

Nitrogen: the double-edged sword

Christine Jones, PhD
Founder, Amazing Carbon
www.amazingcarbon.com

Nitrogen is a component of protein and DNA and as such, is essential to all living things.

Prior to the Industrial Revolution, around 97% of the nitrogen supporting life on earth was fixed biologically. Over the last century, intensification of farming, coupled with a lack of understanding of soil microbial communities, has resulted in reduced biological activity and an increased application of industrially produced forms of nitrogen to agricultural land.

In 2013, Australian grain-growers expended close to \$3 billion on inorganic nitrogen (Marino 2014). Globally, over \$100 billion of nitrogen fertilisers are applied to crops and pastures every year. Between 10 and 40% of the applied N is taken up by plants. The other 60-90% is leached into water, volatilised into the air or immobilised in soil.

Impacts of inorganic nitrogen

The application of high rates of inorganic nitrogen in agricultural systems has had many unintended negative consequences for soil function and environmental health. Data from North America's longest running field experiment on the impacts of farm production methods on soil quality have revealed that high nitrogen inputs deplete soil carbon, impair soil water-holding

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 la planète a été fixée biologiquement. Au cours du siècle dernier, l'intensification de l'agriculture, accompagnée d'un manque de compréhension des communautés microbiennes du sol, a entraîné une diminution de l'activité biologique et une utilisation de plus en plus importante de formes industrielles d'azote.

En 2013, les céréaliers australiens ont dépensé près de \$3 milliards de dollars pour l'achat d'engrais azoté minérales (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.

Les impacts de l'azote minéral

L'utilisation de grandes quantités d'azote inorganique en agriculture a eu de nombreux effets secondaires pour le sol et l'environnement. Les données issus de la plus ancienne plateforme d'expérimentation aux Etats-Unis montrent que des apports élevés d'azote appauvriscent le sol en carbone, nuisent

capacity - and ironically, also deplete soil N (Khan *et al.* 2007, Larson 2007).

Taken together, these factors have been implicated as the underlying cause of widespread reports of yield stagnation around the world (Mulvaney *et al.* 2009).

The evidence suggests that although nitrogen is essential to plant growth, the application of large amounts of N as inorganic fertiliser is detrimental to soil. And also detrimental to water. The USDA estimates that the cost of removing nitrate from U.S. drinking water is more than \$4.8 billion per year, while nitrogen run-off from farmland is the single largest source of nutrient pollution contributing to the massive 'dead zone' in the Gulf of Mexico (Ceres 2014).

Fortunately, the news is not all bad. Rates of fertiliser application have decreased in recent years in some developed countries. France, Germany, and the United Kingdom have achieved success in this area, maintaining high yields with forty to fifty percent less fertiliser than used in the 1980s (Krietsch 2014).

Cost-effective nitrogen management is the key to profitable and productive farming. It is also the key to building soil carbon. Stable forms of soil carbon (such as humus) cannot form in the presence of high levels of inorganic nitrogen, due to the inhibition of the microbes essential to sequestration.

à la capacité de rétention hydrique et, ironiquement, épuisent également le N 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](#)).

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, alors 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, en maintenant des rendements élevés avec quarante à cinquante pour cent moins d'engrais 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 pour les microorganismes 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.

Biological nitrogen fixation (BNF)

On a global scale, biological nitrogen fixation accounts for around 65% of the nitrogen used by crops and pastures. There is scope for considerable increase. The supply of nitrogen is

inexhaustible, as dinitrogen (N_2) comprises almost 80% of the earth's atmosphere. The key is to transform inert nitrogen gas to a biologically active form.

Much of the nitrogen currently used in agriculture derives from the Haber-Bosch process, developed in the early 1900s. This process catalytically combines atmospheric nitrogen with hydrogen derived from natural gas or coal, to produce ammonia under conditions of high temperature and pressure. The Haber-Bosch process uses non-renewable resources, is energy intensive and expensive.

Fortunately - thanks to some 'enzymatic magic' - atmospheric nitrogen can be transformed to ammonia by a wide variety of nitrogen-fixing bacteria and archaea - for free.

