

DOCUMENT CODEX
JUSTIFICATION BASEE SUR DES CRITERES
UTILISATION DE NITRATE DE SODIUM
NATUREL
EN
AGRICULTURE BIOLOGIQUE

Santiago, Chili

Février 2004

AVANT-PROPOS

Le présent document a été établi afin d'être présenté à la Commission du CODEX ALIMENTARIUS sur l'Étiquetage des Denrées Alimentaires. Il comporte la justification technique étayant la demande de la Délégation du Chili d'inclure le nitrate de sodium naturel dans la liste de sources d'azote acceptées en agriculture biologique.

Au cours de la 31^{ème} Session de la Commission du CODEX ALIMENTARIUS sur l'Étiquetage des Denrées Alimentaire à Ottawa, Canada, qui s'est déroulée du 28 avril au 2 mai 2003, il a été convenu que la Délégation du Chili soumettrait ce document pour qu'il soit pris en considération à la 32^{ème} Session de la Commission sur l'Étiquetage des Denrées Alimentaire (ALINORM 03/22A, para. 88).

La structure de ce document suit celle des concepts établis par le CODEX afin d'incorporer de nouvelles substances dans la liste des Substances approuvées pour être utilisées comme engrais ou comme amendement du sol (APPENDICE V, ALINORM 03/22A p. 44). Le contenu suit les concepts de la Section 5 "conditions à l'inscription de substances à l'Annexe 2 et critères pour l'établissement de listes de substances par les pays", qui sont regroupés en deux sous-sections, 5.1 Critères généraux, et, 5.1 (a) Utilisés à des fins de fertilisation ou d'amendement du sol. La Sous-section 5.1 traite du fait qu'il est nécessaire que la substance respecte les principes de base de l'agriculture biologique. Ce document présente la preuve, les connaissances et les faits techniques acceptés étayant la conformité de l'utilisation du nitrate de sodium naturel avec les principes de l'agriculture biologique. La preuve technique concernant les bénéfices de l'utilisation du nitrate de sodium naturel et des sources de N organique sur le rendement et la qualité des cultures biologiques est présentée à la sous-section 5.1 (a). L'origine

naturelle de la substance, les effets potentiels sur l'écosystème et certaines restrictions d'utilisation sont également présentés dans cette sous-section.

Un document additionnel présentant de façon plus détaillée les bénéfices du nitrate de sodium naturel sera disponible avant la 32^{ème} session de la Commission du CODEX.

MATRICE D'EVALUATION DE SUBSTANCES PAR RAPPORT AUX CRITERES

Substance à utiliser à des fins de fertilisation ou d'amendement du sol.

Points : ++ très positif ; + positif ; 00 non évalué; - plutôt négatif;

- - très négatif

Substance proposée : Nitrate de sodium naturel (NSN) comme source d'azote pour les cultures en agriculture biologique.

Section 5.1 Principes généraux

Critères	Evaluation par rapport aux critères	Score	Proposé par
Respect des principes de la production biologique	Le nitrate de sodium naturel (NSN) est une substance naturelle extraite du minerai dénommé caliche présent dans la surface inerte du désert d'Atacama. Il est extrait à l'aide de procédés mécaniques et hydrauliques, mais n'est pas soumis à des traitements chimiques. Le NSN est une source de N complémentaire aux sources de N organique, il stimule la biodiversité et accroît l'activité biologique en fournissant un N disponible lorsque les sources organiques peuvent à peine en fournir. Le NSN contribue à préserver la fertilité du sol en facilitant la décomposition et la formation d'humus à partir de substances organiques présentant une teneur en carbone relativement élevée (rapport C / N élevé). Il ne nuit pas à l'environnement lorsqu'il est correctement utilisé.	++	
Nécessaire à la fin visée	Le NSN fournit l'azote sous une forme qui est directement absorbée par les racines des plantes sans requérir de transformations biologiques. Son azote est facilement disponible pendant toutes les saisons de croissance, en particulier quand les conditions climatiques empêchent la transformation de l'azote organique nécessaire pour libérer le N disponible. Le sodium fourni par le NSN contribue à empêcher l'acidification du sol résultant de la décomposition de substances organiques et constitue un élément nutritif pour les cultures halophytes (betteraves sucrières, colza, asperges et cultures fourragères), Le NSN fournit également des quantités réduites mais significatives de potassium, de magnésium, de soufre et d'oligo-éléments comme cuivre, bore, manganèse et iode.	+ / ++	
La fabrication, l'utilisation et l'élimination ne donnent pas lieu ou ne contribuent pas à des effets inacceptables sur l'environnement	Le désert d'Atacama est une région extrêmement sèche avec des précipitations inférieures à 2 mm par an, sans sol, sans trace d'organismes vivants et sans processus de formation du sol. Le NSN est extrait par des solutions aqueuses mais aucun effluent liquide ne sort des plantes. L'eau est perdue uniquement par l'évaporation solaire utilisée pour concentrer les solutions. Le rayonnement solaire est l'une des principales sources d'énergie et la quantité capturée couvre 57% de l'énergie totale utilisée dans le processus d'extraction. L'utilisation du NSN pendant plus de 80 ans dans des conditions expérimentales (UK) et en agriculture (Japon) et pendant	+	

	plus de 100 ans dans d'autres pays n'a pas fait apparaître les moindres effets négatifs sur l'environnement. Le NSN ne perd pas ses propriétés avec le temps et ne doit pas être éliminé mais seulement stocké correctement en vue de récoltes ultérieures.		
Elles ont le plus faible effet néfaste sur la santé et la qualité de vie des humains et animaux	Toutes les formes de N organique sont transformées dans le sol sous forme d'ammonium et de nitrate. Ce sont pratiquement les seules formes de N absorbées par les plantes. Dès lors, le N nitrique présent dans le nitrate de sodium naturel est de même nature que le nitrate résultant de transformations organiques. Il n'y a aucun dommage à prévoir pour les sols, les cultures, les animaux et la qualité de vie s'il est utilisé conformément aux besoins des sols et des cultures. Le sodium est également un composant naturel dans le profil du sol et les quantités de sodium appliquées avec le NSN se situent dans les limites naturelles du sodium dans les sols normaux. Etant un élément alcalin, le sodium contribue à maintenir le pH à un niveau favorable n'affectant pas la vie biologique. Les teneurs en cadmium, arsenic, chrome et plomb dans le NSN sont inférieures à un mg kg ⁻¹ . Ces niveaux sont parmi les plus bas des engrais naturels.	+	
Des substances alternatives approuvées ne sont pas disponibles en quantité ou qualité suffisante.	Le NSN est la seule substance non-organique naturelle qui fournit le N sous forme de nitrate et dont la disponibilité pour les cultures ne requiert pas de transformations biologiques qui dépendent de la température et d'autres conditions du sol.	+	

Section 5.1 (a) Utilisation pour la fertilisation ou l'amendement du sol

Critères	Evaluation par rapport aux critères	Score	Proposé par
Elles sont essentielles pour fertiliser le sol ou en préserver la fertilité, combler les besoins nutritionnels spécifiques des végétaux cultivés ou répondre à des besoins particuliers en matière d'amendement du sol et de rotation des cultures qui ne peuvent être satisfaits par les pratiques mentionnées à l'Annexe 1 ou d'autres substances comprises dans le Tableau 2 de l'Annexe 2.	L'azote est un élément essentiel pour la fertilité du sol et la production de cultures. Tout le N organique doit être transformé en ammonium et en nitrate afin d'être absorbé par les racines des plantes. La transformation est réalisée par les micro-organismes du sol et dépend de la température du sol, du pH, de l'humidité et d'autres propriétés du sol. La recherche a démontré que la quantité de N fournie exclusivement par des sources organiques est inférieure au N requis pour atteindre un rendement et une qualité de cultures acceptables. Ceci est dû (a) au niveau insuffisant du N total dans les sources organiques, et, (b) à l'absence de synchronisation entre la vitesse de transformation du N de sources organiques et la vitesse d'absorption de N par les racines des plantes au cours de la saison de croissance. Ceci aboutit souvent à l'élimination par lessivage du N des sources organiques. Le NSN fournit le N qui peut être immédiatement absorbé par les plantes, ce qui permet de contrôler	+	

