

Fertilité des sols et minéralisation de l'azote :
quels processus sont impliqués ?,
quelles interactions sous l'influence des pratiques culturales ?

S. Recous¹, A. Chabbi², F. Vertès³, P. Thiébeau¹, C. Chenu⁴

1 : INRA, UMR FARE, 2, Esplanade R. Garros, F-51100 Reims ; sylvie.recous@reims.inra.fr

2 : INRA, Centre de Recherches Poitou-Charentes, F-86600 Lusignan

3 : INRA, UMR SAS, 4 rue Stang Vihan, F-29000 Quimper

4 : AgroParisTech, UMR ECOSYS, F-78500 Thiverval-Grignon

Résumé

La fertilité des sols a plusieurs composantes, et peut être approchée de plusieurs manières. L'approche développée ici est celle de la capacité des sols à fournir les éléments nutritifs nécessaires à l'alimentation des plantes qu'ils portent, et en raison de son importance, nous avons centré notre propos sur le cycle de l'azote et ses relations avec la dynamique des matières organiques. Cette fertilité est abordée sous l'angle des interactions entre processus chimiques, physiques et biologiques qui interagissent, et l'influence de pratiques culturales mobilisées dans le cadre d'une agriculture reposant davantage sur le recyclage des matières organiques et le fonctionnement biologique du sol. La communication aborde les couplages entre cycles du carbone et de l'azote à travers l'activité microbienne hétérotrophe, l'importance des couverts végétaux pour les caractéristiques chimiques et physiques de leurs résidus et litières souterraines, enfin les effets des modifications du travail du sol. Les interactions entre ces différents facteurs sont illustrées par l'exemple de changements de pratiques, notamment la simplification ou suppression du labour, l'insertion de prairies temporaires dans les rotations, et leur destruction.

Introduction

Les préoccupations environnementales et la raréfaction de certaines ressources placent l'agriculture face au double défi de maintenir, voire d'accroître, la productivité primaire des écosystèmes cultivés tout en limitant les impacts sur l'environnement et en gérant durablement les ressources indispensables dont dispose la planète pour la production agricole. La gestion des éléments nutritifs se situe au cœur de cette problématique car ils ont une importance stratégique pour l'avenir de la sécurité alimentaire et pour leur impact sur le changement climatique global à l'échelle planétaire. Il est crucial d'améliorer le fonctionnement global des écosystèmes cultivés notamment en augmentant leur degré d'autonomie vis-à-vis des intrants minéraux, en valorisant davantage le recyclage des éléments nutritifs, en diminuant les pertes et en augmentant l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs apportés ou recyclés. La gestion des éléments nutritifs en agriculture doit donc être resituée dans le cadre d'une gestion plus globale des cycles biogéochimiques dont la fertilisation reste, certes, une composante essentielle en raison des quantités mises en jeu, mais qui concerne aussi les autres sources de nutriments, notamment par la minéralisation des diverses sources de matières organiques (humus, résidus de culture, produits résiduels organiques, effluents d'élevage) et la fixation symbiotique. De par la nature même des processus affectant décomposition et minéralisation/stabilisation des matières organiques et *in fine* la fertilité des sols, cette gestion mobilise des dynamiques spatiotemporelles de l'évolution des éléments nutritifs beaucoup plus complexes que lorsque la nutrition était principalement assurée par la fertilisation minérale calculée pour un cycle cultural (diversification des rotations culturales, gestion des intercultures, cultures associées, prairies temporaires, etc.), impliquant de nombreuses pratiques et combinaison de pratiques.

La fertilité des sols n'est pas une notion facile à définir, car elle est le résultat de l'expression des composantes biologiques, physiques et chimiques des sols et de leurs interactions. Elle s'apprécie sur des processus et fonctions différents, comme la production végétale (qualité et quantité récoltée) ou certaines propriétés des sols (par exemple vis-à-vis du travail du sol) ; elle comporte aussi une notion de durabilité : la fertilité se construit ou se déconstruit sur une échelle de temps dépassant le cycle cultural. Les agriculteurs cherchent à préserver ou à améliorer la fertilité de leurs sols, en gérant les pratiques culturales au sein de leurs systèmes de culture. Gérer la fertilité des sols nécessite donc de mener une réflexion sur les différentes composantes qui l'affectent : travail du sol, fertilisation, gestion des résidus de culture, des intercultures, choix des rotations et des espèces au sein de ces rotations, etc.

Mais il est légitime de se demander, comme beaucoup d'autres auteurs, qu'est-ce que la fertilité d'un sol, d'une terre ? THEVENET (2003) avait observé que le concept empirique et concret de « niveau effectif de production », facile à mesurer mais variable d'une année à l'autre et d'une culture à l'autre pour le même sol, a été lentement remplacé par la notion plus abstraite d'aptitude à produire, représentative d'une potentialité réalisable sous certaines conditions (SEBILLOTTE 1989), ces conditions étant rarement explicitées. Nous retiendrons ici cet angle de vue, à savoir pour un climat donné, la fertilité d'un sol représente son aptitude à assurer, de manière régulière et dans des conditions normales de production, de bonnes conditions de croissance des cultures. Les anciens (LAROUSSE AGRICOLE, 1921) définissaient une fertilité « naturelle » caractérisant des conditions pédoclimatiques favorables à la croissance des cultures (par ex. sols profonds, drainants, riches en MO, bien alimentés en eau) et une fertilité « acquise » liée aux bonnes pratiques des agriculteurs (choix des cultures et des rotations, pratiques culturales, recyclage des fertilisants organiques...), fertilité acquise s'incluant à terme dans la fertilité « naturelle ». Les auteurs avaient anticipé les apports massifs de fertilisants (advenus bien après cette publication grâce à la synthèse chimique d'engrais azotés à partir des années 50) qui relevaient pour eux d'une amélioration fugace de la fertilité qu'il fallait surveiller. Plus simplement, le LAROUSSE AGRICOLE (2002) considère que la fertilité résulte d'une combinaison des composantes physique, chimique et biologique du sol, qui déterminent l'approvisionnement des plantes en éléments nutritifs et les conditions de la croissance et du fonctionnement des racines.

