

L'azote : l'épée à double tranchant

Nitrogen: the double-edged sword

Traduction Jean-Luc galabert
(Inter-Culturel, ISI Home-green Solutions, <https://lavierebelle.org>)

En tant que composant des protéines et de l'ADN, l'azote est essentiel à tous les êtres vivants. Avant la révolution industrielle, environ 97 % de l'azote nécessaire à la vie sur Terre était fixé biologiquement. Cependant, au cours du siècle dernier, l'intensification de l'agriculture, associée à une méconnaissance des communautés microbiennes du sol, a entraîné une réduction de l'activité biologique et une augmentation de l'utilisation d'engrais azotés industriels sur les terres agricoles.

En 2013, les céréaliers australiens ont dépensé près de 3 milliards de dollars en engrains azotés inorganiques (Marino 2014). À l'échelle mondiale, plus de 100 milliards de dollars d'engrais azotés sont épandus chaque année sur les cultures et les pâturages. Entre 10 % et 40 % de l'azote (N) épandu est absorbé par les plantes. Les 60 à 90 % restants sont lessivés dans l'eau, volatilisés dans l'air ou immobilisés dans le sol.

Les impacts de l'azote minéral

L'application de quantités élevées d'azote inorganique en agriculture a eu de nombreuses conséquences négatives et imprévues sur la fonction des sols et la santé environnementale. Les données issues de l'expérience de terrain la plus longue jamais menée en Amérique du Nord sur l'impact des méthodes agricoles sur la qualité des sols ont révélé que des apports élevés d'azote appauvrisse le carbone du sol et nuisent à sa capacité de rétention d'eau. Ironiquement, ils appauvrisse également l'azote du sol (Khan et al., 2007 ; Larson, 2007).

Pris ensemble, ces facteurs aident à comprendre les nombreux rapports qui parlent de la stagnation des rendements à travers le monde (Mulvaney et al., 2009).

La combinaison de ces facteurs a été identifiée comme la cause sous-jacente de la stagnation généralisée des rendements agricoles observée dans le monde entier (Mulvaney et al., 2009).

Bien que l'azote soit essentiel à la croissance des plantes, des données de terrain suggèrent que l'application de grandes quantités d'azote sous forme d'engrais inorganiques est néfaste pour le sol. Elle est également néfaste pour l'eau. L'USDA estime que le coût de l'élimination des nitrates de l'eau potable aux États-Unis dépasse 4,8 milliards de dollars par an, tandis que le lessivage de l'azote provenant des terres agricoles est la principale source de pollution par les nutriments contribuant à la vaste « zone morte » dans le golfe du Mexique (Ceres, 2014).

Heureusement, toutes les nouvelles ne sont pas mauvaises. Dans certains pays développés, les taux d'épandage d'engrais ont diminué ces dernières années. La France, l'Allemagne et le Royaume-Uni ont obtenu de bons résultats à cet égard, atteignant des rendements élevés avec 40 à 50 % d'engrais en moins par rapport aux années 1980 (Krietsch, 2014).

Une bonne gestion de l'azote est la clé d'une agriculture productive et rentable. Elle est également essentielle pour la formation du carbone dans le sol. Des niveaux élevés d'azote inorganique inhibent les micro-organismes essentiels à la séquestration, ce qui empêche la formation de formes stables de carbone dans le sol (telles que l'humus).

Fixation biologique de l'azote

À l'échelle mondiale, la fixation biologique d'azote représente environ 65% de cet élément destiné aux cultures et aux pâtures. Ce pourcentage peut être augmenté considérablement étant donné que le diazote (N_2) représente près de 80% de l'atmosphère terrestre. La clé se trouve dans la transformation de l'azote inerte de l'air en une forme biologiquement active.

