sont apportés et peuvent justifier l'utilisation de ce type de produit par

l'obtention d'une meilleure germination par exemple ou limite l'impact de ravageurs comme les limaces en supprimant leur habitat à court terme (dégradation des pailles).

Dans les cas de cultures pures (*id est* non associées) comme c'est souvent le cas en agriculture industrielle, le développement des populations de micro-organismes va être orienté par le stade de la culture. Sur colza par exemple, les restitutions organiques seront plutôt avec un C/N faibles au printemps (feuilles gelées puis pétales) puis forts à la récolte (tiges lignifiées). Seule, une culture induit donc un fonctionnement compartimenté dans le temps des activités du sol. La rotation permet alors de varier les types d'apport, ainsi que les dates d'apport. A ce titre, les cultures intermédiaires participent pleinement à cette diversification et à la linéarisation des apports. On se rapproche, même si on en est loin, de la logique des semis sous couverts avec la logique de couverture prolongée des sols et surtout d'apports continus d'éléments organiques. Le choix de ces couverts, leurs stades au moment de la destruction ainsi que leur positionnement au sein de la rotation permettent donc de privilégier certains types d'apport. Enfin, au sein de la rotation, les apports exogènes de matières organiques peuvent s'alterner dans le but d'obtenir des réservoirs organiques de différentes natures plus ou moins stables.

La rotation impacte directement la nature de la matière organique restituée et de facto la réponse biologique des sols. Avec cet angle de vue et une approche **flux de matière organique**, la rotation peut évoluer selon le type de sol de la parcelle et doit inclure lors de sa composition les couverts intermédiaires ainsi que les apports organiques extérieurs. Classiquement, une terre sableuse en système industriel reçoit beaucoup de plantes dont on récoltera les organes souterrains car elle facilite la préparation de sol et limite les exportations de terre à la récolte. Dans ce cas, elle bouleverse fréquemment les horizons avec les labours, les mélange avec un travail supérieur à 15cm pour les buttes de pomme de terre et les perturbe une fois encore avec la récolte. Il est difficile dans ce cas de composer une couche humifère de surface protégeant le sol de l'érosion et, dans le cas de limon sableux, de la battance. Dans ces conditions, favoriser la vie du sol semble délicat, pourtant l'hydratation des horizons tout au long de l'année par l'irrigation ainsi que l'aération en profondeur due à ces bouleversements de sol sont théoriquement bénéfiques à cette activité. L'objectif de protection des sols est difficilement compatible dans ce type de rotation plus du fait de la rotation que des apports organiques complémentaires ou que par la capacité de réponse biologique dans des sols ou tous les paramètres favoriseraient cette dernière à condition d'avoir des populations en quantité. L'introduction d'une couverture plus longue, rendue possible par les cultures intermédiaires, favorise la régénération de ces populations mais seul le changement de rotation associant un changement de pratiques pourrait éviter la dilution de l'humus créé dans les horizons travaillés. Le recours à des plantes pluri-annuelles type luzerne permettrait dans ce contexte d'enrichir le sol, non seulement en azote mais aussi en micro-organismes et en humus. Cette possibilité retire cependant de la SAU des terres en rotation pour les cultures avec un organe de récolte souterrain. De la même manière, ces sols gagneraient à posséder un compartiment de matière organique difficiles à décomposer assez important quand des matières organiques fraîches se décomposeront rapidement avec un effet sur le sol gommé par l'effet dilution du labour ou de la récolte (NB : dans le cas de cultures où l'organe souterrain est récolté, le labour n'est pas l'unique phénomène de perturbation des horizons ; s'en passer ne règle donc pas le problème de dilution). En outre, la protection physique de matière organique non décomposé limite l'effet splash, la battance et l'asphyxie du sol. Il s'agit donc, dans ce cas précis, d'adapter une rotation adéquate amenant des organes lignifiés retournés à la parcelle avec une dégradation lente. De plus, les faibles taux d'argile de ces parcelles ne permettent pas de stocker les éléments sur des complexes argilo-humiques peu présents. Ces éléments doivent donc être produits le plus lentement possible afin d'être toujours utilisés par la culture... et il faut donc une culture le plus souvent possible : il faut intensifier ces parcelles.

Dans un sol aux caractéristiques texturales opposées, une argile forte par exemple, le

problème se conçoit différemment. Ces parcelles sont plus fréquemment exemptées de cultures aux récoltes souterraines et/ou tardives mais peuvent recevoir des cultures industrielles dont les dates de récoltes seront mal maîtrisées ou dont les plantes ont un besoin hydrique important comme le maïs qui valorise bien ces terres mais dont la récolte peut s'avérer difficile et déstructurante ou tassante. Reprendre ces terres dans ces conditions est délicat car le tassement y est profond et la texture mal adaptée à un émiettement. L'action d'un décompacteur en condition humide y aura des résultats très limités notamment à cause de son action coupante et cloisonnante sur ces argiles. Le climat y est alors fortement déterminant, notamment par le gel. Pour s'affranchir de cette contrainte, le labour n'est pas la solution et il est donc indispensable de miser sur l'action du sol et sa composition organique. Du fait du fort potentiel de création de complexe argilo-humique et du bon maintien des éléments fertilisants dans la parcelle pour les cultures à suivre, l'effet d'une humification rapide y est théoriquement bien valorisé et entraîne une augmentation de la population de lombrics à même d'aérer et drainer efficacement les horizons superficiels. Quand c'est possible il conviendrait alors de réaliser un labour précoce et faiblement profond sur lequel planter une culture intermédiaire à développement rapide détruite par le gel ou destructible aisément au printemps voire de se passer totalement du labour. Le raisonnement se place également sur l'ensemble de la rotation compte tenu que derrière une récolte tardive en mauvaises conditions les actions anthropiques seront systématiquement délicates. Si la stratégie de gestion de la matière organique y est différente qu'en sols sableux, l'intérêt d'obtenir une couverture végétale la plus longue possible y est le même en favorisant une activité régulière.