Etant donné la diversité des processus impliqués, mais aussi les enjeux agronomiques et environnementaux déjà évoqués, nous centrerons cette intervention sur les processus qui affectent les dynamiques de la matière organique dans les sols et les flux de minéralisation qui y sont associés (principalement l'azote). Notre contribution vise à montrer, sous un angle assez mécaniste, comment

interagissent les processus chimiques et biologiques et physiques, et comment des pratiques culturales, notamment celles en développement actuellement ou ayant vocation à l'être, agissent sur ces processus. Notre contribution ne vise pas l'exhaustivité et nous prendrons trois exemples, liés à la nature des cultures dans les rotations, à la modification du travail du sol, et enfin au changement d'usage des sols (ici, les retournements de prairies temporaires).

1. Les mécanismes impliqués

– Le couplage des cycles de C et N via l'activité de la microflore hétérotrophe

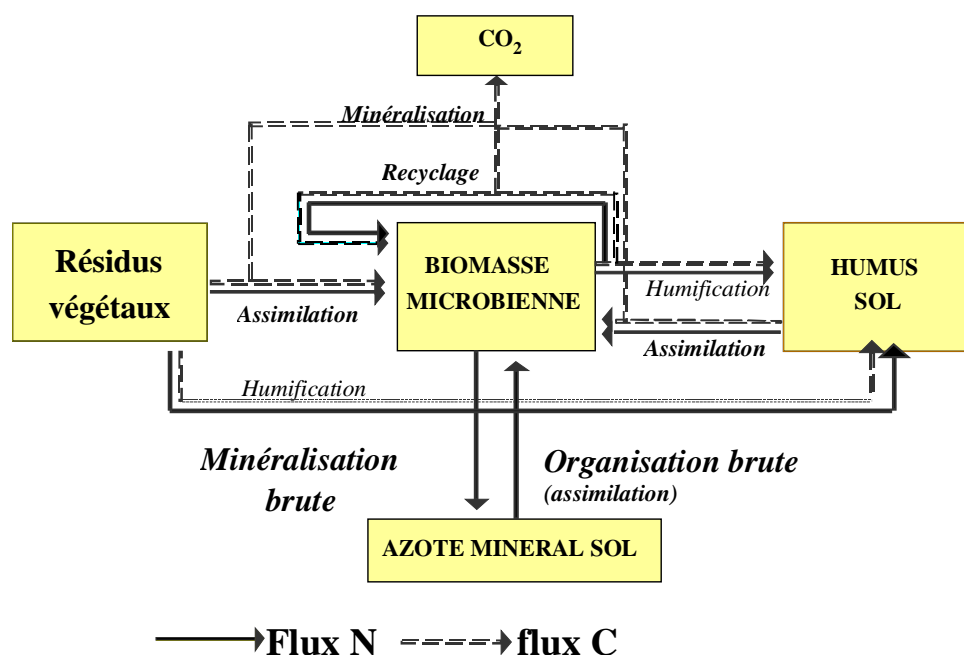
La minéralisation nette de l'azote dans le sol résulte de la décomposition des matières organiques par les (micro)organismes hétérotrophes des sols, et elles en constituent les ressources trophiques. La partition entre source d'énergie et source de nutriments pour leur biosynthèse est complexe, à la fois sous l'influence étroite de la nature et l'accessibilité de ces ressources, et de la dynamique des communautés du sol. Le cycle de l'azote, comme celui des autres éléments minéraux, est alors sous le contrôle de la dynamique du carbone au sein du cycle dit « interne » de l'azote dans les sols (minéralisation-organisation). Tout facteur qui modifie la dynamique des communautés microbiennes et la dynamique de décomposition et de minéralisation, par exemple la quantité et la nature des résidus de récolte ou litières végétales, les modalités de travail du sol et la stratification des matières organiques et des activités biologiques en résultant, impactent ce cycle de l'azote.

Par "cycle interne de l'azote" on entend les processus de minéralisation brute, organisation brute, processus opposés dégradant ou alimentant les formes organiques de l'azote, et la nitrification de l'azote. Leur résultante détermine la quantité nette d'azote minéralisé. Ces processus correspondent aux fonctions microbiennes que sont l'ammonification et l'assimilation microbienne de l'ammonium et du nitrate et la nitrification (Figure 1). L'organisation brute qui résulte de la demande en N des décomposeurs est directement contrôlée par le carbone facilement assimilable, alors que la minéralisation brute (de l'humus notamment) est davantage liée à des caractéristiques physiques et chimiques plus permanentes des sols. Ces deux flux sont donc sous le contrôle de facteurs différents, et vont, sous l'influence des pratiques, être modifiés différemment, impactant la minéralisation nette de l'azote. Par analogie avec la banquise, on pourrait dire que la minéralisation nette n'est que la partie émergée de l'iceberg.