	la quantité de N à appliquer et le moment de l'application, synchronisant ainsi l'apport de N et les besoins nutritionnels spécifiques de la plante.		
Les ingrédients sont d'origine végétale, animale, microbienne ou minérale et peuvent subir les traitements d'ordre : physique (mécanique, thermique), enzymatique ou microbien (compostage, fermentation) ; ce n'est que si les procédés susmentionnés sont épuisés que les procédés chimiques peuvent être considérés et ceci uniquement pour l'extraction des supports et des liants.	Le NSN est extrait par lessivage du caliche broyé avec une solution à faible teneur en sel à 40-45 °C. Après le lessivage du minerai, la solution est refroidie à 12 °C pour précipiter le NSN. Après précipitation du NSN, la solution à faible teneur en sel est ensuite concentrée dans des bassins par système d'évaporation solaire avant d'entrer dans un second cycle de précipitation du sel. La fabrication des engrais N chimiques utilise une moyenne de 40 Giga Joule (G J) par tonne de N et le procédé d'extraction du NSN utilise un total de 44 GJ, ce qui est proche de la moyenne de l'industrie. = = Cependant, dans l'extraction du NSN, seuls 19 GJ d'énergie non-renouvelable sont utilisés, ce qui équivaut à 43% de l'énergie totale consommée, alors que les 57% restants sont de l'énergie solaire. Le NSN est séché, granulé et stocké ou expédié pour être utilisé comme une source de N pour les cultures.	++	
Leur utilisation n'a pas d'effet inacceptable sur l'équilibre de l'écosystème des sols ou les caractéristiques physiques du sol, ou la qualité de l'eau et de l'air.	L'utilisation continue du nitrate de sodium naturel pendant plus de 80 ans à des fins expérimentales (UK) et agricoles au Japon, et davantage encore aux Etats-Unis et dans d'autres pays, n'a pas fait apparaître d'effet négatif sur l'environnement. Le nitrate N du NSN ne se volatilise pas non plus comme c'est le cas des formes ammoniacales de l'azote.	+ / ++	
Leur utilisation peut être restreinte à des conditions, des régions ou des cultures , spécifiques	L'utilisation du nitrate de sodium naturel n'est pas recommandée dans des sols salins ou sodiques. Ces conditions de sols sont facilement identifiables par des déterminations effectuées sur des échantillons envoyés aux laboratoires d'analyse de sol. L'utilisation du NSN n'est pas non plus recommandée dans des sols présentant un mauvais drainage interne et dans le cas d'agriculture sans irrigation avec peu de précipitations et sans accès à l'eau d'irrigation. Aux Etats-Unis, l'utilisation de NSN est limitée à 20% des besoins en azote des cultures.	+	

RESUME

L'utilisation du nitrate de sodium naturel (NSN) contenant 16% d'azote et 26% de sodium comme source d'azote (N) pour les cultures organiques est conforme aux principes de base de l'agriculture biologique en accord avec les faits et les concepts connus depuis de nombreuses années ainsi que les résultats de recherches récentes auxquels il est fait référence et qui sont traités dans le présent document. Le NSN favorise la biodiversité et accroît l'activité biologique en fournissant le N disponible lorsque les sources organiques peuvent à peine en fournir. Le NSN contribue également à préserver la fertilité du sol en favorisant la transformation et la formation d'humus à partir de substances organiques présentant des niveaux relativement élevés de carbone par rapport à l'azote (rapport C/N élevé). L'apport de sodium contribue à empêcher l'acidification du sol et est utile aux cultures halophytes (betterave sucrière, légumes et fourrages). Le NSN fournit également des quantités réduites mais significatives de potassium, de magnésium et de soufre ainsi que des oligo-éléments comme cuivre, bore, manganèse et iode, essentiels pour les cultures et/ou les animaux et humains. Les teneurs en polluants que sont le cadmium, l'arsenic, le chrome et le plomb sont inférieures à 1 mg kg^{-1} . Ces niveaux sont parmi les plus bas des engrais naturels.

Le NSN est une substance naturelle extraite à l'aide de procédés mécaniques et hydrauliques sans réaction chimique. Il est la seule source naturelle d'azote nitrique et, avec le nitrate d'ammonium, ce sont pratiquement les deux seules formes chimiques pouvant être absorbées par les racines des plantes. Comme le nitrate naturel a une forme de N disponible, il constitue un complément aux sources de N organique qui ont besoins de temps et de conditions écologiques favorables pour être transformées par les micro-organismes du sol en N disponible pour les racines des plantes. Tout comme les engrais S autorisés en culture biologique contribuent au bouclage du cycle de S, le nitrate de sodium naturel, épandu au bon moment et avec le dosage correct, contribuera d'une façon semblable au cycle de N, qui lui est similaire et ceci, d'une manière constructive et

favorable à la vie. Toutefois, les limitations du S de source organique ne constituent pas un problème pour les agriculteurs biologiques parce que l'utilisation de sources naturelles non-organiques de S est autorisée en agriculture biologique. Ceci implique un traitement incohérent de ces deux éléments nutritifs similaires en agriculture biologique.

La formation de NSN que l'on trouve aujourd'hui dans le désert d'Atacama remonte à plus de 200.000 ans. Le désert d'Atacama est le désert le plus sec au monde avec moins de 2 mm de précipitations par an. Il n'y a pas de sol sur la surface du désert, pas de processus de formation du sol, pas de trace de vie ou précurseur de vie biologique, à un tel point que pour la NASA le désert est similaire à la surface inerte de Mars. On suppose que l'origine du NSN a été favorisée par des conditions atmosphériques particulières.

Aucun effluent liquide ne sort du site des mines. Toutes les solutions sont recyclées et l'eau est perdue uniquement dans l'atmosphère dans le système d'évaporation solaire, un élément très important du procédé de l'exploitation minière.

Une utilisation correcte du NSN, associée à de bonnes pratiques de gestion, garantit l'absence d'un effet négatif sur la vie humaine et sur l'environnement. Pour ce qui est d'autres substances naturelles qui pourraient fournir un N disponible aux cultures organiques, le fait est qu'il n'y a pas de substance alternative connue au NSN qui est une substance naturelle et fournit du N nitrique aux cultures sans le besoin de subir des transformations organiques.

De récentes enquêtes sur le terrain et en laboratoire menée par des institutions très liées à la communauté agricole biologique ont permis de démontrer que la seule utilisation de sources de N organique ne permettait pas d'obtenir un rendement satisfaisant ni une production de qualité. Ceci est principalement dû (a) à des quantités sous-optimales de N disponible libéré par les micro-organismes présents dans le sol à partir de sources organiques, et, (b) au manque de

synchronisation de la vitesse de libération du N disponible avec la vitesse d'absorption des cultures. Ceci est important pour les agriculteurs biologiques en particulier pendant les saisons froides et pour les agriculteurs installés dans des régions tempérées et froides, comme l'ont démontré récemment des recherches menées en Europe et aux Etats-Unis. Les cultivateurs biologiques sont non seulement affectés mais les clients eux-aussi peuvent ne pas trouver le produit biologique de leur choix à certaines époques de l'année. Le NSN apporte une solution en fournissant du N disponible aux cultures pendant toutes les saisons et dans différentes conditions de sol, de climat et de gestion.

Le NSN est extrait du minerai appelé caliche dans le désert d'Atacama à l'aide de procédés mécaniques et hydrauliques qui ne polluent pas l'environnement et à un endroit où la lumière solaire joue un rôle essentiel comme source d'énergie. L'énergie solaire capturée par le système est égale à 25 GJ par tonne de N (6,25 tonnes de NSN). La fabrication des engrais N chimiques consomme une moyenne de 40 Giga Joule (G J) par tonne de N et le procédé d'extraction du NSN utilise un total de 44 GJ, ce qui est proche de la moyenne de l'industrie. Cependant, dans l'extraction du NSN, seuls 19 GJ d'énergie non-renouvelable sont utilisés, ce qui équivaut à 43% de l'énergie totale consommée, alors que les 57% restants sont de l'énergie solaire. Le nitrate de sodium naturel n'est pas seulement d'origine naturelle mais, de plus, la plus grosse proportion de l'énergie utilisée pour l'extraction est de l'énergie renouvelable.