Des pistes d'améliorations possibles en système industriel

Comme il est communément admis que les TCS au sens large sont actuellement peu voire pas compatible avec des systèmes betteraviers et pomme de terre, voire avec certaines cultures aux contraintes industrielles fortes, les pistes d'amélioration pour favoriser la biodiversité et l'action des sols ne peuvent venir que de la gestion de la rotation et du bon sens à l'utilisation des outils. Cela implique de revoir quelques méthodes de prévention et de s'affranchir des méthodes correctives traditionnelles dans la mesure du possible.

Gérer les tassements de sol

La méthode du contrôle de trafic s'applique difficilement dès lors que l'arrachage des pommes de terres ne peut se faire qu'en 1m80 ou 3m60 en espacement 90 (pour être multiple de betteraves à 45cm). Des passages seront nécessairement créés à la récolte. Dans ce type de culture, cette option n'est pas envisageable.

L'équipement en chenilles est une option intéressante dans le travail sur la compaction des sols mais elle est extrêmement coûteuse. L'équipement basse pression, moins performant pour le sol mais plus accessible et pouvant équiper les bennes est une alternative intéressante à mettre en place. D'autant que suivant les besoins, l'équipement peut être ajusté à la bonne pression.

Les conditions d'intervention sont primordiales, ainsi que le poids et le nombre d'engins circulant dans le champ. La récolte de pomme de terre et de betterave avec des engins lourds et des rendements élevés dans des conditions parfois difficiles sont fortement limitantes de ce côté. Une réflexion sur un retour à des chantiers décomposés utilisant de moins grosses machines et permettant de centraliser la récolte sur des bandes tous les 7m20 par exemple en pomme de terre permettrait de diviser la surface roulée par les bennes par deux mais aussi d'optimiser les chargements. En outre, l'investissement initial en coût matériel serait réduit et compte tenu de l'écart de coût permettrait de compenser le coût de main d'oeuvre supplémentaire sur les chantiers de récolte. Les dates de récolte seraient toutefois allongées avec un impact modéré sur l'effet tassement dû à la réduction des bandes de roulement. L'impact principal se trouverait alors sur les chantiers

concomitants tels que les semis de blé. A noter que ce fractionnement de chantier pourrait aussi limiter l'impact de pannes sur le chantier de récolte en créant un tampon entre la récolte et l'enlèvement de la culture.

Un bémol est toutefois à apporter dans la mesure où ces chantiers peuvent être assurés par des ETA et où le producteur n'est alors pas maître des investissements de récolte, ou dans le cas des productions à traiter fraîches (légumes verts) où ce délai récolte/enlèvement doit être le plus court possible. Les innovations technologiques et la robotisation pourraient amener une réponse à ce problème dans le futur en multipliant le nombre de machines contrôlables par un opérateur et donc en réduisant le poids de celles-ci. Les gains de productivité devraient alors être amenés par la multiplication des unités et non leurs capacités individuelles.

Maintenir la structure par une couverture longue

Comme nous l'avons précédemment évoqué à travers l'exemple malgache, maintenir une couverture longue et une rhizosphère active est important dans l'optique d'une gestion efficace des populations des organismes du sol. Si l'action racinaire des plantes ne suffit majoritairement pas à restaurer une structure dégradée, elles n'en sont pas moins efficaces pour maintenir et quelque peu corriger une structure correcte. Qui plus est, elles assèchent le sol et allongent les fenêtres d'intervention en conditions humides et favorisent les actions biologiques. L'obligation de cultures intermédiaires est une opportunité à optimiser afin de valoriser au mieux l'énergie reçue par la parcelle et un retour de cette énergie via le sol. Ce transfert de l'énergie solaire vers une énergie mécanique maintenant la structure a plusieurs facteurs limitants potentiels. La couverture ne doit pas être limitée dans sa croissance par une faim d'azote soit provoquée par une dégradation des résidus soit provoquée par une absence d'azote dans le sol. Les populations d'organismes doivent être présentes en quantité suffisante pour assurer ce transfert d'abord depuis la rhizosphère puis depuis les résidus de couverts. Cependant, ces couverts ne doivent pas gêner l'implantation de la culture à suivre. Cette contrainte peut être affranchie avec des outils de semis de type semis direct possibles en céréales mais doit être gérée en amont lors de semis de précision type betterave/haricot. Prohiber les sols nus dans cette limite semble donc être garant d'une valorisation de ces couverts d'interculture.