Ideally, newly fixed ammonia is rapidly incorporated into organic molecules such as amino acids and humus. These stable molecules are vital to soil fertility and cannot be volatilised or leached from the soil system. Importantly, the stabilisation of nitrogen requires a steady supply of carbon - also fixed biologically. We'll come to that in a moment.

Fixation biologique de l'azote (FBA)

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 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 cher.

Heureusement - 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. Il est important de réaliser que le processus permettant de stabiliser l'azote, nécessite un apport régulier de carbone. Cet élément dont nous parlerons plus loin est également fixé biologiquement.

Which microbes are involved?

It is important to recognise that the ability to fix nitrogen is not limited to bacteria associated with legumes. Chlorophyll is part of a protein complex - hence wherever you see green plants - there will also be an association with nitrogen-fixing bacteria or archaea.

Unlike rhizobial bacteria, most nitrogen-fixing microbes are not able to be cultured in the laboratory. This has presented technical challenges to assessing their ecological function. Recent bio-molecular methods for determining the presence of *nifH*, the gene for nitrogenase reductase, have revealed a dizzying array of free-living and associative nitrogen-fixing bacteria and archaea across a wide range of environments.

Although procedures for quantifying the amount of nitrogen fixed by many of these groups are lacking, what we do know is that the diversity and abundance of nitrogen fixing microbes are much greater where there is living groundcover (particularly plants in the grass family) throughout the year, compared to soils that have been bare fallowed.

In addition to nitrogen-fixing bacteria and archaea, mycorrhizal fungi are also vitally important to the N-fixing process. Although mycorrhizal fungi do not fix nitrogen, they transfer energy, in the form of liquid carbon (Jones 2008) to associative nitrogen fixers. They also transport biologically fixed nitrogen to plants in organic form, for example, as amino acids, including glycine, arginine, chitosan and glutamine (Leake *et al.* 2004, Whiteside *et al.* 2009).

Quels microorganismes sont impliqués?

Il est important de reconnaître que la capacité de fixer de l'azote ne se limite pas aux seules bactéries associées aux légumineuses. La chlorophylle fait également partie d'un complexe protéique. En conséquence, partout où il y a des plantes vertes, on trouve 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 de *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.

Bien que les techniques pour déterminer la quantité d'azote captée par beaucoup de ces groupes de micro-organismes nous manquent, nous savons que, comparé aux sols restés nus, la diversité et l'abondance de microorganismes fixateurs d'azote sont beaucoup plus importantes là où, tout au long de l'année, le sol est couverte de plantes vivantes, 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

The acquisition and transfer of organic nitrogen by mycorrhizal fungi is highly energy efficient. This pathway closes the nitrogen loop, reducing nitrification, denitrification, volatilisation and leaching. Additionally, the storage of nitrogen in the organic form prevents soil acidification.

The liquid carbon pathway

Despite its abundance in the atmosphere, nitrogen is frequently the most limiting element for plants. There is a reason for this. Carbon, essential to photosynthesis and soil function, occurs as a trace gas, carbon dioxide, currently comprising 0.04% of the atmosphere. The most efficient way to transform CO₂ to stable organic soil complexes (containing both C and N) is via the liquid carbon pathway. The requirement for biologically-fixed nitrogen drives this process.

If plants were able to access nitrogen directly from the atmosphere, their growth would be impeded by the absence of carbon-rich topsoil. We are witnessing an analogous situation in agriculture today. When inorganic nitrogen is provided, the supply of carbon to associative nitrogen fixing microbes is inhibited, resulting in carbon-depleted soils.

Reduced carbon flows impact a vast network of microbial communities, restricting the availability of essential minerals,

molécules organiques telle que des acides aminés dont 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.

Le chemin 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 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 microorganismes fixateurs d'azote est inhibé, ce qui appauvrit les sols en carbone.

trace elements, vitamins and hormones required for plant tolerance to environmental stresses such as frost and drought and resistance to insects and disease. Lowered micronutrient densities in plants also translate to reduced nutritional value of food.