L'utilisation de nitrate de sodium naturel n'est pas recommandée dans des sols salins ou sodiques dont les conditions chimiques sont facilement identifiables par des déterminations analytiques de routine sur des échantillons envoyés aux laboratoires d'analyse du sol. Son utilisation n'est pas non plus recommandée dans des sols présentant un mauvais drainage ou dans des sols arides sans possibilité d'irrigation. Dans ces conditions, la plupart des autres engrais devraient également être soumis à des restrictions d'utilisation similaires.

Aux Etats-Unis, l'utilisation de nitrate de sodium naturel est limitée à 20% des besoins en N des cultures.

Les concepts présentés dans le présent document ainsi que les matières associées sont présentés avec plus de détails dans un document complémentaire qui sera disponible avant la 32^{ème} Session de la Commission du Codex Alimentarium.

TABLE DES MATIERES

SUBSTANCE PROPOSEE : Le nitrate de sodium naturel comme source d'azote pour les cultures biologiques.....	12
 SECTION 5. CONDITIONS A L'INSCRIPTION DE SUBSTANCES A L'ANNEXE 2 ET CRITERES POUR L'ETABLISSEMENT DE LISTES DE SUBSTANCES PAR LES PAYS.....	12
 Section 5.1 Principes généraux.....	12
 5.1-1. Respect des principes de la production biologique.....	12
 5.1-2. La substance est nécessaire / essentielle à la fin visée.....	13
- Disponibilité de l'azote du sol pour la croissance des plantes.....	13
Effet de la température.....	13
Effet du pH.....	14
Rapport carbone - azote (C/N).....	14
Niveaux sous-optimaux d'humidité et d'oxygène dans le sol.....	14
Type d'argile.....	15
- Similarités entre le cycle de l'azote et le cycle du soufre.....	15
- Le nitrate de sodium naturel : une source complémentaire de N en culture biologique.....	16
Apport d'azote nitrique naturel et de sodium.....	16
Apport d'oligo-éléments.....	16
 5.1-3. L'extraction minière, l'utilisation et l'élimination de la substance ne donnent pas lieu ou ne contribuent pas à des effets inacceptables sur l'environnement.....	16
- Caractéristiques de la région d'origine du nitrate de sodium naturel.....	16
- Absence de sols et de processus de formation de sols.....	17
- Extraction de nitrate de sodium naturel et utilisation de l'eau	18
- Utilisation du nitrate de sodium naturel	18
- Elimination.....	18
 5.1- 4. Elles ont le plus faible effet néfaste sur la santé et la qualité de vie des humains ou des animaux.....	19

5.1-5. Des substances alternatives autorisées ne sont pas disponibles..... 19

Section 5.1 (a) Substances utilisées pour la fertilisation ou l'amendement du sol..... 21

5.1 (a)-1. Elles sont essentielles pour fertiliser le sol ou en préserver la fertilité, combler des besoins nutritionnels spécifiques des végétaux cultivés ou répondre à des besoins particuliers en matière d'amendement du sol et de rotation des cultures qui ne peuvent être satisfaits par les pratiques mentionnées à l'Annexe 1 ou d'autres substances comprises dans le Tableau 2 de l'Annexe 2..... 21

- Transformation de l'azote organique..... 21
- Apport de N Organique : Effet sur le rendement et la qualité du froment - Suisse..... 22
- Apport de N organique : Effet sur le rendement et la qualité de la pomme de terre - Suisse..... 24
- Apport de N organique : Effet sur le rendement de la tomate - Californie..... 26
- Transformation de l'azote dans les fumiers et composts - Californie..... 29
- Transformation du N organique de fumiers – Royaume-Uni..... 33
- Rendement du maïs dans les systèmes de gestion biologique et autres systèmes dans les cultures en rotation - Minnesota..... 35
- Synchronisation de la transformation du N organique avec absorption de N par les cultures..... 36
- Etude du destin de N appliqué comme nitrate de sodium naturel et sulfate d'ammonium à une culture de froment - Belgique..... 37
- Comportement similaire de l'azote et du soufre en agriculture biologique 38
- Rôle du nitrate de sodium naturel en agriculture biologique..... 39

5.1 (a)-2. Les ingrédients sont d'origine végétale, animale, microbienne ou minérale et peuvent subir les traitements suivants d'ordre : physique (par exemple, mécanique, thermique), enzymatique, microbien (par ex. compostage, fermentation) ; ce n'est que si les procédés susmentionnés ont été épuisés, que les procédés chimiques peuvent être considérés et ceci uniquement pour l'extraction des supports et des liants..... 40

- Localisation des dépôts de nitrate de sodium naturel..... 40
- Le désert d'Atacama 40
- Description et origine des dépôts de nitrate de sodium naturel..... 41
- Mines de caliche et extraction du nitrate de sodium naturel..... 42
- Système d'évaporation solaire - Utilisation de l'énergie renouvelable dans l'extraction du nitrate de sodium naturel..... 43

5.1 (a)-3. Leur utilisation n'a pas un effet inacceptable sur l'équilibre de l'écosystème des sols ou les caractéristiques physiques du sol, ou la qualité de l'eau et de l'air	44
- Dynamique de l'azote nitrique dans les sols	44
- Dynamique du sodium dans les sols.....	45
- Le sodium en agriculture.....	46
- Effet de l'utilisation continue de sulfate d'ammonium et de nitrate de sodium naturel pendant plus de 80 ans sur le rendement des graines de froment et de la paille.....	46
- Effet de sources d'azote organique et inorganique sur la population des vers de terre.....	47
5.1 (a)-4. Leur utilisation peut être restreinte à des conditions, des régions ou des denrées spécifiques.....	48
- Considérations générales.....	48
- Sols salins et sodiques.....	48
Références.....	49

SUBSTANCE PROPOSEE : Nitrate de sodium naturel comme source d'azote pour les cultures biologiques

SECTION 5. CONDITIONS A L'INSCRIPTION DE SUBSTANCES A L'ANNEXE 2 ET CRITERES POUR L'ETABLISSEMENT DE LISTES DE SUBSTANCES PAR LES PAYS

SECTION 5.1 Principes généraux

5.1-1. Respect des principes de la production biologique

L'utilisation du nitrate de sodium naturel (NSN) associée à d'autres sources d'azote dans la production de végétaux biologiques est conforme aux principes de la production biologique parce qu'il s'agit d'une substance naturelle qui n'est pas soumise à des traitements chimiques et qui respecte l'environnement lorsqu'elle est utilisée correctement. On trouve le NSN dans le minerai dénommé caliche sur la surface inerte du désert d'Atacama, au Nord du Chili, et on l'extrait à l'aide de procédés mécaniques et hydrauliques, mais on ne le soumet à aucun traitement chimique. Le NSN favorise la biodiversité et amplifie l'activité du sol biologique en fournissant de l'azote lorsque peu ou pas de N ne peut être libéré au départ de sources organiques. Le NSN favorise la fertilité du sol à long terme en facilitant la transformation et le développement de l'humus au départ de substances organiques présentant des teneurs élevées en carbone (C) par rapport au N (rapport C/N élevé), et il ne nuit pas à l'environnement lorsqu'il est correctement utilisé. Le nitrate de sodium naturel fournit l'azote disponible aux végétaux cultivés lorsque le système biologique du sol n'est pas capable de transformer l'azote organique en formes disponibles ou lorsque la vitesse de transformation est inférieure à la vitesse dont les plantes ont besoin. Ce processus se déroule en deux étapes : la transformation du N organique en ammoniac ou "minéralisation" et l'oxydation de l'ammoniac en nitrate ou "nitrification". Le terme transformation sera utilisé pour inclure les deux étapes. Les conditions suivantes affectent l'activité des micro-organismes du sol (Brady & Weil, 1999. p. 499-502).