Afin de rendre possible cet allongement de couverture (et toujours dans l'hypothèse d'incompatibilité des TCS et des SDCV avec le système étudié), il peut être intéressant de casser les modalités de labour et d'implantation de couverts et d'inverser ces deux chantiers sous certaines conditions. Si la pomme de terre constitue une contrainte forte dans la gestion des sols en règle générale, cette culture propose ici une possibilité intéressante. Un labour ultra précoce à profondeur réduite (18cm) en bonnes conditions suivi d'un semis de couvert intermédiaire à la volée bénéficiant de la fraîcheur du labour pour assurer une installation correcte de la culture directement sur les sillons. Ce couvert sera maintenu au long de l'hiver et détruit par le gel ou la reprise de labour. Dans le premier cas, on bénéficiera de l'intérêt d'un engrais brun s'inspirant de la méthode vue au Victoria, Australie, bien que différente par la durée de son apport passif et temporisé au sol mais dont la protection physique du sol et sa porosité sont maintenues par une couverture inactive. La lignification de la culture intermédiaire devrait être plus rare car semée plus tardivement qu'une CI classique et donc sa dégradation moins gourmande en azote, cependant, une lignification modeste reste envisageable puisque la préparation de la butte va affiner le sol et briser les éventuelles tiges.

Dans le cadre d'une culture de betterave, la destruction de la culture intermédiaire par le labour l'intérêt est également de relever le fond de labour à une vingtaine de centimètre afin d'une part de moins diluer la matière organique, d'autre part d'intervenir dans des conditions de ressuyage du fond de raie plus maîtrisée et enfin de laisser un profil labouré riche en élément organique frais voire ligneux afin de favoriser une tenue du labour et de sa structure par les résidus. En se décomposant ceux-ci seront à même de laisser des fissurations dans le sol améliorant théoriquement l'infiltrabilité du sol et favorisant son ressuyage. Dans ce cadre, des variétés fortement géligive seront

à privilégier afin de limiter le phénomène de reprise. La lignification renforce ce phénomène de maintien physique de la structure mais conduit à une faim d'azote sur la culture. Il est alors d'autant plus important d'apporter au plus près des racines l'azote nécessaire correspondant par un engrais localisé. Dans l'idéal, la décomposition de la matière ligneuse consomme l'azote dans l'inter rang au détriment du développement des adventices. Dans ce schéma, le surcoût d'azote est compensé par la réduction possible en localisé.

Partir d'une base saine

C'est un des points délicats de la situation actuelle : les parcelles sont reprises d'année en année et s'il y a peu de dégradation globale, les améliorations sont lentes également. Il conviendrait donc de pouvoir lorsque cela est nécessaire corriger des défauts de structures importants par l'intermédiaire de culture pluriannuelles de type luzerne. L'intérêt agronomique de cette plante n'est pas à démontrer et son intérêt économique industriel peut rendre cette option intéressante à condition d'avoir accès au marché de la déshydratation... ou de s'en affranchir par une utilisation différente. Parmi les cultures pluriannuelles ayant un impact agronomique fortement positif, on retrouve également le sainfoin, le lotier et l'ortie. La valorisation économique de ces cultures demeure toutefois discutable, même en intégrant les services écosystémiques. Des valorisations tierces sont toutefois envisageables dans le cadre de systèmes circulaires avec des éleveurs et des échanges luzerne/fumier.

Compte tenu du haut pouvoir régénérant de ce type de culture, il est possible d'envisager une rotation agronomique avec un semis de luzerne à la volée sous orge de printemps, effectuer une première fauche post récolte puis gérer la luzernière sur deux années complètes avant une destruction mécanique partielle début automne avec l'objectif d'implanter un colza, une couverture intermédiaire non ligneuse, oignons, blé, labour précoce, couvert intermédiaire sur labour, pomme de terre, blé. Compte tenu de la forte mobilisation des terres pour la culture de luzerne, cette rotation serait à réserver à des parcelles à rattraper en terme d'activité biologique des sols. L'avantage de cette rotation est la disponibilité azotée dès l'automne pour le développement du colza (on peut estimer à 80U les reliquats de luzerne en première année) et pour les oignons suivants (40 à 50U fournie par le sol avec un développement de culture intermédiaire important). La pomme de terre n+4 ne bénéficie plus de l'effet luzerne mais avec trois récoltes estivales aux probabilités importantes de récolte sur sol sec, on peut estimer que le risque de dégradation du sol est réduit. On peut également envisager un colza/repousses puis blé puis deux cultures de printemps type orge puis pomme de terre afin de conserver une parcelle plus propre grâce à la méthode 2+2 : deux cultures hivernantes afin de gérer les adventices type hiver puis deux cultures de printemps pour les levées de printemps. L'alternance se joue également sur l'aspect mono/dicotylédones afin de gérer simultanément les familles d'herbicides. L'introduction rapide de deux cultures à résidus ligneux permet de bénéficier de l'azote de la luzerne pour la dégradation des résidus de culture.