Above ground, plant growth often appears ‘normal’, hence the connection to failing soil function may not be immediately obvious. But underneath, our soils are being destroyed.

Ideally, land management practices - and any amendments used in agriculture - should enhance photosynthetic rate and increase the flow of carbon to soil, by supporting plant-associated microbial communities (Fig.1).

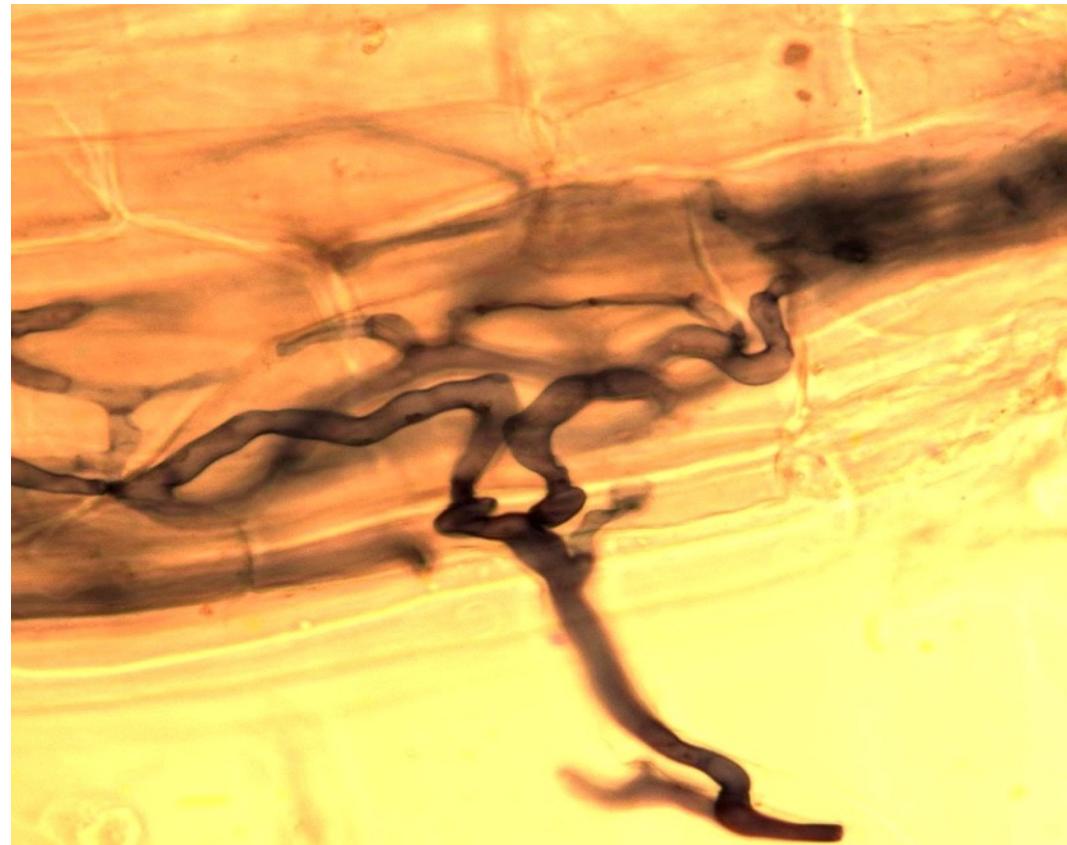
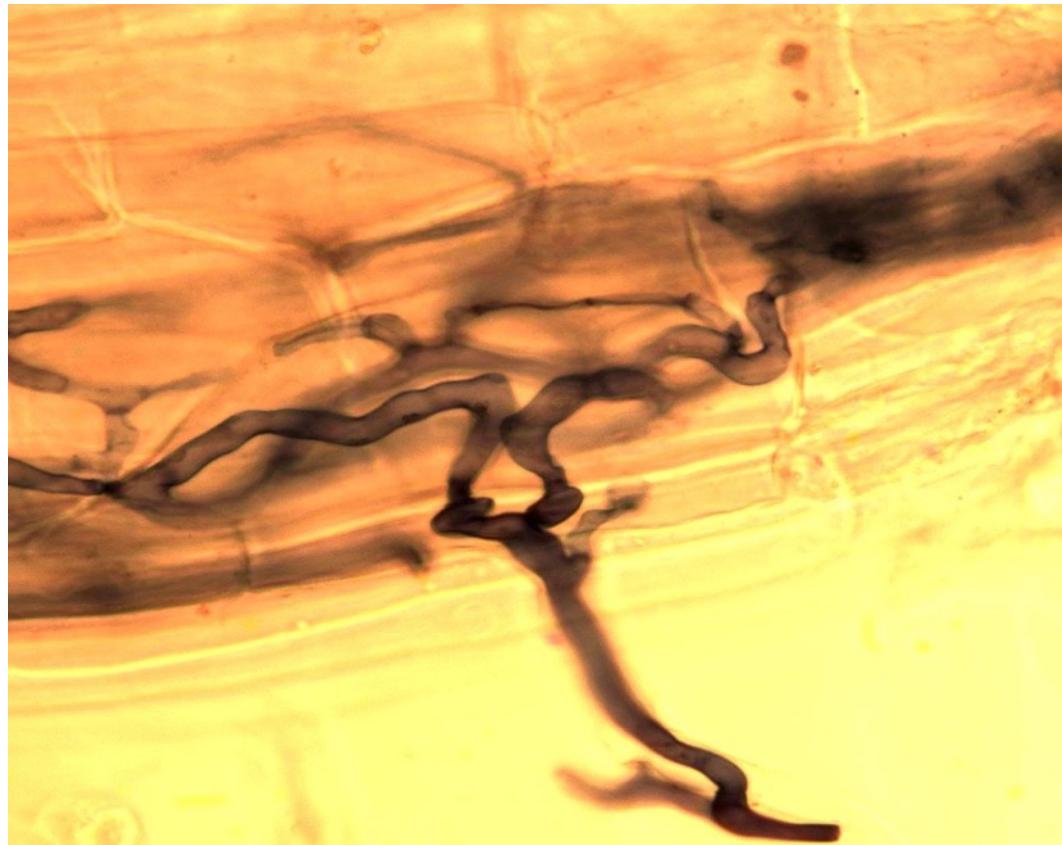
Fig.1. Cross section of a plant root showing the thread-like hyphae of mycorrhizal fungi. Mycorrhiza deliver sunlight energy packaged as liquid carbon to a vast array of soil microbes involved in plant nutrition and disease suppression. Organic nitrogen, phosphorus, sulphur, potassium, calcium, magnesium, iron and essential trace elements such as zinc, manganese and copper are returned to plant hosts in exchange for carbon. Nutrient transfers are inhibited when high rates of inorganic nitrogen and/or inorganic phosphorus are applied. Photo Jill Clapperton.