On a pu montrer des différences importantes de flux bruts de minéralisation et organisation entre rotations de cultures annuelles et prairies par exemple, pour des minéralisations nettes d'azote sensiblement équivalentes (RECOUS *et al.*, 1999 ; MURPHY *et al.*, 2003 ; BOOTH *et al.*, 2005), et l'augmentation importante des flux d'organisation après incorporation de paille de blé au champ, résultant de leur décomposition par les organismes du sol (RECOUS *et al.*, 1999). Connaître individuellement ces flux et les quantifier nécessitent des approches isotopiques assez lourdes, mais leur utilisation a permis de comprendre les facteurs déterminants de ces flux élémentaires (MURPHY *et al.*, 2003), et de mieux expliquer les variations de minéralisation nette, notamment sous l'influence des changements de pratiques (ATTARD *et al.*, 2011).

L'azote minéral disponible dans un sol et/ou un résidu de culture exerce, en retour, un contrôle de la décomposition des matières organiques lorsque sa disponibilité est limitante vis-à-vis des besoins en azote de la biomasse microbienne, besoins qui sont élevés. Ceci se manifeste souvent par une réduction de la vitesse de décomposition pour les résidus de culture pauvres en azote (par ex. les pailles de céréales) et, plus spectaculairement, par une réduction qui peut être importante des quantités d'azote assimilé (c'est-à-dire organisé) par la microflore pour assurer une même décomposition (RECOUS *et al.*, 1995). Ce phénomène a de profondes implications pour la prédiction de la minéralisation nette car la limitation de la décomposition par la disponibilité de l'azote est une situation très fréquente au champ, étant donné les besoins en azote élevés de la microflore pour décomposer les composés carbonés ; le non-labour ou le travail superficiel, en limitant le contact entre les matières à décomposer et le sol, contribuent à cette limitation, ceci étant bien sûr accru lorsque les résidus végétaux ont des teneurs en azote faibles. Le rétro-contrôle de la dynamique de C et N par la disponibilité de N renforce la nécessité absolue d'aborder conjointement les dynamiques du carbone et de l'azote dans les sols cultivés pour espérer mieux gérer les matières organiques à court et long terme, et la disponibilité des nutriments qui en résulte.

Figure 1 : Représentation schématique du couplage entre les flux de carbone et d'azote au cours de la décomposition des matières organiques, et relation avec la minéralisation nette.



- L'Influence de la qualité des résidus végétaux, ressource trophique des décomposeurs

L'étude des caractéristiques biochimiques et physiques des résidus organiques est cruciale car ces caractéristiques déterminent la cinétique potentielle de leur décomposition, la proportion de composés susceptibles de diffuser vers le sol, le mode de colonisation microbienne et la nature des populations impliquées. Les caractéristiques biochimiques et physiques des matières organiques "fraîches" varient avec l'espèce, le degré de maturité, les conditions de croissance et de nutrition pour les résidus de végétaux. Cela explique l'importance des recherches menées pour les caractériser et déterminer les lois d'action pour leur décomposition. Deux méthodes relativement classiques de caractérisation sont généralement utilisées. La teneur en azote (ou le rapport C/N) est un premier critère pour prédire globalement l'effet net de l'incorporation des résidus sur l'azote minéral du sol à court terme (minéralisation nette ou organisation nette d'azote). La relation étroite obtenue entre le rapport C/N et la minéralisation nette des résidus dans de nombreuses études a conduit à retenir la teneur en azote des résidus végétaux comme critère simple de leur qualité biochimique (les résidus à teneur en azote élevée étant alors considérés aussi comme rapidement dégradables). Ce critère, facilement mesurable, est au cœur de nombreux outils décrivant l'effet de la restitution de résidus de culture sur la minéralisation nette d'azote (NICOLARDOT *et al.*, 2001). Mais cette relation n'est vraie que lorsqu'elle est établie dans une gamme relativement étroite de types de résidus de culture, c'est-à-dire résidus pour lesquels il y a une corrélation entre teneur en azote et composition biochimique (par exemple les résidus de culture récoltés à maturité ont à la fois une teneur en azote faible et une teneur en lignine élevée). Cette représentation n'est donc pas valable lorsque la teneur en azote ne reflète pas un stade de maturité de la plante et donc une biodégradabilité intrinsèque, ce qui nécessite des paramétrages spécifiques (par ex. paramétrage pour les cultures intermédiaires récoltés en phase végétative, JUSTES *et al.*, 2009). C'est le cas notamment avec les racines des plantes, dont la teneur en azote est généralement plus élevée que celle des parties aériennes correspondantes et dont pourtant la récalcitrance est pourtant plus grande.

Une autre approche a été empruntée aux travaux sur la digestibilité des fourrages, permettant de mieux décrire l'aptitude intrinsèque des résidus à leur décomposition, la minéralisation ou l'organisation d'azote associée, mais aussi la vitesse de dégradation du carbone. Il y a une sorte d'analogie entre la décomposition des végétaux par les micro-organismes du rumen dans le système digestif des bovins et la décomposition des résidus végétaux par les micro-organismes du sol.