Une grande partie de l'azote actuellement utilisé dans l'agriculture provient du procédé Haber-Bosch, mis au point au début des années 1900. Ce procédé combine par catalyse l'azote atmosphérique avec l'hydrogène, dérivé du gaz naturel ou du charbon, pour produire de l'ammoniac dans des conditions de température et de pression élevées. Cependant, le procédé Haber-Bosch utilise des ressources non renouvelables, est très énergivore et coûteux.

Heureusement - grâce à la « magie enzymatique » - l'azote atmosphérique l'azote atmosphérique peut être gratuitement converti en ammoniac par une multitude de bactéries et d'archées qui fixent l'azote de l'air gratuitement.

Idéalement, l'ammoniac ainsi nouvellement fixé est rapidement incorporé dans des molécules organiques telles que les acides aminés et des acides humiques. Ces molécules stables sont vitales pour la fertilité du sol et ne se perdent ni par volatilisation ni par lessivage. Mais, il est important de réaliser que le processus permettant de stabiliser l'azote nécessite un apport régulier et constant de carbone, qui est également fixé biologiquement. Nous y reviendrons dans un instant.

Quels microorganismes sont impliqués?

Il est important de reconnaître que la capacité à fixer l'azote ne se limite pas aux bactéries associées aux légumineuses. La chlorophylle fait partie d'un complexe protéique, donc partout où l'on trouve des plantes vertes, des bactéries ou des archées fixatrices d'azote seront également présentes.

Contrairement aux bactéries rhizobiales, cependant, la plupart des microbes fixateurs d'azote ne peuvent pas être cultivés en laboratoire. Cela pose des défis techniques lorsqu'il s'agit d'évaluer leur fonction écologique. Mais récemment des méthodes biomoléculaires détectant la présence du gène *nifH* de la nitrogenase réductase, ont révélé une étonnante diversité de bactéries et d'archées fixatrices d'azote, et ceci, dans des environnements les plus variés.

Bien que les procédures permettant de quantifier la quantité d'azote fixée par bon nombre de ces groupes fassent défaut, nous savons que, comparé aux sols restés nus, les micro-organismes fixateurs d'azote sont beaucoup plus diversifiés et abondants dans les sols recouverts de végétation vivante, en particulier de graminées, tout au long de l'année.

Outre les bactéries et les archées fixatrices d'azote, les champignons mycorhiziens jouent également un rôle essentiel dans le processus de fixation de l'azote. Bien qu'ils ne fixent pas eux-mêmes l'azote, les champignons mycorhiziens transfèrent de l'énergie sous forme de carbone liquide aux fixateurs d'azote associés (Jones, 2008). Ils transportent également l'azote fixé biologiquement vers les plantes sous forme organique, par exemple sous forme d'acides aminés tels que la glycine, l'arginine, le chitosane et la glutamine (Leake et al., 2004 ; Whiteside et al., 2009).

L'acquisition et le transfert d'azote organique par les champignons mycorhiziens sont très efficaces sur le plan énergétique. Cette voie ferme la boucle de l'azote, réduisant ainsi la nitrification, la dénitrification, la volatilisation et le lessivage. De plus, le stockage de l'azote sous forme organique empêche l'acidification du sol.

La voie du carbone liquide (liquid carbon pathway)

Malgré son abondance dans l'atmosphère, l'azote est souvent l'élément le plus limitant pour les plantes. Or, il y a une raison pour ça. Le carbone, l'élément essentiel de la photosynthèse et du bon fonctionnement du sol, se présente sous la forme d'un gaz, le dioxyde de carbone, présent actuellement dans l'atmosphère à une teneur de 0,04%. Le moyen le plus efficace pour transformer le CO₂ en complexes organiques stables (contenant à la fois du Carbone et de l'azote) est par la voie du carbone liquide. Le besoin en azote fixé biologiquement est le moteur de ce processus.

Si les plantes pouvaient prélever de l'azote directement dans l'atmosphère, leur croissance serait entravée par l'absence de terres arables riches en carbone. Or, l'agriculture conventionnelle se trouve aujourd'hui face à une telle impasse. Si l'azote est apporté sous forme synthétique, le flux de carbone vers des microorganismes fixateurs d'azote est inhibé, ce qui appauvrit les sols en carbone.