//llustrations graphiques et applications

En reprenant le développement des cultures au cours du cycle, il apparaît que les possibilités de captation énergétique des rotations sont relativement faibles avec, à la clé, un potentiel productif diminué tant en terme d'énergie non valorisée que de potentiel d'utilisation de cette énergie pour produire de la matière organique et recycler les éléments nutritifs. Le graphique ci dessous reprend en vert foncé les capacités de quelques cultures à capter l'énergie lumineuse et en vert clair, les potentiels de développement des cultures non commerciales (engrais verts, CIPAN). Globalement, sur un assolement type blé 50%, colza 10%, betterave 20%, Pomme de terre 10%, Oignons 5% et Flageolets 5%, il apparaît que seule 51% de l'énergie lumineuse reçue à la parcelle est utilisée. En intégrant des couverts d'intercultures longues, on peut gagner 7% d'efficacité. La culture de

flageolets est particulièrement pauvre en terme de captation lumineuse avec un cycle court et une grande période de pré semis où le sol demeure nu, ainsi qu'une récolte un bon mois avant les semis de blé. Un semis de colza, plus précoce pourrait être envisagé afin de réduire cette période post récolte et de valoriser les résidus azotés de la légumineuse.



Illustration 3: Répartition de la captation de différentes cultures

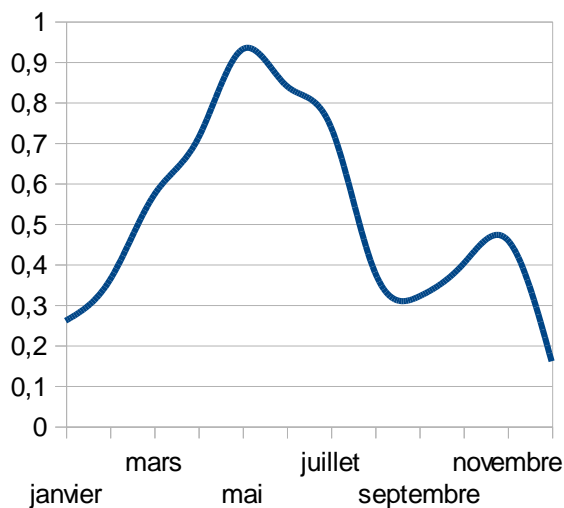


Illustration 4: Efficience de captation sans couvert

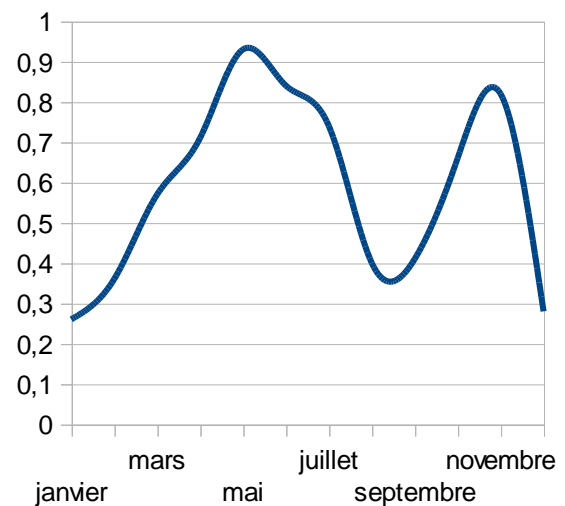


Illustration 5: Efficience de captation avec couvert

Les mois d'hiver étant logiquement les moins efficaces, on se rend toutefois compte que cette période pourrait être valorisée. Plus paradoxalement, on constate une baisse d'efficacité en juillet/août alors que la longueur des journées et les températures seraient propices à une valorisation rapide d'un couvert en vue de produire de la biomasse restituable à la parcelle. De plus, comme il a été vu précédemment, l'action biologique des sols est en partie liée à la présence de racines fonctionnelles. On peut donc présumer une corrélation positive entre l'efficacité de

captation lumineuse et l'activité biologique des sols via la biomasse produite et la présence d'une couverture fonctionnelle. Cette activité, en sol nu, n'est toutefois pas nulle et limitée en hiver du fait des températures. Dans cette optique, la pertinence d'augmentation d'efficacité devra porter sur la période estivale en priorité et, dans cette hypothèse de rotation, sur les pommes de terre et les flageolets (dont les efficacités annuelles respectives sont de 0,42% et 0,18%). L'oignon possède une efficacité proche de celle de la pomme de terre (0,43) essentiellement dû au fait que la culture ne couvre jamais totalement le sol. De plus, en raison des risques chroniques d'enherbement, une action en pré plantation semble difficile autrement que par un apport exogène de matière organique.

Globalement pour ces cultures de printemps (betteraves, PDT, oignons), l'apport hivernal de vinasses de betterave permet de maintenir un taux de matière organique après destruction du couvert précédent. Deux formes (résidus de couverts et vinasses) de matières organiques permettent ainsi de répondre à la faible demande du sol sur cette période.

Il faut toutefois associer le phénomène de perturbation du système sol afin de gérer cette activité biologique. Anticiper le développement racinaire des cultures intermédiaires et proposer un travail de sol plus précoce permettrait de dégager plus de temps après la perturbation du système pour régénérer les populations du sol et ainsi aborder la reprise printanière avec des populations déjà en place.

Les cultures associées

De gros travaux de la part des TCSistes et des producteurs bio prennent place avec une nouvelle gestion des sols visant à la fois à minimiser les risques d'une culture et optimiser les synergies entre deux cultures de façon à avoir une meilleure productivité non pas d'une culture mais d'une parcelle. Différentes façons d'appréhender ces associations sont possibles allant d'une séparation claire de l'espace concerné à une utilisation mixte de cet espace. Pour clarifier ce point, nous prendrons deux exemples concrets.