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 micro-nutriments se traduit ensuite à 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 déjà en train d'être détruits.

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

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 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.



Determining brix levels with a refractometer is an easy way to assess the rate at which green leaves are photosynthesising and hence supporting associative soil microbes. Anything that reduces the photosynthetic capacity of land or the photosynthetic rate of vegetation is NOT sustainable.

How can we utilise our understanding of the liquid carbon pathway to restore natural fertility to agricultural land?

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 ?

Aggregation is the key

Aggregates are the small ‘lumps’ in soil that provide tilth, porosity and water-holding capacity. Unless soils are actively aggregating, they will not be fixing significant amounts of atmospheric N or sequestering stable forms of carbon. All three functions (aggregation, biological N-fixation and stable C-sequestration) are inter-dependent.

The microbes involved in the formation of soil aggregates require an energy source. This energy initially comes from the sun. In the miracle of photosynthesis, green plants transform light energy, water and carbon dioxide into biochemical energy, which is transferred to soil as liquid carbon via an intricate network of mycorrhizal fungi and associated bacteria.

What do soil aggregates look like?

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'emmagerer 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 microorganismes 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 qui 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 ?



Fig.2. The two wheat plants on the left were grown with perennial grasses in a Pasture Crop treatment while the wheat plant on the right was grown in adjacent bare soil, amended with 100kg/ha DAP.

