

L'azote : l'épée à double tranchant

Dr. Christine Jones

Fondatrice de Amazing Carbon

www.amazingcarbon.com



L'azote est un composant des protéines et de l'ADN et, en tant que tel, est un élément essentiel pour le monde du vivant. Avant la révolution industrielle, environ 97% de l'azote soutenant la vie sur terre était fixé biologiquement. Au cours du siècle dernier, l'intensification de l'agriculture, accompagnée d'un manque de connaissances par rapport aux communautés microbiennes du sol, a entraîné une diminution de l'activité biologique et une utilisation de plus en plus importante de formes d'azote issues de l'industrie.

En 2013, les céréaliers australiens ont dépensé près de \$3 milliards de dollars pour l'achat d'engrais azotés minéraux (Marino 2014). Au niveau planétaire ce montant dépasse les \$100 milliards. Entre 10 et 40% seulement du N ainsi apporté sont absorbés par les cultures. Les 60-90% restants sont lessivés, volatilisés ou immobilisés dans le sol.

L'impact de l'azote minéral

L'utilisation de grandes quantités d'azote inorganique en agriculture a eu de nombreux effets secondaires aussi bien pour le sol que pour l'environnement. Les données issues de la plus ancienne plateforme d'expérimentation aux Etats-Unis montrent que des apports élevés d'azote appauvrissent le sol en carbone, nuisent à sa capacité de rétention hydrique et, ironiquement, épuisent également le N du sol ([Khan et al., 2007](#), [Larson 2007](#)).



De fortes doses d'engrais azotés appauvrissent le sol
Les parcelles des deux cotés d'une ancienne clôture ont un historique de fortes doses d'engrais azotés !

Ajouté par le traducteur (Photo de Richard May issu d'un article de C. Jones.)

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](#)).

Les observations suggèrent que, malgré le fait que l'azote soit essentiel à la croissance des plantes, l'utilisation de grandes quantités de N sous une forme minérale est préjudiciable pour le sol. Et préjudiciable aussi pour l'eau. L'USDA estime que le coût pour enlever le nitrate afin de rendre l'eau potable dépasse les \$ 4,8 milliard par an, sachant par ailleurs que le lessivage

d'azote et d'autres nutriments d'origine agricole sont devenu une source de pollution majeur qui contribue à l'énorme "zone morte" dans le Golfe du Mexique.

Heureusement, les nouvelles ne sont pas que mauvaises. Dans quelques pays développés les quantités d'engrais utilisées ont diminué ces dernières années. La France, l'Allemagne et le Royaume-Uni ont progressé dans ce domaine, maintenant des rendements élevés avec quarante à cinquante pour cent d'engrais en moins que dans les années 80 (Krietsch 2014).

Une bonne gestion de l'azote est la clé d'une agriculture productive et économiquement rentable. C'est aussi la clé de l'augmentation de la matière carbonée dans le sol. A cause de l'effet inhibiteur sur les microbes essentiels à la fixation d'azote, les formes stables de carbone (tel que l'humus) ne peuvent pas se former en présence de taux élevés d'azote inorganique.

Fixation biologique de l'azote (FBA)

À l'échelle mondiale, la fixation biologique d'azote représente environ 65% de l'azote utilisé par les cultures et les pâtures. IL y a là un champ de développement d'une ampleur considérable. L'approvisionnement en azote est inépuisable 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 utilisée aujourd'hui en agriculture est issue du processus Haber-Bosch développé en Allemagne au début des années 1900. Ce processus combine par catalyse l'azote atmosphérique avec l'hydrogène dérivé du gaz naturel ou du charbon pour produire de l'ammoniac. Utilisant des ressources non renouvelables et passant par des températures et des pressions élevées, ce processus chimique consomme beaucoup d'énergie et coûte très cher.

Coup de chance - grâce à de la «magie enzymatique» - l'azote atmosphérique se laisse transformer en ammoniac par une multitude de bactéries et d'archées qui fixent l'azote de l'air - gratuitement.

Idéalement, l'ammoniac ainsi assimilé est incorporé rapidement 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. Fait important, le processus permettant de stabiliser l'azote nécessite un apport régulier de carbone - également fixé biologiquement. Nous y reviendrons dans un moment.

Quels microorganismes sont impliqués?