L'analyse proximale est basée sur une appréciation de la récalcitrance chimique à l'hydrolyse en séparant quatre fractions apparentées aux composés solubles, hémicelluloses, celluloses et lignine. Une manière d'améliorer les prédictions de la minéralisation des résidus de plantes a été d'adopter une approche plus « fonctionnelle » en distinguant les organes (tiges, feuilles, racines) dont les teneurs mais aussi les architectures tissulaires répondent aux fonctions remplies par ces organes de la plante vivante (ABIVEN *et al.*, 2005 ; BERTRAND *et al.*, 2006), et en distinguant aussi les grandes familles végétales (monocotylédones, dicotylédones) (REDIN *et al.*, 2014a, b). Ceci permet de prendre en compte non seulement les variations fines de la chimie (par ex. différents types de lignine entre tige et racine) mais aussi l'organisation tissulaire des différents types de végétaux et organes pour un végétal donné. Les enjeux nouveaux de connaissance résultent de la prise de conscience de i) l'importance des litières souterraines (racines, rhizomes, exsudats racinaires) dans le stockage du carbone (BERTRAND *et al.*, 2011 ; REDIN *et al.*, 2014a) et le maintien de la fertilité notamment dans les situations d'exportation des parties aériennes, ii) de l'apparition de plantes « nouvelles » encore peu connues dans les systèmes de culture français et de mélanges de cultures (cultures en association, semis sous couvert, *etc.*).

Tableau 1 : Exemple de caractéristiques chimiques et physiques de tiges de différentes cultures récoltées à maturité (IQBAL *et al.*, 2013). On observe une grande diversité de la composition biochimique, de la richesse en azote, ainsi que des caractéristiques physiques (densité et teneur en eau maximale) qui influencent l'humidité des paillis et au même titre que la composition biochimique, leur potentiel de biodégradation notamment en conditions fluctuantes d'humidité du sol.

Culture (tige)	g/kg MS				C/N	Densité g/cm ³	Teneur en eau maximale g H ₂ O / g MS
	Soluble	Hemi-cellulose	Cellulose	Lignine			
Blé	75	271	510	143	109.1	0.35±0.08	0.35±0.08
Riz	306	352	301	40	30.3	0.28±0.07	0.28±0.07
Brachiaria	220	355	348	74	26.6	0.51±0.06	0.51±0.06
Maïs	388	190	314	99	158.5	0.10±0.01	0.10±0.01
Soja	183	171	414	230	63.1	0.35±0.03	0.35±0.03
Pois	321	152	422	103	56.5	0.17±0.05	0.17±0.05
Luzerne	182	177	391	248	60.8	0.59±0.05	0.59±0.05
Dolique	227	215	390	168	53.5	0.46±0.03	0.46±0.03
Stylosanthes	245	163	457	126	46.4	0.25±0.03	0.25±0.03
Tournesol	175	174	477	166	161.3	0.12±0.03	0.12±0.03
Colza	280	156	443	114	72.2	0.15±0.02	0.15±0.02

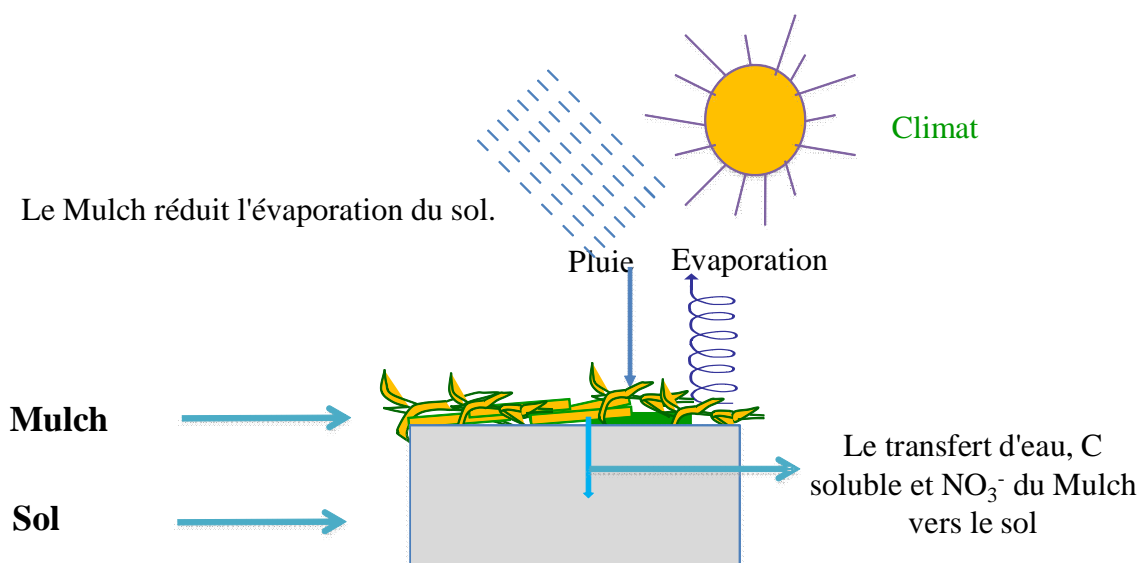
- L'environnement physique des matières organiques et des activités biologiques