Note the little lumps adhering to the roots of the Pasture Cropped wheat (Fig.2). These clusters are formed by microbes utilising liquid carbon from the roots. Microaggregates, too small to be seen with the naked eye, are bound together by microbial glues and gums and the hyphae of mycorrhizal fungi (also using liquid carbon), to form bigger lumps called macroaggregates, generally 2-5mm in size (around $1/8^{\text{th}}$ of an inch in non-metric terms).



Fig.2. Les deux plants de blé à gauche ont été cultivés en association avec des graminées pérennes (pasture cropping) alors que le plant de blé à droite a été cultivé sur le sol nu d'une parcelle voisine et fertilisée 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 formées par des microorganismes 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 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.

Macroggregates are essential to soil tilth, structure, aeration, infiltration, water-holding capacity, biological nitrogen fixation and carbon sequestration. In short, it is not possible to maintain healthy soils without them.

Let's take a look inside a macroaggregate, courtesy of this fabulous illustration (Fig. 3) by Rudy Garcia, State Agronomist with the USDA Natural Resources Conservation Service in New Mexico.

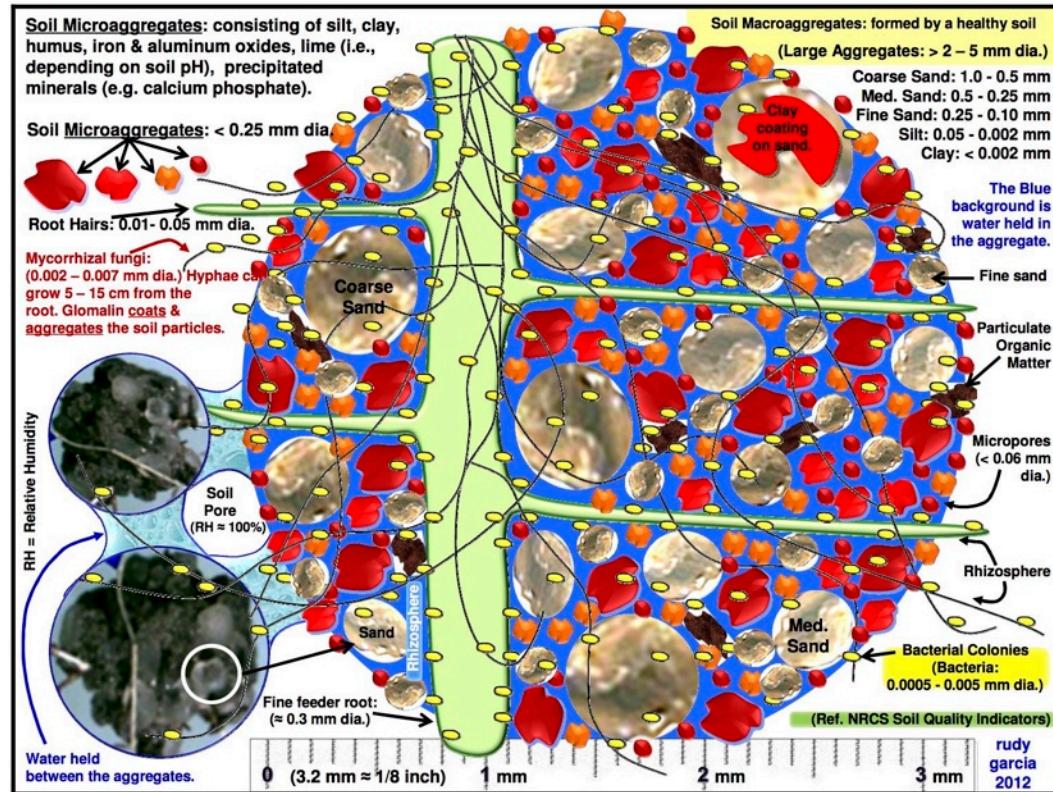


Fig.3. Diagrammatic representation of a soil macroaggregate. The green vertical line is a fine feeder root and the green horizontal lines are root hairs. The assortment of red and orange particles are microaggregates while the scattered brown

Les macro-agrégrats 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-agrégrat 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.