Il faut savoir que la capacité à fixer de l'azote ne se limite pas aux seules bactéries associées aux légumineuses. La chlorophylle fait partie d'un complexe protéique. Donc a chaque fois qu'il y a des plantes vertes, il y a aussi une association avec des bactéries ou archées fixatrices d'azote.

A la différence des rhizobiums, la plupart des microorganismes fixateurs d'azote ne peuvent pas être cultivés en laboratoire. L'évaluation de leur fonction écologique a donc présenté des défis techniques considérables. Mais récemment des méthodes bio-moléculaires pour détecter la présence du *nifH*, le gène de la nitrogénase réductase, ont permis de révéler une énorme diversité de bactéries et d'archées fixatrices d'azote, et ceci, dans des environnements les plus variés.

Les techniques nous manquent pour déterminer la quantité d'azote captée par beaucoup de ces groupes de micro-organismes. En revanche, ce que nous savons c'est que, comparé aux sols restés nus, la diversité et l'abondance de microbes fixateurs d'azote sont beaucoup plus importantes là où, tout au long de l'année, le sol est couvert de plantes vertes, en particulier de graminées.

En plus des bactéries et archées fixatrices d'azote, les mycorhizes sont d'une importance vitale pour la fixation d'azote. Bien que ces champignons ne fixent pas l'azote directement, ils transfèrent aux fixateurs d'azote de l'énergie sous forme de carbone liquide (Jones 2008). Ils transportent également vers les plantes l'azote assimilé biologiquement et transformé en molécules organiques telles que les acides aminés, notamment glycine, arginine, chitosane et glutamine (Leake et al., 20 (Leake et al., 2004, Whiteside et al., 2009).

Du point de vue énergétique, l'acquisition et le transfert de l'azote organique par les champignons mycorhiziens sont hautement efficaces. C'est un processus qui, en fermant la boucle de l'azote, réduit la nitrification, la dénitrification, la volatilisation et le lessivage. De plus, contrairement à ce qui se passe quand on fertilise avec du N minéral, le stockage de l'azote sous une forme organique empêche l'acidification du sol.

La voie du carbone liquide

Malgré son abondance dans l'atmosphère, l'azote est souvent l'élément le plus limitant pour les plantes. Il y a une raison pour cela. Le carbone, essentiel à la photosynthèse et au 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 C et du N) est par la voie du carbone liquide, un processus qui a besoin d'azote assimilé biologiquement.

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 microbes fixateurs d'azote est inhibé, ce qui appauvrit les sols en carbone.

La réduction des flux de carbone a une incidence sur un vaste réseau de communautés microbiennes, réduisant la disponibilité de minéraux essentiels, d'oligo-élé-

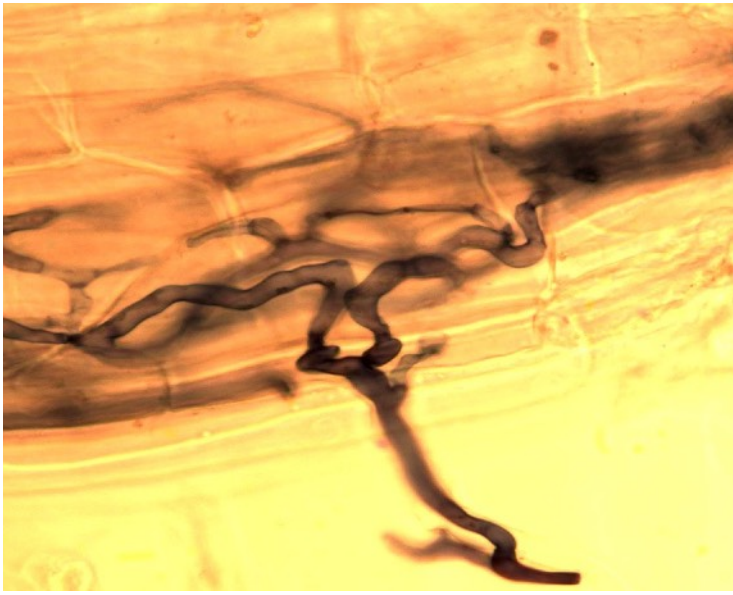


Fig. 1. Section d'une racine qui montre les hyphes filaires de mycorhizes. Ces hyphes en forme de fils transportent l'énergie solaire sous forme de carbone liquide vers une vaste gamme de microbes impliqués dans la nutrition des plantes et le contrôle des maladies. En échange de carbone, l'azote organique, 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.

ments, de vitamines et d'hormones nécessaire à la résilience des plantes face au stress environnemental, insectes et maladies, gelées et sécheresse. La plus faible teneur des plantes en micro-nutriments se reflète ensuite dans une moindre valeur nutritive des aliments.