- basses températures du sol ;
- acidité ou alcalinité du sol ;

- rapport élevé carbone - azote (C/N) dans les substances organiques ;
- niveaux sous-optimaux d'humidité ou d'oxygène du sol ;
- présence d'argile smectite ou allophane, et ;
- autres situations pouvant empêcher l'activité normale des micro-organismes du sol.

5.1-2. La substance est nécessaire / essentielle à la fin visée

Disponibilité de l'azote dans le sol pour la croissance des plantes

Le nitrate de sodium naturel est un complément nécessaire aux sources d'azote organique en agriculture biologique car il fournit la forme NO_3^- - N directement disponible. En plus du NO_3^- - N, le nitrate de sodium naturel apporte également des éléments secondaires et des oligo-éléments. Dans les sols, l'azote est présent sous différentes formes chimiques, dont la plupart sont des composés organiques. Mais seule une infime fraction du total d'azote du sol – les formes inorganiques ou “minérales” NO_3^- et NH_4^+ – constitue les principales sources d'azote inorganique absorbé par les racines des plantes supérieures (Mengel & Kirkby, 1987. p. 347, 366). Les micro-organismes du sol sont responsables de la décomposition de substances organiques et de la transformation d'azote organique en formes inorganiques ou minérales (Brady & Weil, 1999. p. 449-460). A quelques exceptions près, les meilleurs taux de croissance, les meilleurs rendement et qualité des plantes sont obtenus lorsque les plantes absorbent la plus grosse partie de l'azote sous forme de NO_3^- - N et le reste sous forme de NH_4^+ - N (Marschner, 2002. p. 247-250). Nous passerons brièvement en revue dans les sections suivantes certains des facteurs les plus importants affectant les transformations microbiennes qui libèrent le nitrate N des substances organiques dans les sols.

Effet de la température. Au cours des saisons froides – qui dans de nombreuses régions agricoles correspondent à la fin de l'automne, à l'hiver et au début du printemps – l'activité microbienne du sol est très faible ou quasiment nulle. Comme la plupart des réactions biologiques sont influencées par la température, il est normal que la nitrification soit également influencée par ce facteur environnemental. Le coefficient de température Q_{10} de la minéralisation de l'azote est égal à 2 dans la plage des températures de 5 °C à

35 °C. Par conséquent, un doublement de la vitesse de minéralisation est associé avec un changement de 10 °C dans cette plage de températures. En-dessous de 5°C et au-dessus de 40 °C, la vitesse de minéralisation de l'azote est pratiquement arrêtée et la température optimale se situe généralement entre 30 et 35 °C (Tisdale, Nelson, Beaton & Havlin, 1985 p.134-135). A 10 °C, l'activité microbienne peut baisser sous 25 % de la vitesse normale et la concentration de NO_3^- et NH_4^+ dans le sol résultant de la lente décomposition de substances organiques n'est pas suffisante pour produire la quantité et la qualité de produits agricoles demandés par les consommateurs de produits biologiques (Hebeisen, Ballmer, Torche & Reust, 2003; Havlin, Beaton, Tisdale & Nelson, 1999; Nat. Organic Standards Board Tech. Advisory Panel Review, 2002; Small Planet Food, 2002)

L'effet inverse peut se produire lors des saisons chaudes, à la fin du printemps et en été, lorsque l'azote minéral, excédant les besoins des cultures, peut être libéré par les substances organiques. Cet excès d'azote minéral peut être lessivé et pourrait polluer les eaux souterraines, et donc devenir nuisible pour l'environnement. Il n'est pas possible de stocker l'azote disponible dans le sol en vue des saisons froides et / ou humides. En fonction du niveau d'humidité du sol, l'azote minéralisé qui reste dans le profil du sol après les récoltes durant l'été ou l'automne soit est lessivé dans le sous-sol, soit est réduit à la forme de gaz N_2 et est libéré dans l'atmosphère, soit il est absorbé par les micro-organismes du sol (Blankenau, Klaus. 2000). Dans les deux premiers cas, l'azote quitte le profil du sol et n'est plus disponible pour les cultures suivantes. Dans le troisième cas, l'azote absorbé par les micro-organismes reste dans le sol sous forme de composé organique pendant la saison froide jusqu'à ce que leurs corps en décomposition soient minéralisés par les générations suivantes de micro-organismes pendant la saison chaude suivante.

Effet du pH. Le pH du sol est un facteur qui limite l'activité des micro-organismes responsables des transformations organiques dans les sols. Il a été déterminé que la plage de la réaction du sol sur laquelle la nitrification se produit est la plage s'étendant d'un pH de 5,5 à un pH d'environ 10, avec la valeur optimale se situant vers les 8,5. Mais la nitrification peut se faire à un pH de 4,5 ou plus bas. (Tisdale, Nelson & Beaton, 1985 p. 129). La transformation continue de substances organiques est en soit un facteur qui accroît l'acidité du sol en raison de la formation d'ions d'hydrogène H^+ libérés pendant la

transformation de l'azote organique. Un ion d'hydrogène H^+ est libéré dans le sol pour chaque ion d'azote NO_3^- qui résulte de la transformation. (Tisdale, Nelson & Beaton, 1985. p. 127).

Rapport carbone - azote (C/N). La transformation du N organique en N disponible par les micro-organismes est affectée par le rapport C/N de la substance qui est ajoutée au sol. Si la substance présente un rapport C/N inférieur à 20/1, la transformation organique se produit et le N disponible est libéré dans le sol. Toutefois, si le rapport C/N est supérieur à 30/1, le déséquilibre dû à l'excès de carbone empêche la transformation de se produire, sauf s'il y a du N disponible dans le sol qui peut être utilisé par les micro-organismes. Le résultat net est une diminution ou une immobilisation du N disponible dans le sol. Pour des rapports se situant entre 20/1 et 30/1, il se peut qu'il n'y ait ni libération ni immobilisation du N disponible (Tisdale, S.L., et al., 1993. p. 124-125).

Niveau sous-optimal de l'humidité ou de l'oxygène du sol. La teneur en humidité du sol régule la quantité d'oxygène dans le sol et la proportion d'activité microbienne aérobie et anaérobie. L'azote nitrique peut être produit par transformation de substances organiques dans le sol dans des conditions aérobies. Une activité aérobie et une formation de nitrate maximum se produisent lorsque 50 – 70 % de l'espace poreux du sol sont remplis d'eau, l'espace restant assurant une circulation d'air pour l'apport d'oxygène. Les niveaux d'eau en dehors de cette plage entraînent un déséquilibre humidité – oxygène qui réduit la formation de nitrate, ce qui peut finalement aboutir à des déficits de N nitrique dans les sols (Havlin, J.L. et al., 1999. p. 108-109).

Type d'argile. On a constaté que les smectites et les allophanes stabilisent la matière organique du sol et réduisent les taux de formation d'azote nitrique dans les sols. Les composants organiques contenant de l'azote adhèrent aux surfaces argileuses ou se trouvent dans de petits pores intermicellaires et sont ainsi protégés des attaques microbiennes (Brady & Weil. 1999).

Similarité entre le cycle de l'azote et le cycle du soufre

L'élément soufre (S) a un "cycle naturel" similaire au cycle de l'azote, étant absorbé par les plantes et les micro-organismes du sol sous la forme chimique de sulfate de soufre. Au tout début de la formation du sol, les minéraux en décomposition dans la roche mère

fournissaient du sulfate soluble à la solution du sol. Plus récemment, l'anhydride sulfureux atmosphérique, produit de la combustion de combustible fossile, a été déposé sur le sol par les pluies et incorporé dans le profil du sol après avoir été oxydé sous forme de sulfate.