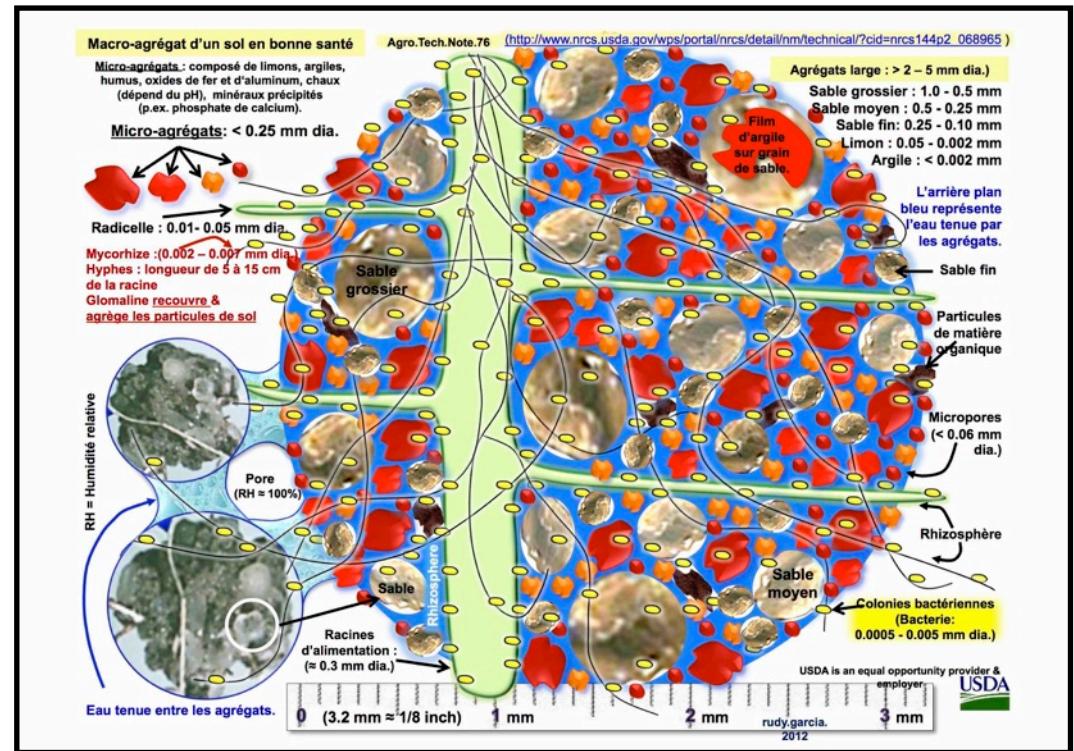


Fig.3. Représentation schématique d'un macro-agrégrat de sol. La ligne verticale verte est une racine d'alimentation fine et les lignes horizontales vertes sont des cheveux radiculaires. L'assortiment de particules rouges et orange sont des micro-agrégrats tandis que les formes brunes dispersées représentent

shapes represent particulate organic matter. Light coloured spheres are sand grains of various sizes, often coated with oxides of iron and aluminium, while the small yellow ellipses are bacterial colonies, including nitrogen-fixing and phosphorus solubilising species. The fine strands running in multiple directions are the hyphae of mycorrhizal fungi, essential to the enmeshing of the soil particles and the supply of carbon to microbial communities within the aggregate. Depending on soil pH, there will also be precipitated minerals such as iron phosphate or calcium phosphate. The blue background is water held within the aggregate. Illustration courtesy Rudy Garcia, USDA-NRCS

A key feature is that moisture and liquid carbon levels are *higher* within root-supported aggregates than in the surrounding soil, while the partial pressure of oxygen is *lower* within root-supported aggregates than in the surrounding soil. These conditions are essential for the functioning of the nitrogenase enzyme utilised for biological nitrogen fixation and also to the formation of humus.