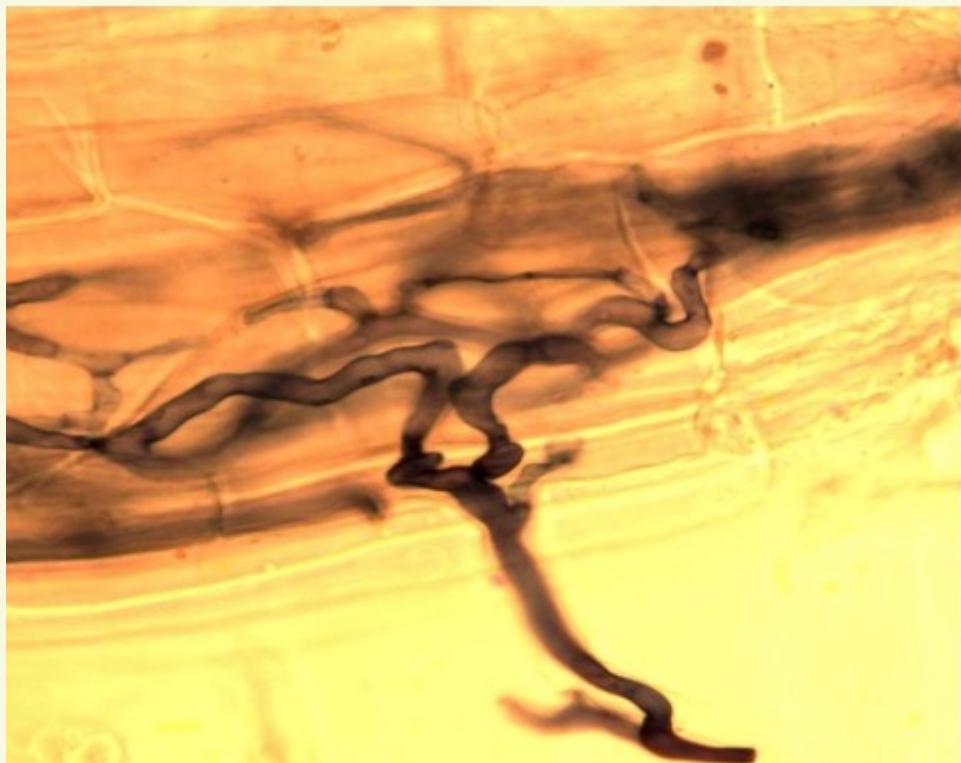
Des flux de carbone réduite ont une incidence sur un vaste réseau de communautés microbiennes limitant ainsi la disponibilité de minéraux essentiels, d'oligo-éléments, de vitamines et d'hormones pour permettre aux plantes de faire face à la pression d'insectes et de maladies ainsi qu'aux stress environnementaux telles que gelées et sécheresse. La plus faible teneur des plantes en micronutriments se traduit ensuite à une moindre valeur nutritive des aliments.

La réduction des flux de carbone a un impact sur un vaste réseau de communautés microbiennes, limitant la disponibilité des minéraux essentiels, des oligo-éléments, des vitamines et des hormones qui permettent aux plantes de faire face à la pression d'insectes et résister aux maladies ainsi que mieux tolérer des stress environnementaux tels que le gel ou la sécheresse. La diminution de la densité en micronutriments dans les plantes se traduit également par une réduction de la valeur nutritionnelle des aliments.

En surface, la croissance des plantes semble souvent « normale », de sorte que le lien avec la dégradation des fonctions du sol n'est pas immédiatement évident. Mais sous la surface, nos sols sont en train d'être détruits.