Etudier l'environnement physique des résidus dans le sol et les interactions entre fonctionnement physique et fonctionnement biologique s'avère essentiel pour répondre à l'évolution des pratiques culturales notamment la simplification ou la suppression du labour. Cette question du « contact sol-résidu » a plusieurs composantes : la taille des particules de résidus peut avoir un effet significatif sur la vitesse de dégradation en modifiant la surface spécifique des résidus (cm²/g de résidu) et la distribution des particules au sein du sol (cm² résidu/cm³ de sol) (ANGERS et RECOUS, 1997 ; IQBAL *et al.*, 2014). La granulométrie des résidus modifie les possibilités de colonisation, l'accessibilité aux nutriments, et notamment l'azote, et enfin la diffusion des composés solubles des substrats vers le sol. La détritusphère (par analogie avec la rhizosphère) est formée de la surface du résidu en décomposition et de la zone de sol immédiatement en contact. Son étude a montré la forte hétérogénéité spatiale induite par les gradients de colonisation microbienne, par la diffusion de composés solubles et la translocation fongique créés par les débris en décomposition (GAILLARD *et*

al., 1999). Cette compréhension a renforcé la perception de l'hétérogénéité spatiale des propriétés des sols induite par la restitution des matières organiques exogènes dans le sol ou à la surface du sol, et l'importance des processus physiques associés, en particulier le transport et la diffusion de l'eau et des solutés, et la localisation des activités biologiques. L'effet principal d'un faible contact dû à une localisation en surface ou à une taille grossière de brins est finalement une limitation de la décomposition par la disponibilité en azote et, si les résidus sont à la surface du sol, un contrôle accru par la dynamique de l'eau.

L'abandon ou l'adoption d'un labour superficiel a en effet deux effets distincts mais qui se conjuguent pour modifier les caractéristiques des sols et la disponibilité des nutriments. Le premier effet est la localisation des résidus de culture à la surface du sol sous forme de paillis (encore appelé mulch) ou dans les tout premiers centimètres sous la surface du sol (Figure 2). Les études menées au laboratoire et au champ ont montré que la présence de paillis à la surface des sols modifie considérablement l'ensemble des flux, notamment les flux d'eau (infiltration, évaporation, rétention) dans le sol et à l'interface sol - paillis - atmosphère (COPPENS *et al.*, 2006 ; IQBAL *et al.*, 2014 ; THIEBEAU *et al.*, 2011). La présence d'un paillis de résidus de culture modifie l'écologie du sol entier. La dégradation des paillis est fortement influencée par leur capacité de rétention en eau, elle-même sous le double contrôle de la nature intrinsèque des résidus de culture et de la fréquence des pluies. En présence d'évènements pluvieux espacés et/ou de conditions sèches, la dégradation des paillis est ralentie, voire stoppée, modifiant la persistance d'une couverture du sol et ralentissant la minéralisation de l'azote et autres nutriments (SANAULLAH *et al.*, 2012 ; VANLAUWE *et al.*, 1995).

Figure 2 : Représentation schématique d'un paillis (mulch) à la surface du sol et son interaction avec le climat (COPPENS, 2006).



Le second effet concerne la structure du sol qui est également une composante importante de la fertilité des sols : une structure agrégée, dans laquelle des pores de différentes tailles coexistent, permet un ancrage et une exploration du sol optimale par les racines ainsi que des conditions localement favorables, en termes de disponibilité de l'eau et de l'air. Que cette structure soit stable au cours du temps et au travers des évènements pluvieux détermine le maintien de ces propriétés et celle de l'infiltration des eaux de pluies. Des pratiques telles que le non-labour, parce qu'elles entraînent une concentration des matières organiques dans les premiers centimètres du sol, ont un effet positif sur l'agrégation du sol et la stabilité structurale, tout particulièrement lorsque le semis direct est associé à une plante de couverture (CHENU et CONSENTINO, 2011).

2. Quels effets des changements de pratiques culturales sur les processus liés à la fertilité ?

Le choix des cultures principales et cultures intermédiaires, la gestion des résidus de culture, la fertilisation, le travail du sol ont donc des impacts très importants, sur la nature, la quantité, la localisation des biomasses végétales recyclées, sur leur vitesse de décomposition, sur l'établissement ou non de gradients de matières organiques, sur l'état structural du sol. Ces processus, en retour, influencent à moyen et long terme, la quantité et la distribution des matières organiques, et les propriétés physiques des sols qui conditionnent d'autres processus et impacts : stabilité de la structure, porosité, présence et activité de la faune du sol, minéralisation et approvisionnement en nutriments, *etc.* On voit donc que l'activité des décomposeurs et la minéralisation et l'organisation brutes d'azote qui lui sont associées, processus intervenant très rapidement après des apports de matières organiques (quelques jours à quelques semaines) sont les médiateurs des effets à long terme de la gestion des matières organiques. Nous illustrons ces interactions entre processus par deux exemples, liés au changement de travail du sol et à la destruction de prairies temporaires dans les rotations prairies - cultures.