Les plantes et les micro-organismes du sol réduisent le sulfate de soufre absorbé et les molécules qui en résultent forment des composés organiques qui font partie du tissu vivant. A partir de ce stade, les molécules de S entrent dans un cycle semblable à celui de N, et les substances organiques en décomposition représentent un apport naturel de S aux sols cultivés. Etant donné que l'excès de sulfate peut être lessivé du profil du sol, il ne reste peu ou rien de la roche mère dans les profils de sol mûrs. Et en raison de la préoccupation accrue portée à la pollution atmosphérique, l'apport de sulfate de soufre depuis l'atmosphère a également été considérablement réduit. Par conséquent, la décomposition de substances organiques représentent aujourd'hui la principale source de sulfate de soufre, de la même manière qu'elle représente la principale source d'azote nitrique en agriculture biologique.

En dépit des similarités organiques et chimiques entre les formes de sulfate et de nitrate, les deux éléments sont traités de façon très différente d'un point de vue pratique. Tout en acceptant que les carences en sulfate – produit dont l'apport par les substances organiques en décomposition est insuffisant – puissent être corrigées par application de sources naturelles non-organiques de sulfate de soufre, la même pratique n'est pas autorisée dans le cas de carences en nitrate, en particulier par le rejet de l'utilisation du nitrate de sodium naturel. Les raisons du traitement d'homologation incohérent de ces deux éléments nutritifs de plantes présentant le même comportement n'ont pas pu être trouvées dans une révision approfondie de la littérature mondiale en la matière.

Le nitrate de sodium naturel : une source d'azote complémentaire en agriculture biologique

Apport du N nitrique naturel. Le NSN est la substance naturelle qui complète toutes les sources d'azote organique en agriculture biologique en fournissant du N nitrique disponible immédiatement absorbé par les cultures ainsi que des quantités significatives d'éléments

secondaires et d'oligo-éléments indispensables. De plus, la quantité de sodium appliquée avec le NSN contribue à neutraliser l'acidité du sol, y compris celle résultant de l'effet acidifiant de la décomposition de substances organiques (Pinilla, 1993).

Apport d'oligo-éléments. Un apport suffisant d'éléments secondaires et d'oligo-éléments est pertinent pour l'efficacité de l'engrais azoté. Les carences en S, K, Mg, Zn, Cu et B peuvent aboutir à une médiocre efficacité de l'engrais azoté de 19 – 32 % par comparaison à 74% dans des conditions optimales d'apport d'éléments nutritifs (Schnug, 1991). Une application de 35 kg N ha⁻¹ (220 kg NSN ha⁻¹) représente un apport de 20% des besoins en bore, de 25% des besoins en manganèse, de 10-15% des besoins en Cu, de 1-2% des besoins en soufre, plus 450 de magnésium et 1000 g ha⁻¹ de potassium.

5.1-3. L'extraction minière, l'utilisation et l'élimination ne donnent pas lieu ou ne contribuent pas à des effets inacceptables sur l'environnement

Caractéristiques de la région d'origine du nitrate de sodium naturel

Le nitrate de sodium naturel est un composant naturel du minerai dénommé caliche dans le désert d'Atacama qui se situe à 1500 km au Nord de Santiago. Le désert d'Atacama est l'une des régions les plus sèches au monde ; il reçoit moins de 2 mm de précipitations par an. L'eau de pluie s'évapore presque immédiatement, laissant la surface du désert dans un état de sécheresse permanente. Le manque d'humidité est une condition critique qui a permis que le NSN reste dans la couche superficielle de caliche du désert pendant plus de 200.000 ans sans une trace de lessivage (Ericksen, 1981).

Absence de sols et de processus de formation de sols

L'état naturel de sécheresse du désert d'Atacama comporte une autre conséquence importante. Le manque d'humidité a empêché l'érosion des roches superficielles (roches mères) et le développement d'organismes vivants (microbiens, végétaux, animaux, humains), deux facteurs essentiels du processus de formation du sol et, conséquence directe, aucun processus de développement du sol ne s'est pas produit dans le désert d'Atacama. La vie microbienne et végétale existe uniquement en quelques endroits où il y

a de l'humidité provenant d'eau souterraine ou où l'eau a été amenée des montagnes à des fins d'extraction minière. En pédologie, des études pionnières réalisées sur le terrain par V.V. Dukochaev à la fin du 19^{ème} siècle, suivie du travail de Hans Jenny dans le courant du 20^{ème} siècle et d'autres recherches beaucoup plus minutieuses menées sur le terrain et en laboratoire, ont abouti à l'identification de cinq facteurs majeurs qui contrôlent la formation des sols (Brady, N.C. & R.R. Weil, 1999).

1. Roche mère (précurseurs géologiques ou organiques du sol)
2. Climat (essentiellement les précipitations et la température)
3. Biote (organismes vivants, végétation, microbes, animaux du sol et êtres humains)
4. Topographie (déclivité, aspect et position dans le paysage)
5. Temps (temps écoulé depuis que les roches mères ont été exposées à la formation du sol).

Les sols se définissent en termes de ces facteurs comme des "corps naturels dynamiques ayant des propriétés dérivées de l'effet combiné des activités climatiques et biotiques, modifiées par la topographie, agissant sur les roches mères sur des périodes de temps". En conséquence du manque d'humidité et d'organismes vivants, il n'existe actuellement aucun sol dans le désert d'Atacama et on n'y a rencontré aucune preuve de sols enterrés. La surface du désert est recouverte uniquement de poussières et de roches et n'a jamais été soumise à un processus d'érosion.

Ce type particulier de surface dans le désert d'Atacama a attiré la NASA qui y a testé ses véhicules "d'atterrissage" sur la lune et sur Mars et ses procédures de recherche. Dans un article récent paru dans Science Magazine (Navarro-Gonzalez, R., Rainey, F.A. & autres, 2003), une équipe de scientifiques de la Louisiana State University, NASA et de la Universidad Nacional Autonoma de Mexico rapporte la découverte d'une région du monde qui est étonnamment similaire à la surface de Mars. La mission Viking de la NASA vers Mars dans les années 1970 a montré que le sol martien ne présentait aucune vie ni matériaux organiques, les précurseurs chimiques nécessaires à la vie. L'an dernier, des expériences similaires à celles de Viking ont été réalisées par l'équipe de recherche dans la partie la plus sèche du désert d'Atacama et ce, dans le but d'identifier la présence de micro-organismes et aucune preuve de vie n'a été trouvée.

Extraction du nitrate de sodium naturel et utilisation de l'eau

Pendant le processus d'extraction, le caliche est broyé et le nitrate chilien est lessivé dans des conditions contrôlées avec une faible solution sel / eau à 35-40 °C pour être ensuite séparé de la solution par cristallisation à une température inférieure. L'eau disponible pour le processus d' extraction est très limitée et provient de la Cordillère des Andes et toutes les solutions aqueuses sont recyclées. La seule perte d'eau se fait par évaporation à partir de grands bassins où les solutions sont concentrées toute l'année par énergie solaire. Aucun effluent liquide ne résulte de l'ensemble du procédé d'extraction.

Utilisation du nitrate de sodium naturel

Pour ce qui est de l'utilisation, quand on applique du nitrate de sodium naturel aux cultures, il est possible d'exercer un niveau élevé de contrôle sur la quantité et le timing du niveau résultant de nitrate disponible dans le sol. Les expériences utilisant l'azote marqué ¹⁵N montrent que des applications séparées de nitrate de sodium naturel peuvent être synchronisées avec la vitesse d'absorption d'azote par les cultures, minimisant ainsi le nitrate disponible restant dans le profil après les récoltes qui peut être soumis au lessivage et nuire à l'environnement (Riga, A., et al., 1988). Pour ce qui est de la teneur en sodium dans le nitrate de sodium naturel, cet engrais a été appliqué dans l'Expérience classique de Rothamsted pendant 100 ans environ sans endommager le sol (Cooke, 1982). Ces thèmes seront abordés dans les sections suivantes du présent document.