Idéalement, les pratiques agricoles - et les amendements utilisés en agriculture - devraient améliorer le taux de photosynthèse et augmenter le flux de carbone vers le sol, en soutenant les communautés microbiennes associées aux plantes (Fig. 1).

Fig. 1. Coupe transversale d'une racine de plante montrant les hyphes filiformes des champignons mycorhiziens.



Ces hyphes mycéliens transportent l'énergie solaire sous forme de carbone liquide vers une vaste gamme de microrganismes impliqués dans la nutrition des plantes et le contrôle des maladies. En échange de carbone, l'azote organique, le phosphore, le soufre, le potassium, le calcium, le magnésium, le fer et les oligo-éléments essentiels tels que le zinc, le manganèse et le cuivre sont apportés aux racines des plantes. Avec l'apport de quantités élevées d'azote et / ou de phosphore inorganique, le transfert de nutriments est inhibé. Photo Jill Clapperton

Déterminer le taux de sucre en brix à l'aide d'un réfractomètre est un moyen simple pour mesurer le pouvoir photosynthétique des feuilles vertes ce qui permet d'évaluer le soutien que la plante apporte à son cheptel souterrain. Tout ce qui freine la capacité photosynthétique d'une plante ou d'une culture est contreproductif et va à l'encontre de la durabilité.

Comment pouvons-nous utiliser notre compréhension de la voie du carbone liquide pour restaurer la fertilité naturelle des terres agricoles ?

Déterminer les niveaux de brix à l'aide d'un réfractomètre est un moyen simple d'évaluer la vitesse à laquelle les feuilles vertes effectuent la photosynthèse et favorisent ainsi les micro-organismes associés au sol. Tout ce qui réduit la capacité photosynthétique des terres ou le taux de photosynthèse de la végétation est contreproductif et va à l'encontre de la durabilité.

Comment pouvons-nous utiliser notre compréhension du cycle du carbone liquide pour restaurer la fertilité naturelle des terres agricoles ?

La formation d'agrégats est la clé

Les agrégats sont les petits « grumeaux » qui donnent au sol sa texture granuleuse, sa porosité et sa capacité d'emmageriser de l'eau. Sans agrégation activé, les sols ne peuvent pas fixer des quantités

significatives d'azote atmosphérique ni séquestrer des formes stables de carbone. Les trois fonctions – agrégation, fixation biologique de l'azote et séquestration de C stable – sont interdépendantes.

Les microorganismes impliqués dans la formation d'agrégats de sol ont besoin d'une source d'énergie. Cette énergie provient initialement du soleil. Grâce au miracle de la photosynthèse les plantes vertes transforment l'énergie lumineuse du soleil, l'eau et le dioxyde de carbone en énergie biochimique. Celle-ci est ensuite transférée au sol sous forme de carbone liquide au sol via un réseau complexe de champignons mycorhiziens et de bactéries associées.

À quoi ressemblent les agrégats de sols ?

Fig. 2. Les deux plants de blé de gauche ont été cultivés avec des graminées vivaces dans le cadre d'une association culture-pâturage (Pasture Crop) alors que le plant de blé à droite a été cultivé dans une parcelle voisine dans un sol nu et fertilisé avec 100 kg/ha de DAP.