Le premier concerne l'optimisation de l'espace visant à valoriser les zones les moins productives comme c'est souvent le cas des coins de parcelles en irrigation sous pivot. Ces zones moins bien voire non irriguées et parfois non cultivées peuvent être mises à profit pour introduire une culture associée à la culture en place. Cette association peut plutôt se décrire comme une association de système que comme une association de plantes comme ce sera le cas dans le second exemple. En effet, les espèces -cultivée et associée- ne génèrent pas directement une amélioration du rendement ou du sol cultivé. Il s'agit d'un effet sur le système de culture en donnant l'occasion d'effectuer une gestion parasitaire par effet push/pull ou en offrant un habitat aux auxiliaires de culture permettant de réduire le risque parasitaire sur la culture cultivée et donc de réduire in fine son utilisation d'insecticide voire de fongicide. Dans la mesure où ces zones sont moins productives pour différentes raisons, on se propose de les valoriser via une réduction de charges sur la culture. Des exemples existent mais sont pour le moment cantonnés à quelques cas particuliers. En dehors de cet exemple sous pivot on peut imaginer valoriser de la sorte des zones de parcelles comme les trains de tonneaux ou les passages de roues de rampe qui sont rarement valorisés à la même hauteur que le reste de la parcelle (à titre indicatif pour une parcelle carrée de 20Ha induisent une perte de surface productive de 52ares avec un pulvérisateur de 36m, de 76ares avec un 24m et de 1,52Ha avec un 12m sur une base de largeur non semée de 45cm par roue du train de tonneau) ou les coins de parcelles non mis en culture pour faciliter la récolte (arrachages pomme de terre par exemple).

Le second exemple, plus à même d'avoir une influence sur l'activité biologique des sols sur l'ensemble de la parcelle concerne les plantes associées partageant le même espace de culture. Cette association peut avoir pour but une meilleure couverture des sols dans la gestion de l'enherbement (semis sous couvert), un approvisionnement différé en azote (cas des légumineuses associées en automne) ou une gestion de risque en culture (les espèces semées sont récoltées de préférence simultanément en fourrage ou non). A noter, les associations de culture peuvent avoir d'autres

avantages comme dans les associations intraspécifiques pour minimiser l'impact des ravageurs (colzas de précocités différentes pour gérer les méligèthes ou blé de ports différents pour gérer la verse dans une optique de suppression des régulateurs par exemple). L'intérêt des associations multispécifiques tient dans une meilleure couverture des sols (efficacité de captation, réduction de la pression des adventices) mais aussi dans les capacités de ces espèces à coloniser et recycler les éléments nutritifs de différents horizons. Au niveau biologique, les exsudats multispécifiques devraient favoriser le maintien des populations à des seuils permettant de maintenir le potentiel de biodiversité de la parcelle.

A noter, en Chine, des vallées rizicoles en monoculture pratiquent sans le savoir des cultures associées intraspécifiques. La diversité génétique traditionnelle des populations de riz présente dans les parcelles des taux de résistance aux ravageurs à même de se passer de traitement. Fonctionnant un peu sur le même schéma que les précocités de colza sur les méligèthes, ces associations intraspécifiques de population sont peut être une autre voie de travail dans une stratégie de réduction des intrants.

Vers de nouveaux intrants

Outre ces associations visant notamment à préserver voire restructurer un sol, un travail peut aussi être mené sur les intrants afin de limiter leurs « dommages collatéraux » soit sur l'utilisateur - qui fait partie intégrante du système de culture- et sur les organismes utiles soit sur tous ceux qui se trouvent en aval du système (utilisateur de l'eau ou riverains notamment).

Deux grands types de nouveaux intrants font actuellement parler d'eux. Sans qu'ils soient antagonistes, leurs utilisations sont souvent spécifiques à des types de système ayant des fins différentes et, de fait, sont rarement envisagés conjointement. Il s'agit d'une part des nanotechnologies souffrant du désamour actuel pour les technologies touchant au vivant mais dont le potentiel de gain en efficacité semble énorme. Et, d'autre part, des extraits naturels (essences, purins) inculquant des valeurs de respect de l'environnement mais dont les résultats sont discutés. Au delà des débats idéologiques, les impacts des uns et des autres sont encore méconnus ce qui, dans une société basée sur le principe de précaution (peut être à rebaptiser principe de gestion de la peur)-dans les DEUX sens- freine grandement le développement.

Concernant les nanotechnologies, l'essor technique est prometteur mais soulèvera des débats au moins aussi houleux, et infertiles, que ceux sur les OGM. Ces nanotechnologies concernent des éléments dont l'ordre de grandeur, à titre comparatif, est environ 800 fois inférieur au diamètre d'un cheveu. A cette échelle, une nanoparticule est capable de pénétrer directement dans une cellule voire dans le noyau de celle-ci. Les conséquences en terme d'efficacité sont sans autre limite que celle de l'imagination... et de la recherche. On estime que ces technologies pourraient limiter l'usage des pesticides et s'attaquer à des cibles minuscules : le grain de sable qui enrayer la machine du ravageur. Le problème provient d'une part de l'impact sur le consommateur final qui est méconnu et qui sera vraisemblablement discuté longtemps par le clivage désormais classique des « pros et des antis » de nos débats contemporains. L'application massive dans les champs serait donc compromise, même si son efficacité était avérée (ce qui semble être le cas) par la communauté scientifique.