Le développement aérien des plantes apparaît souvent «normal» de sorte qu'on ne s'aperçoit pas tout de suite d'une détérioration souterraine. Mais en dessous, nos sols sont en train de se détruire.

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

Déterminer le taux de sucre en brix à l'aide d'un réfractomètre est un moyen simple de mesurer le pouvoir photosynthétique des feuilles vertes et par là 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?

La formation d'agrégats est la clé

Les agrégats sont les petits «grumeaux» qui donnent au sol sa bonne texture, sa porosité et sa capacité d'emmagasiner de l'eau. Sans ces agrégats les sols ne peuvent ni fixer des quantités importantes de N atmosphérique ni séquestrer des formes stables de carbone. Toutes les trois fonctions, agrégation, fixation biologique de N et séquestration de C stable, sont interdépendantes.

Les microbes impliqués dans la formation d'agrégats de sol ont besoin d'une source d'énergie. Cette énergie est d'abord fournie par le soleil. Dans ce miracle qu'est 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 apporté sous forme de carbone liquide au sol à travers un réseau complexe de champignons mycorhiziens et de bactéries associées.

À quoi ressemblent les agrégats de sols?

Notez les petits grumeaux collant aux racines du blé cultivé en association avec les graminées pérennes (figure 2). Ces grumeaux sont formés par des microbes utilisant du carbone liquide sécrétés par des racines. Les micro-agrégats, trop petits pour être vu à l'œil nu, sont liés par des colles et des gommés 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.



Fig.2. Les deux plantes de blé à gauche ont été cultivées en association avec des graminées pérennes (pasture cropping) alors que la plante de blé à droite a été cultivée sur le sol nu d'une parcelle voisine et fertilisée avec 100 kg/ha de DAP.

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, il est impossible de garder des sols en bonne santé sans eux.

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.

Une caractéristique clé 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.

A l'intérieur des agrégats collés aux racines, le carbone liquide est transféré des radicules aux hyphes des champignons mycorhiziens qui le transportent vers des communautés microbiennes d'une grande complexité. Les microbes qui reçoivent ce carbone - et leurs métabolites - contribuent à la transformation de sucres simples en