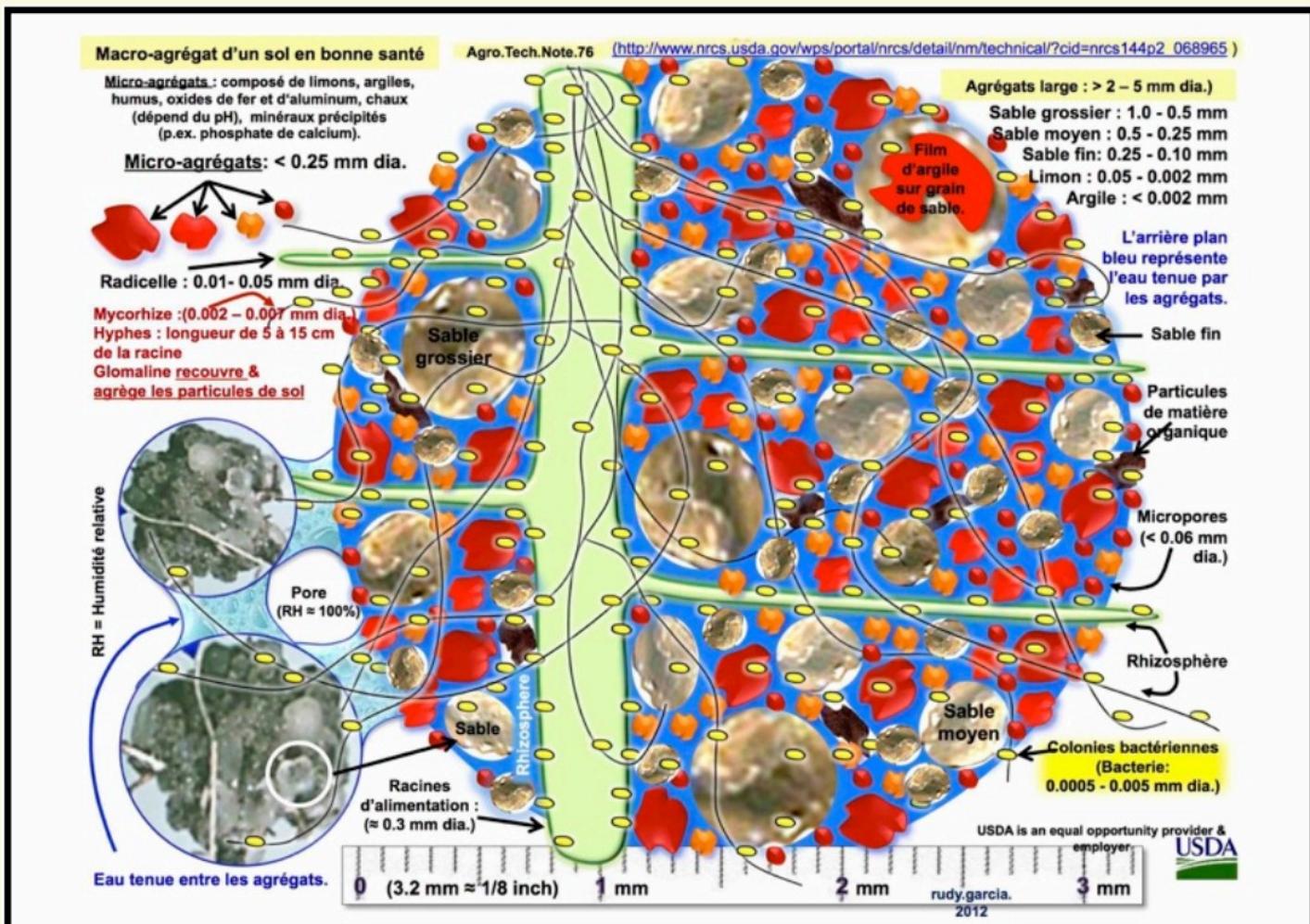


Notez les petits grumeaux collant aux racines du blé cultivé en association avec les graminées pérennes (figure 2). Ces grumeaux sont formés par des microorganismes utilisant du carbone liquide sécrétés par des racines. Les micro-agrégats, trop petits pour être vus à l'œil nu, sont liés par des colles et des gommes microbiennes ainsi que par les hyphes des champignons mycorhiziens (utilisant également du carbone liquide), pour former de plus gros grumeaux appelés macro-agrégats dont le diamètre se situe généralement entre 2 et 5 mm.

Les macro-agrégats sont essentiels à la bonne structure du sol, la circulation de l'air, l'infiltration et le stockage de l'eau, la fixation biologique de l'azote et à la séquestration du carbone. Bref, sans eux, il n'est pas possible de garder des sols en bonne santé.