Elimination

Si l'on considère à quel point le nitrate naturel est utile à la production de végétaux cultivés, il ne devrait pas être éliminé mais seulement stocké pendant des périodes prolongées pour des cultures ultérieures. Ses propriétés ne subissent aucune altération tant que l'on respecte les prescriptions de stockage de cet engrais.

Les preuves scientifiques et techniques indiquent que l'extraction minière, l'usage correct et le stockage adéquat du NSN n'entraînent pas et ne contribuent pas à des effets inacceptables sur l'environnement. Cette conclusion est en outre étayée par le fait

historique que cette substance a été utilisée en toute sécurité par des agriculteurs dans de nombreux pays sur différents continents pendant plus d'une centaine d'années.

5.1- 4. Elles ont le plus faible effet sur la santé et la qualité de vie des humains et des animaux

Lorsqu'il est utilisé correctement comme source de N pour les cultures, le nitrate de sodium naturel n'a aucun effet négatif sur la vie humaine ou animale ni sur la qualité de l'environnement. S'il n'est pas utilisé correctement, on peut constater un effet négatif des nitrates du sol sur la santé humaine ou animale et sur la qualité de vie lorsque les nitrates sont lessivés vers le sous-sol et polluent les nappes souterraines. Toutefois, comme indiqué au # 5.1.3 ci-dessus, le lessivage de nitrate se produit uniquement s'il n'est pas utilisé correctement, à savoir, lorsque (a) la vitesse d'application est de loin supérieure à ce qui est nécessaire en fonction des cultures et des conditions du sol, et, (b) le calendrier de l'application et / ou la disponibilité de l'azote dans le sol n'est pas en synchronisation avec la vitesse et le timing de l'absorption d'azote par les cultures (Havlin et al., 1999; Riga et al., 1988; McGill & Myers, 1987). Mais, comme expliqué ailleurs dans ce document, le nitrate de sodium naturel est la source la moins polluante des sources naturelles d'engrais azoté, pour autant que (a) la quantité appliquée corresponde au besoin réel du système sol / plantes, et, que (b) le moment de l'application soit synchronisé avec la vitesse correcte de l'absorption d'azote par la plante pendant son cycle de croissance. Le sodium est également un composant naturel du profil du sol et les quantités de sodium appliquées avec le NSN sont largement en deçà des limites normales pour le sodium dans les sols. Etant un élément à réaction alcaline, le sodium neutralise l'acidité produite par la décomposition des substances organiques ajoutées au sol et diminue ainsi la quantité de chaux nécessaire. En outre, le sodium est un élément nutritif pour les plantes halophytes avec une substitution partielle du potassium dans la betterave sucrière et d'autres espèces. La teneur en métaux lourds dans le NSN est très basse. La teneur en cadmium, arsenic, chrome et plomb est inférieure à un mg kg^{-1} . La teneur totale en métaux lourds exprimée comme le plomb est inférieure à 5 mg kg^{-1} .

Ces niveaux sont parmi les plus faibles des engrais naturels.

5.1-5. Des substances alternatives ne sont pas disponibles

Comme nous l'avons abordé précédemment dans ce document, la libération biologique de nitrate et d'ammoniac - pratiquement les deux seules formes de N qui peuvent être absorbées par les cultures - par les substances organiques dans les sols est fortement limitée par (a) la teneur relativement basse de N dans les substances organiques, (b) la température basse du sol pendant les saisons froides, et (c) d'autres conditions du sol et du climat. L'effet de limitation de températures basses sur la transformation du N organique est une conséquence inévitable de la dépendance normale de la température des systèmes biologiques terrestres. Ces conditions naturelles ne peuvent être contrôlées dans les champs, contrairement au contrôle qui peut être exercé sur, par exemple, les serres ou d'autres systèmes de production spéciale. Seules les formes d'azote qui sont disponibles pour les plantes sans avoir à subir de transformations biologiques dans le sol peuvent nourrir les cultures pendant toutes les saisons et aussi dans des conditions défavorables du sol et du climat en général. Le nitrate de sodium naturel est la seule source d'azote non-synthétique – existant à l'état naturel et extrait uniquement à l'aide de traitements mécaniques mais d'aucun traitement chimique – qui fournit le supplément d'azote requis dans les limites des définitions de l'agriculture biologique. L'utilisation de cette source naturelle de N permet à de grandes régions du monde ayant recours à un système agricole biologique de poursuivre leur production organique toute l'année. Le bénéficiaire final sera le consommateur de produits biologiques car il peut compter sur un apport régulier de produits de culture biologique toute l'année.

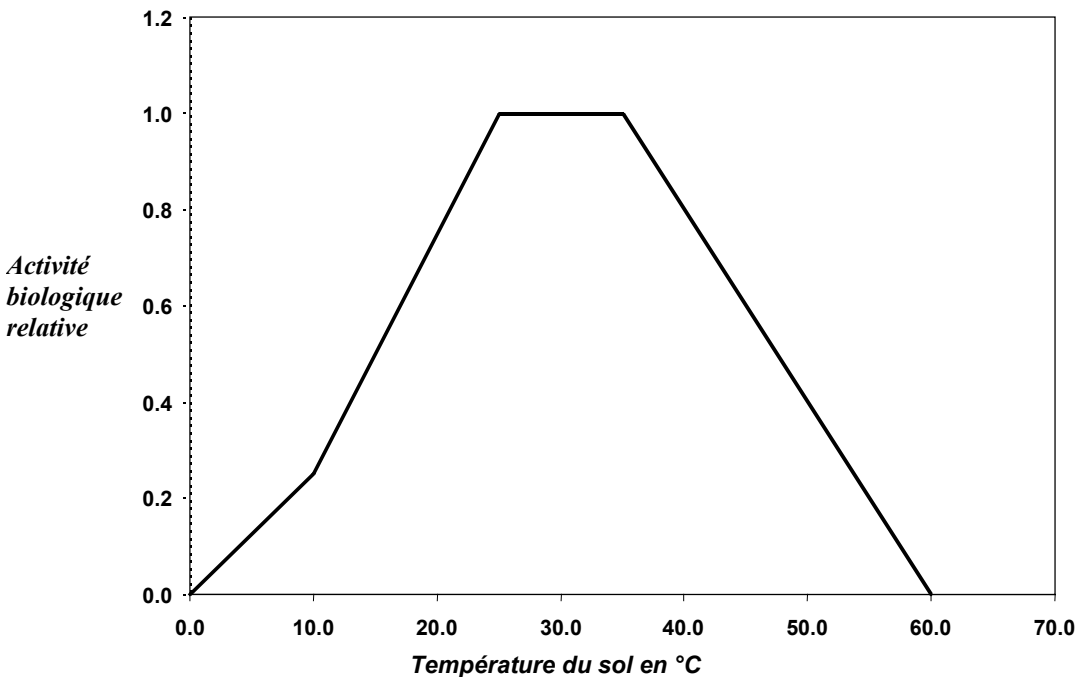
SECTION 5.1 (a) Substances utilisées pour la fertilisation ou l'amendement du sol

5.1 (a)-1. Elles sont essentielles pour fertiliser le sol ou en préserver la fertilité, combler des besoins nutritionnels spécifiques des végétaux cultivés ou répondre à des besoins particuliers en matière d'amendement du sol et de rotation des cultures qui ne peuvent être satisfaits par les pratiques mentionnées à l'Annexe 1 ou d'autres substances comprises dans le Tableau 2 de l'Annexe 2.

Transformation de l'azote organique

Toutes les formes d'azote organique, cultures de couverture de légumineuses, composts, fumiers, résidus d'animaux et de poissons, etc. doivent être transformées naturellement dans le sol en formes minérales d'azote, donc non-organiques, principalement de l'azote nitrique, afin d'être absorbées par les racines des plantes. La transformation est réalisée par les micro-organismes du sol et dépend d'autres facteurs, parmi lesquels la température du sol, le pH et l'aération. Lorsque la température du sol est inférieure à 12 °C, l'activité microbienne relative du sol baisse sous 25% comme indiqué à la Fig. 1 (Doran & Smith, 1987).