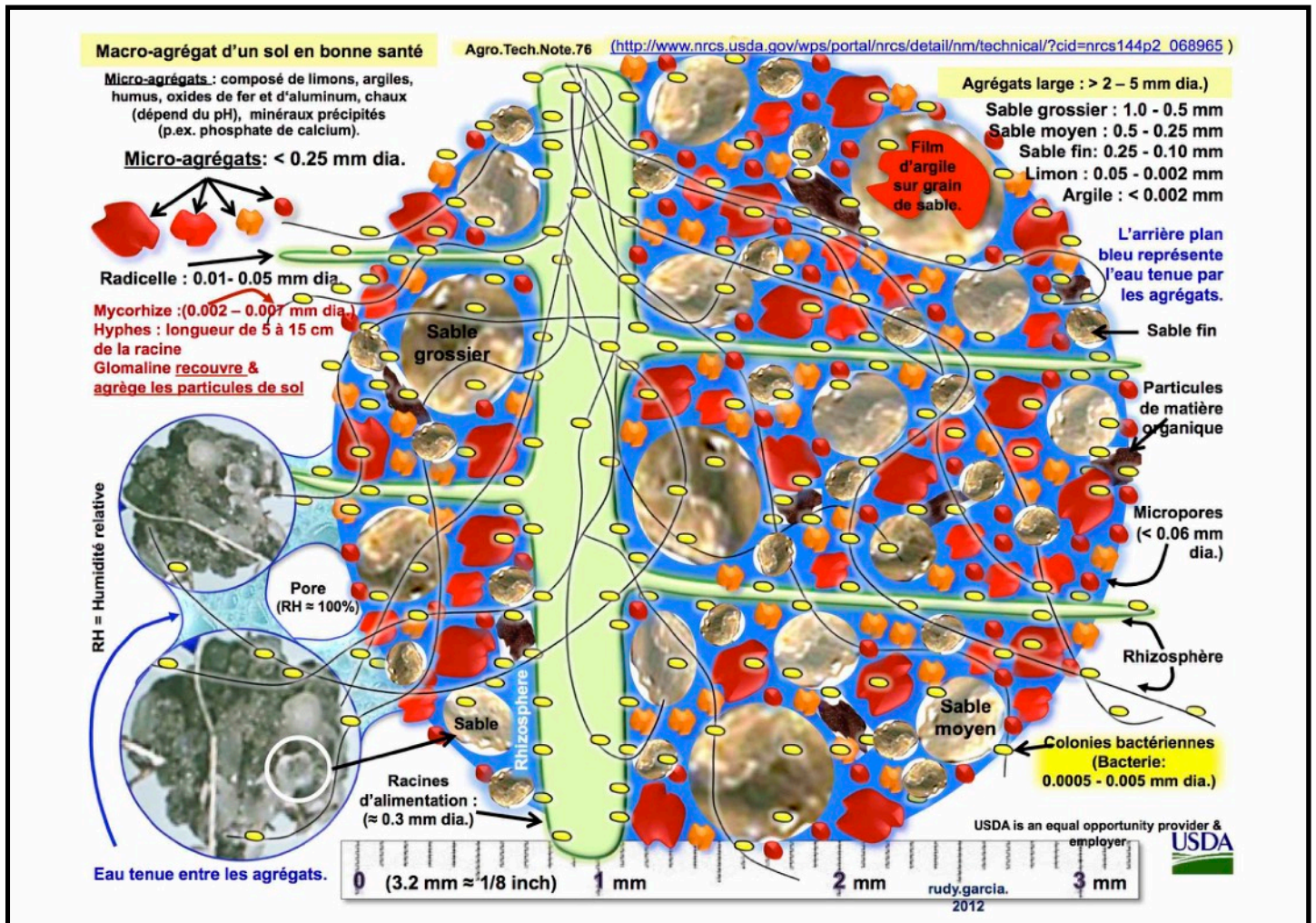


Fig.3. Représentation schématique d'un macro-agrégat de sol. La ligne verticale verte est une racine d'alimentation fine et les lignes horizontales vertes sont des cheveux radiculaires. L'assortiment de particules rouges et orange sont des micro-agrégats tandis que les formes brunes dispersées représentent des particules de matière organique. Les sphères de couleur claire sont des grains de sable de différents grosseurs, 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 précipités 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

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 font une contribution plus importante 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)

C'est là que le bât blesse. La colonisation mycorhizienne est faible lorsque de grandes quantités de N inorganique sont présentes ... et les mycorhizes sont inactifs 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 est nu. En outre, il a été montré qu'en raison de la dénitrification jusqu'à 80kg N/ha peuvent être volatilisés lors d'une jachère nue pendant l'été. Cette perte peut être évitée par la présence de plantes vertes qui peuvent absorber et recycler cet azote.

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 le pouvoir de rétention d'eau se trouve diminué. Les jachères nues, censé conserver de l'eau et les nutriments, deviennent donc une aberration.

Les jachères nues - ou l'utilisation de quantités élevées de N minéral - ou pire encore, les deux ensembles - causent la rupture des cycles de l'azote et du carbone qui ont fonctionné de manière synergique depuis des millénaires. La photosynthèse est le processus le plus important et le pilier de la vie sur terre, la fixation d'azote par la voie biologique hors légumineuses en est le second.

Il est important de distinguer entre l'azote fixé par les nodules racinaires des légumineuses et l'azote fixé dans les agrégats de sol en association avec les racines des non-légumineuses. Dans ce dernier cas, l'azote peut être incorporé dans des acides aminés et des substances humiques. Il y a fort peu de chances que ça se produise en terrain de pures légumineuses. Les légumineuses sont riches en minéraux et oligo-éléments et constituent une partie importante des systèmes agricoles. Cependant, à moins que les légumineuses ne soient cultivées en association avec des non-légumineuses, elles risquent d'épuiser le carbone du sol par le même type de mécanisme que les engrais minéraux.