Les caractéristiques des huiles essentielles ont montré des effets insectifuge et fongicide in vitro. Ainsi en viticulture, les modalités cuivriques sont associées à ces huiles en protection fongique (origan, orange douce, citron, pamplemousse, clou de girofle, tea tree, eucalyptus). Dans ces huiles, les caractéristiques sont différentes et les huiles de citrus ont plutôt un effet dessiccant via les terpènes présents alors que les phénols de l'huile essentielle d'origan constitueraient plutôt un frein au développement des symptômes du mildiou. Ainsi ces huiles sont rarement usitées en mélange puisque leurs cibles sont différentes. Cependant, la durée d'action de ces molécules se doit d'être allongée et elles sont souvent associées en agriculture biologique ou en biodynamie à des adjuvants mouillants. Cependant, le CASDAR ne semble pas conclure à de réels impacts en plein champ et, même si la pratique semble convaincre des agriculteurs, il semblerait que cette voie ne

soit pas promise à un essor dans un futur proche. *En effet, la recherche de molécules naturelles moins nocives pour l'environnement et les applicateurs s'accompagne inévitablement d'une moindre efficacité et demande donc d'être plus attentif aux fluctuations fines de la santé des systèmes de production. Une évaluation ad hoc de l'impact de ces substances sur les différents compartiments écologiques semble donc nécessaire pour comprendre l'impact des huiles essentielles sur les productions végétales et leur environnement.* (Source : CASDAR).

Concernant les purins d'ortie, les essais en plein champ ont été dans l'incapacité de valider les réponses des végétaux constatées en laboratoire. Le GRAB, faute de résultat a arrêté ses essais sur cette matière faute de résultat en 2004, l'ITAB a fait de même quelques années plus tard qui concentre ses recherches sur les tisanes et les décoctions. Cependant, les résultats de 2011 ne semblent pas montrer de réelles efficacités reproductibles. *Comme toute solution alternative, les potentiels de remplacement des pesticides synthétiques sont faibles, et les efficacités réelles en condition d'unicité de traitement (sans autre complément ex. cuivre) toutes relatives.* (Source : Évaluation des caractéristiques et de l'intérêt agronomique de préparations simples de plantes, pour des productions fruitières, légumières et viticoles économes en intrants, Innovation agronomique 34, 2014). De plus, certaines préparations ne sont pas inoffensives sur certains auxiliaires, abeilles notamment comme le décrit cette même évaluation.

Concernant ces nouveaux intrants, ils sont soit efficaces et pouvant présenter un risque pour le consommateur (utilisateur ou consommateur final) avec un problème majeur d'acceptabilité soit moyennement efficaces voire inefficaces et pouvant présenter un risque également (les effets des décoctions, au même titre que les nanoparticules ne sont peut être pas inoffensives pour le consommateur puisqu'elles le seraient, par définition sur certains organismes vivant). En somme l'utilisation de ces intrants n'est pas soumise à son efficacité environnementale mais à son acceptabilité sociale. En agriculture industrielle, cette acceptabilité peut être considérée comme une condition d'accès au marché mais ne se présente pas à ce jour comme une solution améliorant « l'efficacité de la filière » et n'est donc pas valorisable. En outre, l'impact sur le sol qui nous intéresse ici n'est pas nécessairement neutre même quand il s'agit de molécules dites naturelles. Ces nouveaux intrants sont donc à considérer dans leur ensemble et selon l'acceptabilité propre à chacun.

Des modifications d'itinéraire envisageables.

Si le secteur industriel demande des améliorations en terme de qualité de production, elles ne sont jamais adossées à des critères de rémunération, la marge de manœuvre est donc très faible et très peu encourageante pour le producteur. L'ensemble des innovations ne pourra donc pas aboutir, dans le contexte industriel, à une baisse de rendement, sauf à baisser au moins d'autant les charges. Aussi évident que cela puisse paraître, le fait de ne pouvoir ajuster les prix à la qualité du produit final est une contrainte forte dans la diffusion et la recherche de cette innovation.

Ainsi, en blé, il est possible d'envisager le remplacement de deux déchaumages (dont le faux semis a fait ses preuves en terme de régulation des adventices) par un déchaumage seul associé à un semis précoce. Ce déchaumage, afin de pouvoir parvenir à un développement suffisant des couverts devra se faire au plus proche de la récolte afin de bénéficier d'un sol moins desséché. Cela est d'autant plus vrai que l'idée est de multiplier les espèces du couvert et d'y associer des légumineuses avec des plantes à pivot ayant un fort besoin en azote en début de cycle. Au plus ces espèces seront couvrantes au mieux les adventices seront limitées. La destruction du couvert peut se faire par gel ou par traitement précoce au printemps le cas échéant. Une destruction par broyage et labour est également envisageable en fonction du développement du couvert. En Orge de printemps, qui libère les terres relativement tôt la même logique peut être appliquée mais modulée en fonction de la culture suivante (si une culture d'automne suit, peut être vaut il mieux effectuer un double déchaumage classique). Cependant, le coût du couvert associé et géré de cette façon est supérieur à celui du faux semis et n'est pas inclus dans la marge industrielle.