Fig. 1 – Effet de la température du sol sur l'activité biologique relative



Source: Doran, J.W. & M.S. Smith. 1987. Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients. In Follet, R.F. & others. Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. Madison, WI, USA, SSSA Special Publication No. 19. p. 53-72

A cette température du sol, il n'y a pas assez de NO_3^- -N disponible pour satisfaire les besoins de cultures saines croissant en fin de saison hivernale ou au début du printemps.

Le nitrate NO_3^- -N ne peut être stocké en suffisance sous forme disponible dans le profil du sol pendant la période de la fin d'été et l'automne. Pendant la période de fin d'automne, en hiver et au début du printemps, un lessivage de la majeure partie de nitrate se produit sous les climats tempérés humides et méditerranéens (Brady & Weil. 1999. p. 505). Une partie du nitrate NO_3^- -N du sol peut également être absorbée par les micro-organismes du sol (Blankenau, Klaus. 2000. p 25-45) et n'est pas libérée jusqu'à la saison chaude suivante lorsque leurs corps en décomposition sont minéralisés. Les premiers effets, qui sont aussi les plus visibles, de l'absorption limitée de nitrate minéral dans la production de végétaux sont la réduction du rendement des cultures et des paramètres de qualité.

Apport de N organique : Effet sur le rendement et la qualité du froment - Suisse

Dans une expérience de rotation à long terme de sept ans incluant les cultures suivantes : trèfle rouge/herbe, trèfle rouge/herbe, pomme de terre, froment d'hiver, chou ou colza, froment d'hiver, et seigle d'hiver, deux méthodes de cultures ont été comparées, la culture conventionnelle et la culture biologique. La méthode conventionnelle incluait des engrais minéraux et organiques ("production intégrée") alors que la méthode biologique incluait uniquement des sources organiques d'éléments nutritifs. A la fin du troisième cycle de rotation, le rendement moyen du froment cultivé selon la méthode biologique n'était que de 86% du froment cultivé conventionnellement. Le rendement de pommes de terre cultivées selon la méthode biologique n'était que de 63% des pommes de terre cultivées conventionnellement. (Dubois, D. et al., 2003).

Le résultat de deux ans d'essais de variétés cultivées selon les systèmes de cultures biologiques et conventionnels est présenté au Tableau 1. Dans cette expérience, le rendement moyen de toutes les variétés recevant des fumiers organiques est inférieur de 20% au rendement moyen des mêmes variétés recevant des engrais conventionnels. En outre, la teneur moyenne en protéines pour le traitement organique est inférieure de 11% à la teneur en protéines pour le traitement conventionnel.

Tableau 1. RENDEMENT MOYEN ET TENEUR EN PROTEINES DE VARIETES DE FROMENT D'HIVER CULTIVEES DE FACONS CONVENTIONNELLE ET BIOLOGIQUE

Variété de froment	Rendement de				Teneur en protéines			
	<i>Conventionnelle</i>	<i>Biologique</i>	<i>Différence</i>		<i>Conventionnelle</i>	<i>Biologique</i>	<i>Différence</i>	
	mt ha ⁻¹	mt ha ⁻¹	mt ha ⁻¹	%	%Pc	%Po	%Pc-%Po	%Diff
Arina	5.81	4.89	0.92	15.83	13.6	12.1	1.5	11.0
Tamara	5.81	4.45	1.36	23.41	14.3	13.4	0.9	6.3
Runal	6.22	4.98	1.24	19.94	14.2	12.6	1.6	11.3
Lona	5.91	4.57	1.34	22.67	14.1	12.5	1.6	11.3
Titlis	6.32	5.19	1.13	17.88	14.5	12.6	1.9	13.1
Taneda	6.56	4.81	1.75	26.68	14.0	12.9	1.1	7.9
Levis	7.14	5.31	1.83	25.63	13.0	11.4	1.6	12.3
Pegassos	7.52	6.62	0.90	11.97	11.8	9.9	1.9	16.1
Moyenne	6.41	5.10	1.31	20.41	13.7	12.2	1.5	11.1

Source: Menzi, M. & M. Anders. 2003. Essais variétaux de céréales dans les conditions de l'agriculture biologique. Zurich-Rekenholz, Suisse, Station fédérale de recherches en agroécologie. Les Cahiers de la FAL 45, pp 24-29

Et l'effet le plus significatif du traitement organique, en plus de la réduction du rendement de grain et de la teneur en protéines, est leur effet combiné, qui se reflète dans la réduction de la protéine végétale produite par unité de surface cultivée. Le Tableau 2 montre l'effet combiné du rendement inférieur et de la teneur plus faible en protéines sur le rendement en protéines par unité de surface ainsi que les résultats du test de sédimentation Zeleny.

Tableau 2. RENDEMENT DE PROTEINE ET TEST DE SEDIMENTATION ZELENY POUR LES VARIETES DE FROMENT D'HIVER CULTIVEES DE FACON BIOLOGIQUE. MOYENNES 2000 ET 2001.

Variété froment	Rendement en protéines				Test de sédimentation Zeleny			
	Conventionnelle	Biologique	Différence		Conventionnelle	Biologique	Différence	
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	ml	ml	ml	%
Arina	790	592	198	25.1	54.3	50.8	3.5	6.4
Tamara	831	596	235	28.2	71.3	64.5	6.8	9.5
Runal	883	627	256	29.0	62.5	57.5	5.0	8.0
Lona	833	571	262	31.4	66.3	58.0	8.3	12.5
Titlis	916	654	262	28.6	67.5	59.5	8.0	11.9
Taneda	918	620	298	32.4	65.9	62.3	3.6	5.5
Levis	928	605	323	34.8	60.4	51.8	8.6	14.2
Pegassos	887	655	232	26.1	54.6	41.2	13.4	24.5
Average	873	615	258	29.6	62.9	55.7	7.1	11.4

Source : Menzi, M. & M. Anders. 2003. Essais variétaux de céréales dans les conditions de l'agriculture biologique. Zurich-Rekenholz, Suisse, Station fédérale de recherches en agroécologie. Les Cahiers de la FAL 45, pp 24-29

Le rendement en protéine diminue en moyenne de 258 kg ha⁻¹ soit 30% de moins pour le traitement biologique par comparaison au traitement conventionnel. De plus, le test de sédimentation Zeleny pour le traitement organique est inférieur de 11,4%. La diminution des deux, c.-à-d. la teneur en protéines et le test de sédimentation, a un effet négatif important sur la qualité de cuisson de la farine et sur le pain, et ceci devrait se refléter dans le prix payé à l'agriculteur biologique pour son froment. De plus, pour le consommateur de produits biologiques, l'importance du froment biologique comme source complémentaire de protéines végétales diminue de façon substantielle.

Apport de N organique : Effet sur le rendement et la qualité de la pomme de terre - Suisse

Dans l'expérience de rotation à long terme citée dans la section précédente du froment, le rendement de la pomme de terre recevant des engrais organiques autorisés n'était que de 63% du rendement de la pomme de terre fertilisée avec des engrais organiques et

minéraux dans le cadre du programme de production intégrée "PER". Le programme PER se définit comme Agriculture de production intégrée à faible apport avec quelques terres supplémentaires utilisées à titre de "compensation écologique" c.-à-d. un système de production relativement proche de l'agriculture biologique (Dubois, D. et al., 2003).

Un groupe d'essais avec une variété de pomme de terre cultivée selon des systèmes biologiques et PER pendant les quatre saisons de 1997/1998 à 2000/2001 (Hebeisen et al., 2003) a confirmé les résultats de Dubois et al. (2003). Les résultats de ces essais de variétés sont présentés au Tableau 3.

Le rendement moyen sur les quatre saisons pour toutes les variétés de pomme de terre dans les essais cultivés selon le système PER était de 34.4 mt ha^{-1} alors que le rendement moyen avec le système biologique était de $18,9 \text{ mt ha}^{-1}$. Le rendement moyen avec le système organique n'est que de 55% du rendement obtenu avec le système PER.