Jetons un coup d'oeil à l'intérieur d'un macro-agrégat grâce à cette fabuleuse illustration (figure 3) de Rudy Garcia, agronome d'Etat avec le Service de conservation des ressources naturelles du USDA au Nouveau-Mexique.

Fig.3. Représentation schématique d'un macro-agrégat de sol.



La ligne verticale verte est une racine d'alimentation fine et les lignes horizontales vertes sont des cheveux radiculaires. L'assortiment de particules rouges et orange sont des microagrégrats tandis que les formes brunes dispersées représentent des particules de matière organique. Les sphères de couleur claire sont des grains de sable de différents grossissements, souvent revêtus d'oxydes de fer et d'aluminium, tandis que les petites ellipses jaunes sont des colonies bactériennes, y compris des fixateurs d'azote et des espèces qui solubilisent le phosphore. Les brins fins qui vont dans toutes les directions sont les hyphes de champignons mycorhiziens. Ils sont essentiels à la cohésion des particules de sol et à l'apport de carbone aux communautés microbiennes à l'intérieur des agrégats. Selon le pH du sol, il y aura également des précipitats minéraux tels que le phosphate de fer et de calcium. Le fond bleu est l'eau contenue dans l'agrégat. Illustration de Rudy Garcia, USDA-NRCS

Une caractéristique clé de l'aggregation est le fait que les niveaux d'humidité et de carbone liquide sont plus élevés à l'intérieur des agrégats collés aux racines que dans le sol autour, alors que la pression partielle d'oxygène est plus faible dans ces agrégats que dans le sol autour. Ces conditions sont essentielles pour le bon fonctionnement de l'enzyme azotase qui sert à la fixation biologique de l'azote ainsi qu'à la formation d'humus.

Au sein des agrégats collés aux racines, le carbone liquide est transféré des radicelles aux hyphes des champignons mycorhiziens qui le transportent vers des communautés microbiennes d'une

grande complexité. Les microorganismes qui reçoivent ce carbone - et leurs métabolites - contribuent à la transformation de sucres simples en polymères humiques hautement stables, dont une partie comprend de l'azote biologiquement fixé et du phosphore solubilisé par des bactéries. Le fer et l'aluminium, présents dans la matrice minérale sous forme d'oxydes, sont des catalyseurs importants.

Il est désormais reconnu que les exsudats racinaires contribuent davantage à l'élaboration de formes stables de carbone (c'est-à-dire aux complexes organo-minéraux contenant du carbone organique et de l'azote organique) que la biomasse aérienne (Schmidt et al., 2011) Mais voici le hic. La colonisation mycorhizienne est faible lorsque de grandes quantités d'azote inorganique sont employées ... et les mycorhizes sont inactives quand il n'y a pas de plantes. Par conséquent, la fixation biologique de l'azote et l'humification se font rares dans les systèmes agricoles où il y a alternance entre des cultures qui reçoivent des doses importantes de N et des jachères où le sol reste nu. que jusqu'à 80 kg d'azote par hectare peuvent se volatiliser à partir des jachères d'été nues en raison de la dénitrification. En revanche, si des plantes vertes sont présentes, cet azote peut être absorbé et recyclé, évitant ainsi une perte irrémédiable.

Quand le sol est nu, il n'y a pas de photosynthèse et très peu d'activité biologique. Les sols perdent alors du carbone et de l'azote, les cycles métaboliques ne fonctionnent plus, les agrégats et la structure se détériorent et la capacité de stocker de l'eau se trouve diminuée. Les jachères nues, sensé conserver de l'eau et les nutriments, deviennent donc contre-productives ; elles sont une aberration.

Le maintien de jachères nues - ou l'utilisation de taux élevés d'azote inorganique dans les cultures ou les pâturages - ou pire, les deux - entraîne le découplage des cycles de l'azote et du carbone qui fonctionnent en synergie depuis des millénaires. La photosynthèse est le processus le plus important qui sous-tend la vie sur terre. La fixation biologique de l'azote par les non-légumineuses est le deuxième.