En colza, une approche par culture associée peut être envisagée selon les modalités explicitées plus haut (pour rappel : une culture associée visant à couvrir le sol et appéter les ravageurs à l'automne puis relibérer de l'azote au printemps, légumineuses gélives ou visant à être récoltée avec le colza pour assurer un lissage des revenus de la parcelle, légumineuse non gélive).

La culture d'oignon présente quant à elle un défi intéressant. En considérant les impasses techniques fortes sur cette culture et le salissement dû à une exposition prolongée du sol à la lumière ainsi qu'à l'eau d'irrigation, un réel problème de gestion de l'enherbement se pose à l'échelle de la rotation. Au Québec, des semis d'orge à la volée après semis d'oignons sont pratiqués afin de protéger les plantules du vent, la destruction chimique intervient avant tallage. Cette pratique demeure cependant difficilement envisageable pour répondre à la problématique de salissement puisque l'orge ne se développera pas assez rapidement pour couvrir le sol. De manière générale, les semis de dicotylédones associés sont incompatibles avec le contrôle chimique des levées d'adventices dans les oignons et seule l'éventualité de semis de céréales permettrait de compléter cette action. La problématique de vitesse de développement demeurant entière, il peut être judicieux d'envisager une culture couvre-sol à l'automne ou un paillage important post plantation qui permettrait d'une part de protéger le sol des érosions mais aussi de limiter les germinations de certaines adventices en les privant de lumière. Dans la seconde optique, une attention particulière devra être apportée au fractionnement des apports azotés. L'implantation d'un couvert non gélif à l'automne, ou produisant une protection persistante depuis la plantation jusqu'au mois de juin/juillet implique de semer tôt des couverts ligneux et surtout d'adapter le matériel de plantation. Dans le cadre de cultures spécifiques où le matériel de plantation est externalisé, cette solution semble délicate à mettre en place. Le paillage fin semble donc être la solution technique la plus simple et la plus adaptée, toutefois les volumes (500m³/Ha soit environ 65T/Ha pour le miscanthus) et le prix interdisent ce modèle. Il faudrait, dans le cas du miscanthus l'équivalent de trois fois la surface concernée en se basant sur un bon rendement de cette plante et de plus, il y a un risque de pourriture du bulbe. Un essai micro placette sera toutefois mis en place en 2017.

En pommes de terre, la solution évoquée d'implantation précoce sur labour sec ou sur prébuttage d'un couvert ayant une bonne racine pivotante et éventuellement associée à une légumineuse dont la destruction couvrira une partie des besoins azotés nécessaires à la décomposition du couvert peut être envisagée. Le couvert « pivotant » servira essentiellement à maintenir une structure de sol rendue propice soit par les pratiques sur le long terme soit par une action mécanique. Il sera enfoui au moment de la plantation. Idéalement, son port hivernal devra être dressé afin de laisser un sol non couvert plus propice aux actions du gel et au ressuyage de printemps. Ce couvert pourra en outre améliorer la portance des sols pour les interventions de fumure automnale et printanière. Compte tenu de la bonne réponse de la culture de pomme de terre à la fumure organique, ce couvert pourra aussi valoriser des apports précoces effectués en fin d'été sur sol sec et portant limitant la destructuration du sol et étant valorisé dans un premier temps par le couvert. Si l'efficacité de ces apports est généralement moindre qu'en apport de fin d'hiver, le gain à la récolte peut être non négligeable (tare terre améliorée).

En légumes verts (haricots/flageolets), la problématique repose sur la dizaine de mois entre la récolte du précédent (un blé le plus souvent) et le semis. Si les deux tiers de cette durée peuvent être gérés par les inter-cultures d'août à novembre/décembre, le dernier tiers de février à mai durant lesquels le sol doit reprendre son activité est ouvert à la prolifération des adventices et fermé à une activité biologique importante faute de couverture. Un couvert non gélif peut être essayé, notamment en y associant un triticales de printemps. Une attention particulière sur la gestion azotée doit être considérée en raison du risque d'incorporation dans le mélange d'une légumineuse pouvant accroître la pression sclerotinia.

Dans l'ensemble de ces pratiques, un décalage du lissage du travail est à prévoir et doit être pris en compte sur la gestion des surfaces à travailler de cette manière. Les travaux d'hiver, par une réduction de la surface labourée ou un décalage de celle-ci, seront allégés d'où pourra résulter un déséquilibre dans la gestion des heures de main d'œuvre. De plus, l'intensification en période pré

automnale des travaux à effectuer laissera moins de temps pour répondre aux problématiques de panne avec un usage des outils très concentré sur une courte période. L'entretien hivernal pourrait donc s'intensifier en raisons de pannes plus lourdes car moins bien gérées « au champ ». Dans cette optique, une meilleure polyvalence de la main d'œuvre est souhaitable ce qui ne pose pas de problème en cas de fidélisation des ouvriers mais peut devenir gênant dans le cadre d'un renouvellement salarial. Ceci est d'autant plus vrai que l'explosion des nouvelles technologies doit également s'accompagner d'une nouvelle maîtrise technique. Il deviendra de plus en plus difficile de pouvoir répondre en interne aux aléas matériels et les retards en cas de chantier intense seront d'autant plus pénalisant.