De nombreux projets de recherche ont visé à mieux comprendre les effets combinés des pratiques culturales, notamment *via* la comparaison de situations contrastées comme le labour et le semis direct, la prairie et la rotation de cultures annuelles, et le passage de l'un à l'autre. Il est important de connaître la dynamique d'évolution suite à des changements de pratiques, à une échelle de temps compatible avec la prise de décision par les agriculteurs (année à quelques années). Tous les résultats disponibles confirment d'abord que la prairie, comme le semis direct, créent un gradient important de carbone organique dans les sols : l'un parce que les litières aériennes et racinaires des espèces prairiales pérennes s'accumulent dans les premiers horizons sous la surface du sol, l'autre parce que les résidus de récolte sont laissés à la surface du sol où ils se décomposent. Indépendamment d'un accroissement possible du stock total de C organique dans le sol (notamment sous prairie), la distribution spatiale du carbone, et notamment la concentration accrue dans les systèmes non perturbés, entraîne en cascade toute une série de « propriétés » pour ces couches superficielles de sol : accroissement de la quantité de carbone soluble, accroissement de la biomasse microbienne hétérotrophe du sol et de sa respiration, augmentation associée des transformations microbiennes de l'azote (minéralisation et organisation, nitrification, dénitrification) et des autres éléments majeurs, modification de la structure du sol et agrégation, impact sur la faune des sols. D'un point de vue fonctionnel, pour les agrosystèmes considérés, cette stratification du carbone a des conséquences bien plus importantes que celles strictement liées à une augmentation possible de stock total de C (ATTARD *et al.*, 2011 ; CHENU *et al.*, 2011).

Le deuxième résultat important concerne les effets des changements de gestion. Par exemple, dans le projet Cosmos-flux impliquant le retournement de la prairie âgée de 5 ans (ATTARD *et al.*, 2011), l'action mécanique exercée sur l'horizon travaillé et le mélange du sol des couches précédemment non perturbées conduisent à la destruction du gradient de matières organiques et des communautés et activités microbiennes. En réalité, il n'est pas possible de distinguer les deux facteurs pourtant (i) le premier (action mécanique) a comme conséquence de rendre « accessible » à la décomposition et minéralisation des formes organiques qui ne l'étaient pas : carbone organique « protégé » par la structure du sol en semis direct d'une part, parties aériennes et racinaires et notamment racines à divers stades de décomposition de la prairie détruite d'autre part ; (ii) le deuxième facteur, le mélange des couches, conduit du point de vue des matières organiques à une dilution immédiate des compartiments organiques, microbiens et enzymatiques, qui entraînent à moyen terme une adaptation des communautés microbiennes à la ressource et aux nouvelles conditions environnementales. Les interprétations sur les effets observés de ces changements de gestion, multi-facteurs du point de vue des processus étudiés, sont donc complexes et on ne peut en réalité accéder qu'à une résultante des deux effets.

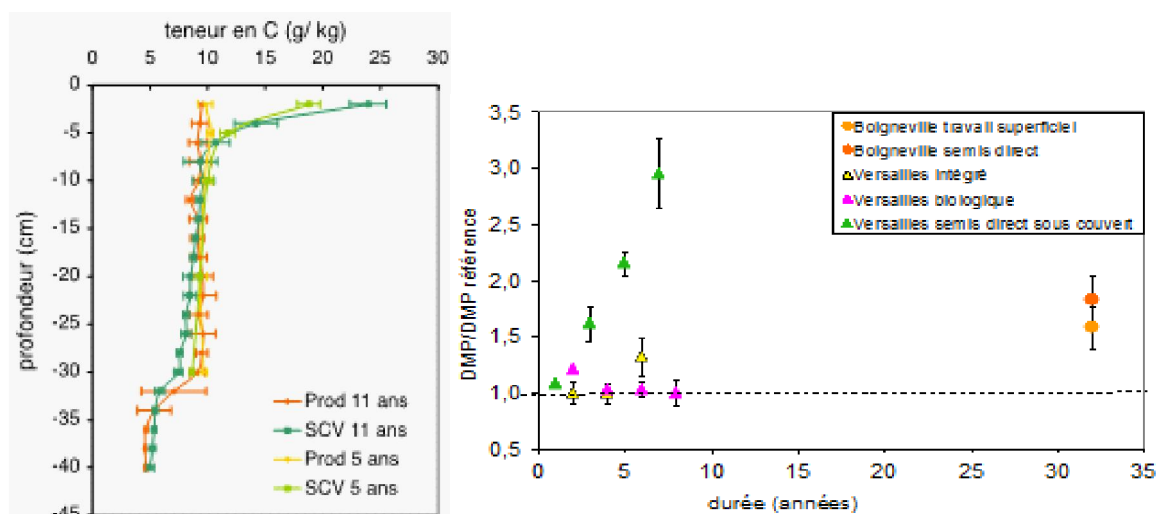
L'action de travail du sol a eu dans les deux situations un effet immédiat important sur l'émission de CO₂ supplémentaire (quelques heures à quelques jours), résultant de l'accroissement du carbone organique accessible aux décomposeurs et une très forte minéralisation d'azote, qui a déjà été observée dans le passé dans d'autres situations (ex. VERTES *et al.*, 2007). La quantité d'azote minéralisé en quelques semaines, de l'ordre de 100 kg N/ha dans cette étude, peut être expliquée en