Il est important de faire la distinction entre l'azote fixé dans les nodules sur les racines des plantes légumineuses et l'azote fixé dans les agrégats formés en association avec les racines des plantes non légumineuses. Dans ce dernier cas, l'azote peut être incorporé dans des acides aminés et des substances humiques. Ce phénomène est beaucoup moins susceptible de se produire dans les peuplements de légumineuses pures. Les légumineuses sont riches en minéraux et en oligo-éléments et constituent un élément important des systèmes agricoles. Cependant, à moins d'être cultivées en association avec des plantes non légumineuses, elles peuvent appauvrir le carbone du sol par le même mécanisme que celui qui est à l'œuvre avec les engrains à haute teneur en éléments fertilisants.

Favoriser la voie du carbone liquide

L'importance fondamentale des communautés microbiennes du sol pour la productivité des plantes est de plus en plus reconnue. Malheureusement, de nombreuses fonctions biologiques sont compromises par les pratiques agricoles couramment utilisées.

De changer les pratiques agricoles n'est pas difficile. La première étape consiste à reconnaître l'importance de la présence tout au long de l'année de plantes vertes et des populations microbiennes qu'elles abritent.

Revoir sa manière de faire a le potentiel de réduire considérablement l'impact de nombreux « problèmes » associés à l'agriculture chimique, notamment la perte de carbone dans le sol, la

réduction de l'azote dans le sol, le compactage du sol, la baisse du pH, la faible disponibilité des nutriments, la résistance aux herbicides et la diminution de la capacité de rétention d'eau.

Il existe quatre principes fondamentaux en agriculture régénératrice qui permettent de restaurer la santé des sols et d'augmenter leurs niveaux de carbone et d'azote organiques. A partir de ces principes, il est possible de mettre en place des pratiques adaptées aux cultures et aux pâtures.

1) Le premier principe est le maintien d'une couverture végétale vivante tout au long de l'année, grâce à des pâturages pérennes sur les terres pâturées et/ou à des cultures de couverture multispécifiques sur les terres cultivées. Presque tous les êtres vivants dans et sur le sol dépendent des plantes vertes (ou de ce qui était autrefois une plante verte) pour leur existence. Plus il y a de plantes vertes, plus il y a de vie.

Il est bien connu que la couverture du sol régule la température et réduit l'érosion. Ce qui est peut-être moins connu, est qu'une couverture végétale en pleine croissance produit du carbone liquide qui, à son tour, alimente les champignons mycorhiziens, les bactéries fixatrices d'azote et les bactéries qui mobilisent le phosphore. Ces fonctions sont essentiels aussi bien pour nourrir les cultures que pour la formation de complexes carbonés stables.

2) Le deuxième principe consiste à soutenir le pont microbien afin d'améliorer le flux de carbone des plantes vers le sol. Cela nécessite de réduire les apports d'engrais azotés et phosphorés à haute teneur qui inhibent la signalisation biochimique complexe entre les racines des plantes et les micro-organismes.

3) Le troisième principe est de promouvoir la diversité végétale et microbienne. Plus la diversité végétale est grande, plus les contrôles et les équilibres entre les ravageurs et les maladies sont importants, et plus la gamme de microhabitats pour les organismes du sol impliqués dans l'acquisition des nutriments, le cycle des nutriments et la formation du sol est large.

4) Le quatrième principe est la présence d'animaux qui, avec une conduite appropriée, ont une influence positive pour le sol. Outre les avantages découlant de l'apport de fumier et d'urine aux sols, le pâturage tournant augmente l'exsudation racinaire qui, à son tour, stimule le développement et l'activité des bactéries fixatrices de N de la rhizosphère. Ce processus, stimulé par la défoliation régulière des plantes, fournit l'azote supplémentaire dont les plantes ont besoin pour un développement optimal.