Within root-supported aggregates, liquid carbon is transferred from fine root hairs to the hyphae of mycorrhizal fungi, thence to highly complex microbial communities. The microbes receiving this carbon - and their metabolites - are instrumental in the transformation of simple sugars to highly stable humic polymers, a portion of which comprises biologically fixed nitrogen and bacterially- solubilised phosphorus. Iron and aluminium, which occur as oxides in the mineral matrix, are important catalysts.

des particules de matière organique. Les sphères de couleur claire sont des grains de sable de différents grosses, 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 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 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.

It is now recognised that plant root exudates make a greater contribution to stable forms of soil carbon (that is, to organo-mineral complexes containing organic carbon and organic nitrogen) than does the above-ground biomass (Schmidt *et al.* 2011)

But here's the rub. Mycorrhizal colonisation is low when large quantities of inorganic N are applied ... and mycorrhiza are inactive when plants are absent. Hence biological nitrogen fixation and humification are rare in agricultural systems where heavily N-fertilised crops are rotated with bare fallows. Further, it has been shown that up to 80kgN/ha can be volatilised from bare summer fallows due to denitrification. If green plants are present, this N can be taken up and recycled, preventing irretrievable loss.

When soil is bare there is no photosynthesis and very little biological activity. Bare soils lose carbon and nitrogen, nutrient cycles become dysfunctional, aggregates deteriorate, structure declines and water-holding capacity is reduced. Bare fallows, designed to store moisture and retain nutrients, become self-defeating.

The maintenance of bare fallows - or the use of high rates of inorganic N in crops or pastures - or worse, both - results in the uncoupling of the nitrogen and carbon cycles that have functioned synergistically for millennia. Photosynthesis is the most important process underpinning life on earth. Non-legume biological nitrogen fixation is the second.

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)

Mais voici le problème. La colonisation mycorhizienne est faible lorsque de grandes quantités de N inorganique sont employées ... 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 reste 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 à sol nu 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 la capacité de stocker de l'eau se trouve diminuée. Les jachères nues, sensé conserver de l'eau et les nutriments, deviennent donc une aberration.

Des jachères à sol nu - ou par l'utilisation de quantités élevées de N minéral sur les cultures ou pâtures - 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 étant le processus le plus

It is important to distinguish between the nitrogen fixed within nodules on the roots of leguminous plants and the nitrogen fixed within aggregates formed in association with the roots of non-legumes. In the latter, the nitrogen can be incorporated into amino acids and humic substances. This is much less likely to occur in stands of pure legume. Legumes are high in minerals and trace elements and form an important part of agricultural systems. However, unless legumes are grown in mixtures with non-legumes, they can deplete soil carbon via the same mechanism as it is depleted by high-analysis fertiliser.

Enhancing the liquid carbon pathway

There is increasing recognition of the fundamental importance of soil microbial communities to plant productivity. Unfortunately, many biological functions are compromised by commonly used agricultural practices.

Redesign of farming practice is not difficult. The first step is recognition of the importance of the year-round presence of green plants and the microbial populations they support.

Redesign has the potential to significantly reduce the impact of many ‘problems’ associated with chemical farming, including loss of soil C, reduced soil N, soil compaction, declining pH, low nutrient availability, herbicide resistance and impaired water-holding capacity.

important pour la vie sur terre, la fixation d'azote par la voie biologique hors légumineuses vient juste derrière.

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. Ceci est beaucoup plus rare sur une parcelle où il n'y a que des légumineuses. Les légumineuses sont riches en minéraux et oligo-éléments et constituent une partie importante des systèmes agricoles. Cependant, à moins que les légumineuses soient cultivées en association avec des non-légumineuses, elles risquent d'épuiser le carbone du sol par le même type de mécanisme que les engrains minéraux.

Favoriser le chemin 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.

De changer les 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 soutiennent.

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 du sol, le compactage, la baisse du pH, le manque de nutriments, la

There are four basic principles for regenerative agriculture, proven to restore soil health and increase levels of organic carbon and nitrogen. From these, landholders can build an integrated land management package that suits their individual property and paddock needs.