grande partie par la minéralisation nette des biomasses végétales ainsi détruites et incorporées au sol et, dans une moindre mesure, par l'arrêt de l'organisation brute de l'azote en raison d'une décroissance rapide de la ressource carbonée (le flux de minéralisation brute devient alors dominant comparé au flux d'organisation brute qui décroît). Nous avons observé que ces effets sont quasi immédiats, les sols soumis au changement par conversion de la prairie en culture et du semis direct en labour s'apparentent très rapidement aux sols restés continuellement sous culture annuelle et annuellement labourés. Dans la situation prairiale étudiée à Lusignan par contre, les « bénéfiques » de l'installation de la prairie ne sont pas visibles en 3 ans et laissent penser que l'accumulation de matières organiques issues du couvert prairial n'est pas proportionnelle à l'âge de la prairie, mais s'accélère avec le temps. Elle est également très influencée par le mode d'utilisation de la prairie avec beaucoup moins de restitutions organiques au sol en prairies de fauche comparées aux prairies pâturées, *via* les résidus végétaux et *via* les déjections animales au pâturage.

On voit donc que les caractéristiques acquises par plusieurs années de semis direct ou de présence de la prairie sont annulées quasi immédiatement par le changement, avec des effets sur les flux de minéralisation significatifs pendant quelques mois, voire deux ou trois ans (voir par exemple VERTES *et al.*, ce colloque). En revanche, et on le comprend finalement bien, la conversion inverse du labour vers le semis direct n'est pas une perturbation mais un arrêt de la perturbation annuelle provoquée par le labour. Les caractéristiques spécifiques au non-labour vont s'établir progressivement, en relation avec l'évolution des matières organiques et de la structure du sol à la surface. Sur le site de l'ORE ACBB d'Estrées-Mons, le passage du labour profond au travail superficiel (5-7 cm) conduit à une augmentation significative de la teneur en C de la couche superficielle et de l'agrégation en 4 ans (BAYAD, 2014). Les effets sont augmentés quand le semis-direct est associé à la mise en place d'une plante de couverture, modalité étudiée sur le site expérimental Inra de La Cage (Figure 3).

Du point de vue de la gestion environnementale, **cette forte dissymétrie temporelle** dans les impacts des changements de pratiques culturales sont à prendre en compte pour mettre au point des systèmes de culture innovants et à haute qualité environnementale.

Figure 3 : Effet de la mise en place de systèmes de culture associés à une réduction du travail du sol sur la répartition des matières organiques dans le sol (figure à gauche) et sur la stabilité structurale de la couche superficielle du sol (5 cm) (figure à droite). Prod : système de culture productif, avec labour, SCV : système de culture avec semis direct et une plante de couverture (fétuque rouge), DMP : diamètre moyen pondéré des agrégats du sol après un test simulant l'effet d'une pluie arrivant sur un sol sec ; il augmente lorsque la stabilité structurale du sol augmente. Dans la figure de droite on a exprimé le ratio entre le DMP de plusieurs systèmes par rapport au système de référence (productif, avec labour), la ligne horizontale en tirets correspond donc à la situation où il n'y a pas de variation par rapport à la référence). Source : C. Chenu non publié.



Conclusions

L'évolution des systèmes de culture et des pratiques culturales au sein de ces systèmes, mobilise davantage que par le passé les différentes composantes de la fertilité des sols, parce que ces systèmes reposent de manière accrue sur le fonctionnement physique et biologique des sols pour l'approvisionnement en nutriments des cultures. De fait, les nouvelles pratiques culturales (insertion de cultures intermédiaires, insertion de prairies temporaires, cultures associées, augmentation des légumineuses dans les rotations, réduction du travail du sol, substitution des apports minéraux par les apports organiques, etc.) visent à minimiser les fuites vers les aquifères et vers l'atmosphère, à augmenter le potentiel de séquestration en carbone du sol, à préserver la biodiversité, tout en permettant des productions végétales en quantité et qualité. La mise en œuvre et le succès de cet ensemble de pratiques repose sur une meilleure compréhension des processus déterminant la fertilité des sols et leur interactions complexes.