Le sevrage par rapport aux engrains azotés

Les activités des bactéries symbiotiques associatives fixatrices d'azote sont inhibées par des niveaux élevés d'azote inorganique. En d'autres termes, plus nous appliquons d'engrais azotés, moins l'azote est fixé par les processus naturels.

Il est donc important de sevrer les sols de l'azote inorganique, mais il faut le faire LENTEMENT. Les communautés microbiennes ont besoin de temps pour s'adapter. La fonction du sol ne peut pas revenir du jour au lendemain. La transition prend généralement environ trois ans.

Les apports d'azote peuvent être réduits de 20 % la première année, de 30 % la deuxième année et de 30 % supplémentaires la troisième année. Au cours de la quatrième année et des années suivantes, l'application d'une très petite quantité d'azote inorganique (jusqu'à 5 kg N/ha) contribuera à amorcer les processus naturels de fixation de l'azote. La réduction du N inorganique, doit être accompagné d'une couverture végétale diversifiée, aussi bien dans les pâtures que pour les cultures.

Conclusion

La fixation biologique de l'azote est le facteur clé des cycles de l'azote et du carbone dans tous les écosystèmes naturels, tant sur terre que dans l'eau. Dans la mesure où il est géré correctement, la fixation biologique de l'azote peut également être le facteur déterminant de la productivité agricole.

De nombreux agriculteurs à travers le monde découvrent par leur propre expérience comment restaurer la fertilité naturelle du sol en abandonnant les jachères à sol nu et en allant vers des systèmes où les apports d'azote minéral se trouvent réduits et où, toute l'année, il y a la présence d'une couverture végétale diversifiée.

Un meilleur fonctionnement du sol offre des avantages tant pour la ferme que pour l'environnement d'une manière générale.

Références

Ceres (2014). Water and climate risks facing U.S. corn production. 11 June 2014.

<http://www.ceres.org/issues/water/agriculture/the-cost-of-corn/the-cost-of-corn>

Jones, C.E. (2008). Liquid carbon pathway unrecognised. Australian Farm Journal, July 2008, pp.15-17. www.amazingcarbon.com

Khan, S.A., Mulvaney, R.L., Ellsworth, T.R. and Boast, C.W. (2007). The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality* 36:1821-1832. doi:10.2134/jeq2007.0099

Krietsch, B (2014). Artificial fertilizer use levels-off as regions reach state of diminishing returns. <http://foodtank.com/news/2014/04/fertilizer-use-levels-off-as-regions-reach-state-ofdiminishing-returns> Larson, D. L (2007). Study reveals that nitrogen fertilizers deplete soil organic carbon. University of Illinois news, October 29, 2007.

<http://www.aces.uiuc.edu/news/internal/preview.cfm?NID=4185>

Leake, J.R., Johnson, D., Donnelly, D.P., Muckle, G.E., Boddy, L. and Read, D.J. (2004). Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning. *Canadian Journal of Botany*, 82: 1016-1045. doi:10.1139/B04-060

Marino, M. (2014). Managing microbes to manage nitrogen. GRDC Ground Cover, Issue 110, May-June 2014, p.11. <https://grdc.com.au/Media-Centre/Ground-Cover/GC110/Managingmicrobes-to-manage-nitrogen>

Mulvaney, R.L., Khan S.A. and Ellsworth, T.R. (2009). Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: a global dilemma for sustainable cereal production. *Journal of Environmental Quality* 38: 2295-2314. doi:10.2134/jeq2008.0527

Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., gel-Knabner, I. K., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S. and Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478: 49-56. doi:10.1038/nature10386

Whiteside, M. D., Treseder, K. K. and Atsatt, P. R. (2009). The brighter side of soils: Quantum dots track organic nitrogen through fungi and plants. *Ecology* 90:100–108. doi: 10.1890/07-2115.1