1) The **first principle** is the maintenance of year-round living cover, via perennial pastures on grazed land and/or multi-species cover crops on farmed land. Almost every living thing in and on the soil depends on green plants (or what was once a green plant) for its existence. *The more green plants, the more life.*

It's well accepted that groundcover buffers soil temperatures and reduces erosion, but it is perhaps less recognised that actively growing green groundcover also fuels the liquid carbon pathway which in turn supports, among other things, mycorrhizal fungi, associative N-fixing bacteria and phosphorus solubilising bacteria - all of which are essential to both crop nutrition and the formation of stable humified carbon.

2) The **second principle** is to provide support for the microbial bridge, to enhance the flow of carbon from plants to soil. This requires reducing inputs of high analysis N & P fertilisers that inhibit the complex biochemical signalling between plant roots and microbes.

3) The **third principle** is to promote plant and microbial diversity. The greater the diversity of plants the more checks and balances for pests and diseases and the broader the range of microhabitats for the soil organisms involved in nutrient acquisition, nutrient cycling and soil building.

résistance aux herbicides et la moindre 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 **principe numéro un** est d'assurer la présence pendant toute l'année d'une couverture vivante sous forme de pâtures, cultures et couverts multi-espèces. Presque tout ce qui vie dans et au-dessus du sol dépend pour son existence de plantes vertes (ou qui ont été vertes au préalable). *Plus qu'il y a de plantes vertes, plus qu'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 des plantes vers le 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 complexes entre racines et microorganismes.

4) The **fourth principle** is that land responds positively to the presence of animals provided management is appropriate. As well as the benefits arising from the addition of manure and urine to soils, high-intensity short-duration grazing increases root exudation and stimulates the number and activity of associative N-fixing bacteria in the rhizosphere, which fire up in response to defoliation and provide the extra N required by the plant for the production of new growth.

3) Le **principe numéro trois** est la promotion d'une grande diversité végétale et microbienne. Plus la diversité est importante, plus le contrôle et la régulation des organismes nuisibles, des maladies et des micro-habitats d'organismes liés au réseau alimentaire, au recyclage et à la formation de sol, le sont aussi.

4) Le **principe numéro quatre** est la présence d'animaux qui, en cas d'une conduite appropriée, ont une influence positive pour le sol. En dehors des 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 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.

Weaning off nitrogen fertiliser

The activities of both symbiotic and associative N-fixing bacteria are inhibited by high levels of inorganic N. In other words, the more nitrogen fertiliser we apply, the less N is fixed by natural processes.

Hence it is important to wean your soils off inorganic N - but please do it S.L.O.W.L.Y. Microbial communities take time to adjust. Soil function cannot return overnight. The transition generally requires around three years.

Nitrogen inputs can be reduced 20% in the first year, another 30% in the second year and a further 30% in the third year. In fourth and subsequent years, the application of a very small

Le sevrage par rapport aux 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 que les quantités d'engrais azotés sont importantes moins qu'il y a d'azote fixé par des processus naturels.

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

amount of inorganic N (up to 5kgN/ha) will help to prime natural nitrogen-fixing processes.

While weaning off high rates of inorganic N you should also aim to maintain as much diverse year-round living groundcover in crops and pastures as possible.

Conclusion

Biological nitrogen fixation is the key driver of the nitrogen and carbon cycles in all natural ecosystems, both on land and in water. When managed appropriately, biological nitrogen fixation can also be the major determinant of the productivity of agricultural land.

Many farmers around the world are discovering first-hand how the change from bare fallows to biodiverse year-long green, coupled with appropriate livestock management and reduced applications of inorganic nitrogen, can restore natural topsoil fertility.

Improving soil function delivers benefits both on-farm and to the wider environment.

For further information, visit
www.amazingcarbon.com

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>

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 naturelle.

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 quant à la productivité agricole.

De nombreux agriculteurs à travers le monde découvrent par leur propre expérience comment on arrive à 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 aussi bien pour la ferme que pour l'environnement.

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

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

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

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

Tapez pour saisir le texte

Tapez pour saisir le texte

Tapez pour saisir le texte

Tapez pour saisir le texte