Références bibliographiques

- ABIVEN, S., RECOUS S., REYES V., OLIVER R., 2005. Mineralization of C and N from root, stem and leaf-residues in soil and role of their biochemical quality. *Biology and Fertility of Soils* 45, 119-128.
- ANGERS D., RECOUS S., 1997. Decomposition of wheat straw and rye in soil as affected by particle size. *Plant and Soil* 189, 197-203.
- ATTARD, E., LE ROUX, X., LAURENT F., CHABBI A., NICOLARDOT B., RECOUS S., 2011. Impacts de changements d'occupation et de gestion des sols sur la dynamique des matières organiques, les communautés microbiennes et les flux de carbone et d'azote. *Etude et Gestion des Sols*, 18, 3, 147-159.
- BAYAD M., 2014. La dynamique du carbone et la stabilité des agrégats dans un sol sous l'effet des pratiques culturales. Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès (ENA) – INRA. 53 pages.
- BERTRAND I., CHABBERT B., KUREK B., RECOUS S., 2006. Can the biological features and histology of wheat residues explain their decomposition in soil ? *Plant and Soil*, 281 :291-307
- BERTRAND, I., LASHERMES G., RECOUS S., 2011. Importance des parties souterraines des plantes sur les cycles couplés du Carbone et de l'Azote. 10èmes Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'analyse (COMIFER-GEMAS), Reims (France), 23-24/11/2011. (communication orale)
- BOOTH, M. S., STARK J. M., RASTETTER E., 2005. Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: A synthetic analysis of literature data. *Ecological Monographs* 75(2): 139-157.
- CHENU C., S. ABIVEN, M. ANNABI, S. BARRAY, M. BERTRAND, F. BUREAU, D. COSENTINO, F. DARBOUX, O. DUVAL, L. FOURRIÉ, C. FRANCOU, S. HOUOT, C. JOLIVET, K. LAVAL, Y. LE BISSONNAIS, L. LEMÉE, S. MENASSERI, J.-P. PÉTRAUD et B. VERBÈQUE., 2011. Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 18, 161 -174.
- CHENU, C. et COSENTINO, D., 2011. Microbial Regulation of Soil Structure Dynamics. In: Ritz, K. and Young, I. (ed.) *The Architecture and Biology of Soils: Life in Inner Space*. CABI, Wallingford, UK, 37-70.
- COPPENS F., GARNIER P. DE GRYZE S., MERCKX R., RECOUS S., 2006. Soil moisture, carbon and nitrogen dynamics following incorporation and surface application of labelled residues in soil columns. *European Journal of Soil Science* 57, 894-905.
- GAILLARD V., CHENU C., RECOUS S., RICHARD G., 1999. C, N and microbial gradients induced by plant residues decomposing in soil. *European Journal of Soil Science* 50, 4, 567-578.
- IQBAL A., 2013. Rôle des mulchs de résidus végétaux dans les fonctions écologiques attendues des systèmes de culture en agriculture de conservation. Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne.
- IQBAL A, BEAUGRAND J., GARNIER P., RECOUS S., 2013. Tissue density determines the water storage characteristics of crop residues. *Plant and Soil* 367, 285–299.
- IQBAL A., GARNIER P., LASHERMES G., RECOUS S., 2014. A new equation to simulate the contact between soil and maize residues of different sizes during their decomposition. *Biology and Fertility of Soils* 50:645–655.

- JUSTES E., MARY B., NICOLARDOT B., 2009. Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and Soil* 325, 171-185.
- MURPHY, D. V., RECOUS S., STOCKDALE E., FILLERY I.R.P., JENSEN L.S., HATCH D.J., GOULDING K.W.T., 2003. Gross nitrogen fluxes in soil : theory, measurement and application of 15N pool dilution techniques. *Advances in Agronomy*, Academic Press. Volume 79: 69-118.
- NICOLARDOT B., RECOUS S., MARY B., 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil* 228, 1, 83-103.
- RECOUS S., ROBIN D., DARWIS D., MARY B., 1995. Soil inorganic N availability : effect on maize residue decomposition. *Soil Biology & Biochemistry* 27, 12, 1529-1538
- RECOUS S., AITA C., MARY B., 1999. In situ changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw. *Soil Biology & Biochemistry* 31, 1, 119-133.
- REDIN M., GUÉNON R., RECOUS S., SCHMATZ R., DE FREITAS L.L., AITA C., GIACOMINI S.J., 2014a. Carbon mineralization in soil of roots from twenty crop species, as affected by their chemical composition and botanical family. *Plant and Soil*, 378, 205-214.
- REDIN M., RECOUS S., AITA C., DIETRICH G., SKOLAUDE A.C., LUDKE W.H., SCHMATZ R. GIACOMINI S.J., 2014b. How the chemical composition and heterogeneity of crop residue mixtures decomposing at the soil surface affects C and N mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 78, 65-75.
- SANAULLAH M, RUMPEL C, CHARRIER X, CHABBI A, 2012. How does drought stress influence the decomposition of plant litter with contrasting quality in a grassland ecosystem? *Plant Soil* 352: 277-288.
- SEBILLOTTE M., 1989. Fertilité et systèmes de production. INRA, Paris. 369 pages.
- THÉVENET G., 2003. La fertilisation des cultures : une dose nécessaire et suffisante pour une agriculture résolument durable. In Thévenet G & Faedy L (eds) *Les fertilités des sols et les systèmes de culture*. Pp. 13-18.
- THIÉBEAU P., IQBAL A., RECOUS S., 2011. Eléments de caractérisation de la biomasse d'un mulch en systèmes d'agriculture de conservation. 10èmes Rencontres de la Fertilisation Raisonnée et de l'analyse (COMIFER-GEMAS), Reims (France), 23-24/11/2011. (poster)
- VANLAUWE B, Vanlangenhove G, Merckx R, Vlassak K., 1995. Impact of rainfall regime on the decomposition of leaf litter with contrasting quality under subhumid tropical conditions. *Biol Fert Soils* 20: 8-16
- VERTÈS F., JEUFFROY M.H., LOUARN G., VOISIN A-S., JUSTES E., 2015. Légumineuses et prairies temporaires : des fournitures d'azote pour les rotations, *Actes des Journées AFPP 2015*, cet ouvrage.
- VERTÈS F., HATCH D., VELTHOF G., TAUBE F., LAURENT F., LOISEAU P., RECOUS S., 2007. Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations. In: A. de Vliegler and L. Carlier (Eds.). *Permanent and temporary grassland: Plant, Environment and Economy*. *Grassland Science in Europe* 12, 227-246