Favoriser la voie du carbone liquide

On se rend de plus en plus compte de l'importance fondamentale des communautés microbiennes du sol pour la productivité agricole. Mais, malheureusement, de nombreuses fonctions biologiques sont compromises par les pratiques agricoles habituelles.

Changer de pratiques agricoles n'est pas difficile. La première étape est de reconnaître l'importance d'avoir, pendant toute l'année, la présence de plantes vertes et de populations microbiennes qu'elles alimentent.

Revoir sa manière de faire a le potentiel de réduire considérablement l'impact de nombreux «problèmes» liés à l'agriculture chimique, y compris la perte de C et de N, le

compactage, la baisse du pH, le manque de nutriments, la résistance aux herbicides et la moindre capacité de rétention d'eau.

Il existe quatre principes fondamentaux en agriculture régénérative 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 pâturages.

1. Le **principe numéro un** est d'assurer la présence pendant toute l'année d'une couverture vivante sous forme de prairies, cultures ou couverts multi-espèces. Presque tout ce qui vit dans et au-dessus du sol dépend pour son existence de plantes vertes (ou qui ont été vertes au préalable). *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. Mais ce qui est peut-être moins connu, est le fait 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 **principe numéro deux** est d'alimenter la chaîne microbienne pour améliorer les flux de carbone entre plantes et sol. Ceci demande la réduction des doses d'engrais riches en N & P minéraux qui ont tendance à inhiber le développement racinaire et la signalisation biochimique complexe entre racines et microbes.

3. Le **principe numéro trois** est la promotion d'une grande diversité végétale et microbienne. Plus grande la diversité, plus grand le contrôle et la régulation des organismes nuisibles et des maladies, plus large le spectre des micro-habitats d'organismes contribuant à l'acquisition de nutriments, au cycle des nutriments et à la formation du sol.

4. Le **principe numéro quatre** est la réaction positive de la terre à la présence d'animaux, sous réserve d'un élevage approprié. Outre les avantages liés à l'apport de fumier et d'urine, le pâturage tournant augmente l'exsudation racinaire qui, à son tour, stimule le développement et l'activité des bactéries fixateurs de N de la rhizosphère. Ce processus lié à la défoliation régulière des plantes fournit l'azote dont les plantes ont besoin pour soutenir leur croissance.

Se libérer des engrais azotés

L'activité des bactéries fixatrices d'azote aussi bien symbiotiques qu'associatives est perturbée par des niveaux élevés de N inorganique. Autrement dit, plus les quantités d'engrais azotés sont importantes moins il y a d'azote fixé par des processus naturels, moins il y a de matière organique stockée et de carbone séquestré.

Par conséquent, il est important de sevrer vos sols du N inorganique - mais svp, faites-le *lentement* et par étapes. Les communautés microbiennes ont besoin de temps pour s'adapter. Le fonctionnement du sol ne peut s'adapter en un jour. La transition nécessite généralement autour de trois ans.

Les intrants azotés peuvent être réduits de 20% la première année, 30% supplémentaires la deuxième année et 30% la troisième année. A partir de la quatrième année, l'application d'une très petite quantité de N (jusqu'à 5 kg / ha) aidera à amorcer la pompe de la fixation d'azote naturel.

Parallèlement au sevrage du N inorganique, vous devez chercher à maintenir une couverture végétale tout au long de l'année, des pâtures et des cultures, aussi diversifiées que possibles.

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 la gestion est bonne, la fixation biologique de l'azote peut également être le facteur déterminant pour la productivité agricole.

De nombreux agriculteurs à travers le monde découvrent désormais comment on arrive à restaurer la fertilité naturelle du sol. Ils abandonnent les jachères nues pour aller vers des systèmes où les apports d'azote minéral se trouvent réduits et où, toute l'année, il y a une couverture végétale diversifiée.

Un meilleur fonctionnement du sol offre des avantages aussi bien pour la ferme que pour l'environnement.

Pour plus d'informations, visitez www.amazingcarbon.com

Liens :

L'original en anglais : [Nitrogen the double-edged sword](#)

D'autres articles du Dr. Christine Jones :

[La voie du carbone liquide](#)

[Le carbone, ça compte énormément !](#)

[Régénération des sols : 5 principes fondamentaux](#)

Traduction de l'anglais par
Ulrich Schreier et Hubert Montmarin

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-of-diminishing-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/Managing-microbes-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