Il est extrêmement difficile de quantifier l'intérêt direct d'une activité biologique correcte des sols sur une culture cible, en revanche sur le long terme, cette activité permet de maintenir voire d'améliorer la qualité des sols. Si on considère fréquemment le taux de matière organique comme un bon indicateur de la santé des sols, ce taux n'est pas une fin en soi et c'est essentiellement la façon dont cette matière va évoluer ainsi que les acteurs de son évolution qui vont permettre aux sols de s'enrichir et s'améliorer pour satisfaire les besoins des futures cultures à moyen et long terme. Il est donc beaucoup plus adapté de s'intéresser aux flux des différentes matières organiques du sol et de tenter d'accélérer ou ralentir certains pour répondre aux contraintes de la parcelle et des cultures en place. L'introduction dans cette rotation de cultures industrielles mène à un challenge supplémentaire puisque l'agriculteur doit se soumettre aux contraintes spécifiques à ces contrats, notamment en terme de mise à disposition mais aussi doit assurer un rendement minimum élevé pour pousser la productivité de la filière et permettre aux consommateurs d'accéder à des produits de qualité à un coût minimum. Parallèlement, la pression sociale pousse à réduire les investissements chimiques sur ce type de culture, occasionnant des impasses techniques avec les méthodes classiques. Je n'ai trouvé au cours de mes visites aucune preuve scientifique d'amélioration de la situation sanitaire dans des sols biologiquement actifs (ces améliorations, quand elles existaient auraient pu être mises sur le compte d'une baisse de densité ou d'une alimentation des plantes moins saccadée). Cependant des travaux de recherche abordant ce point sont en cours et le sujet n'est pas conclu.

Plus que tout, cette gestion des sols ne peut pas se considérer comme une fin en soi ni même comme un moyen mais elle doit se considérer à mon sens comme une préoccupation quotidienne dans les choix agro-économiques faits par le décideur. Elle ne doit pas remettre en cause un type d'agriculture moins performant du point de vue de la biodiversité des sols au profit d'un autre. Cette gestion des sols, de sa vie et de ses flux organique doit être réfléchi non seulement comme un enjeu productif mais aussi comme un service apporté par la profession à l'ensemble de la société à travers la dynamique des eaux de ruissellement, la qualité des eaux d'infiltrations, la séquestration de carbone, une réduction des apports azotés volatils (puissants GES) et une éventuelle diminution des intrants chimiques ou une meilleure efficacité de ces derniers. Chiffrer ces services nécessite cependant de considérer des indicateurs fiables, simples et dynamiques permettant de juger de ces effets et de rentrer dans une démarche orientée et anticipée des conséquences agro-systémiques. Organismes de recherche et chambres d'agriculture doivent s'attacher à clarifier et mesurer cet impact afin que demain les dogmes sur l'activité biologique des sols tombent et que chaque acteur des filières agricoles puisse considérer l'impact de ses pratiques et que des discussions entre ces acteurs puissent s'ouvrir sur des bases précises.

Les différentes visites effectuées en Australie sur la gestion des sols sous différentes conditions pluviométriques m'ont ouvert à la perspective de paramètres nouveaux dans ma réflexion sur la gestion des sols. Certaines de ces visites en apparence anodines ont, sur le long terme, déclenché des idées à mettre en œuvre comme la réflexion sur l'introduction des cultures pluriannuelles, d'autres prometteuses au départ m'ont rapidement fait comprendre que ces pistes n'étaient pas compatibles avec le système que je souhaitais mettre en place. Je conserve encore en tête des visites instructives dont je ne sais pas tirer parti mais dont l'intérêt et les échanges résonnent à chaque fois que mon système est remis en cause. J'ai pu trouver, grâce à Nuffield, des occasions d'apprendre et de tenter de comprendre un sujet qui est aujourd'hui au cœur des enjeux des politiques agricoles. Cet enjeu ne connaîtra vraisemblablement pas de modification révolutionnaire mais une évolution progressive qu'il faut préparer en parallèle avec l'évolution d'autres techniques de production comme l'agriculture de précision ou l'agriculture programmée. La rencontre avec d'autres boursiers lors des cycles communs revêt en cela un intérêt supplémentaire tant les potentiels agricoles sont variés et nombreux.

Bibliographie utilisée

Les bases de la production végétale, Tome 1 : le sol,
Dominique Soltner, Collection Sciences et techniques agricoles, 1999

*Les bases de la méthode Hérody – Aide-Mémoire pour mieux utiliser les résultats des diagnostics
conduits selon la méthode BRDA-Hérody – Manuel à l'usage des agriculteurs*
Dominique Massenot, Editions BRDA, 2000

Le génie du sol vivant
Bernard Bertrand et Victor Renaud, Editions de Terran, 2009

Le sol vivant. Bases de pédologie – Biologie des sols.
Gobat, Jean-Michel, Aragno, Michel et Matthey, Willy, 2003.

Memento de l'agronome, CIRAD éd.2009

Introduction à la science du sol
Philippe Duchaufour, ed. Dunod

Le sol, Propriétés et fonctions. Vol.1 et 2
Raoul Calvet, ed Dunod 2003