Au Tableau 3, il est également important de noter que malgré les différences normales de rendement auxquelles on peut s'attendre entre les variétés et les saisons, le rapport entre le rendement avec le système biologique et le rendement avec le système PER reste quasiment constant à 0,55 ou 55% pendant les quatre saisons de l'expérience.

Tableau 3. Rendement commercial moyen de la pomme de terre d'études variétales. 1997 - 2001.

Année d'essai	Variété	Bio	PER	Org / PER
		norms mt ha ⁻¹	norms mt ha ⁻¹	%
1997/1998	Marabel	19.3	40.6	47.5
	Velox	21.9	33.1	66.2
	Sirtema [1]	23.5	38.1	61.7
	Bintje [1]	18.0	36.9	48.8
	Moyenne	20.7	37.2	55.6
1998/1999	Victoria	17.5	37.1	47.2
	Appel	20.2	36.1	56.0
	Bintje	18.0	29.6	60.8
	Moyenne	18.6	34.3	54.2
1999/2000	Naturella	19.4	30.8	63.0
	Synfonia	21.7	34.4	63.1
	Bintje	11.3	30.7	36.8
	Moyenne	17.5	32.0	54.6
2000/2001	Agata	22.3	34.8	64.1
	Cherie	18.2	31.5	57.8
	Laura	19.7	36.4	54.1
	Sistema	18.7	32.7	57.2
	Bintje	14.2	32.8	43.3
	Moyenne	18.6	33.6	55.4
Moyenne		18.9	34.4	55.1

[1]: Standard var.

Source: Hebeisen, Thomas, et al. 2003. Etude variétale pour la culture biologique des pommes de terre: le point de la situation. Zurich-Rekenholz, Suisse, Station Fédérale de Recherches en Agroécologie. Les Cahiers de la FAL 45, pp 30-36

Selon les auteurs (Hebeisen et al., 2003), le potentiel de rendement des variétés de pommes de terre ne peut être atteint pleinement avec le système biologique principalement en raison de maladies précoces (mildiou) et d'un apport insuffisant d'azote, qui s'est traduit par un développement défaillant et une sénescence précoce des feuilles. De plus, même les variétés tolérantes au mildiou n'ont pas présenté un rendement significativement plus élevé.

Par comparaison avec d'autres cultures, la pomme de terre a un besoin relativement élevé d'azote qui doit être satisfait sur une période de temps assez courte. Selon Walther, 1990,

et Walther et al., 1996, cités par Hebeisen et al. (2003), la pomme de terre absorbe 80% de l'azote dans les quatre à six semaines qui suivent l'émergence. De plus, en raison du développement limité du système racinaire, l'apport d'éléments nutritifs doit être concentré sur un volume de sol assez réduit.

Pour ce qui concerne l'effet du système de culture sur la qualité de la pomme de terre, les observations récentes ont été faites sur les résultats des expériences (Hebeisen et al., 2003):

- Amidon. La teneur en amidon n'était pas différente entre les deux systèmes de culture. Par conséquent, la production d'amidon par unité de champ cultivé avec le système biologique était près de la moitié de l'amidon produit avec le système PER.
- Qualité physique. Avec le système biologique, plus de tubercules étaient creux et les tailles étaient supérieures aux normes commerciales. Ceci était dû à l'apport en éléments nutritifs plus restreint, l'azote en particulier.
- Epoque de commercialisation. Les pommes de terre cultivées biologiquement mûrissent plus tôt et ont par conséquent été mises plus tôt sur le marché que les pommes de terre de la même variété cultivées selon la méthode conventionnelle. Ceci bouleverse le timing normal de la chaîne logistique et requiert des dépenses de stockage supplémentaires.

Apport de N organique : Effet sur le rendement de la tomate - Californie

Quatre rotations de cultures et systèmes de gestion ont été étudiés en 1994 et 1995 en relation avec la croissance et le rendement de tomates irriguées (*Lycopersicon esculentum* Mill.) dans la vallée de Sacramento, à proximité du Campus Davis de l'Université de Californie. Les rotations de cultures étaient :

1. des rotations conventionnelles de quatre ans (conv-4);
2. des rotations conventionnelles de deux ans (conv-2);
3. rotation de quatre ans à faible apport ;
4. rotation biologique de quatre ans.

Les cultures dans les deux rotations de quatre ans étaient des cultures de tomate-safran-maïs-froment (ou avoine+vesce) / haricot). Dans la rotation de deux ans, il s'agissait de cultures de tomate-froment. Dans les systèmes conventionnels, le N était fourni comme engrais minéral ; dans le système à faible apport, le N était fourni sous forme de vesce comme engrais vert plus de l'engrais minéral ; et, dans le système biologique, le N a été

fourni sous forme de vesce comme engrais vert plus du fumier de dinde. Les doses d'application figurent au Tableau 4.

Tableau 4. DOSE ET SOURCE D'AZOTE APPLIQUEES A LA CULTURE DE TOMATE SELON DIFFERENTS SYSTEMES DE CULTURE

Production system	Applied N (kg/ha)							
	1994				1995			
	Mineral fertilizer	Cover crop	Manure	Total	Mineral fertilizer	Cover crop	Manure	Total
Conventional-4	162			162	173			173
Conventional-2	162			162	173			173
Low input	95	111		206	95.0	64		159
Organic		103	130	233		82	125	207

Source: Cavero, J., Plant, R.E., Shennan, C. & D.B. Friedman. 1997. The affect of nitrogen source and crop rotation on the growth and yield of processing tomatoes. The Netherlands, Kluwer Academic Publ., Nutrient Cycling for Agroecosystems 42:271-282.

La tomate a été directement semée dans les deux systèmes conventionnels. Dans les systèmes à faible apport et biologique, elle a dû être transplantée en raison du contrôle moins complet sur les mauvaises herbes dans ces deux systèmes. Les rendements de tomate par année et les systèmes de production figurent au Tableau 5. Pendant l'année 1995, les tomates cultivées selon les systèmes à faible apport et les systèmes conv-4 avaient des rendements similaires qui étaient supérieurs à ceux des systèmes conv-2 et biologique. Le rendement inférieur avec le système biologique en 1995 a été provoqué par une carence en N liée au faible niveau de N minéralisé dans le sol et à la lente libération de N minéral en provenance de la culture de couverture + fumier. Une grande proportion du N en provenance du vesce comme engrais vert mais seulement une petite proportion de N en provenance du fumier de dinde s'étaient minéralisés pendant la saison.

Tableau 5. RENDEMENT DE TOMATE PAR AN ET SYSTEME DE PRODUCTION

Production system	Tomato yield (mt ha ⁻¹)		Mean yield	
	1994	1995	mt ha ⁻¹	%
Convetional-4	92.9	74.5	83.7	100
Conventional-2	83.0	67.2	75.1	90
Low input	62.6	80.3	71.5	85
Organic	54.6	64.5	59.6	71

Source : Cavero, J., et al. 1997. The affect of nitrogen source and crop rotation on the growth and yield of processing tomatoes. The Netherlands, Kluwer Academic Publisher, Nutrient Cycling in Agroecosystems 42:271-282.,

Une situation similaire a été observée dans l'expérience suisse avec le froment dont on a déjà parlé dans ce document. Le faible niveau de N disponible dans le sol dans le cadre du système biologique s'est reflété dans la faible concentration de N nitrique mesurée dans les pétioles des feuilles de tomates à trois différents stades du développement de la plante (Tableau 6).

Tableau 6. NO₃-N DANS PETIOLE DE TOMATE A DIFFERENTS STADE DE LA CROISSANCE

Production system	NO ₃ -N (ppm DM)					
	1994			1995		
	Bloom	One inch fruit	First colour	Bloom	One inch fruit	First colour
Convetional-4	14,275	9,225	775	7,920	7,653	240
Coventional-2	14,850	11,095	1,225	7,770	6,968	587
Low input	1,373	2,327	233	8,580	5,630	80
Organic	4,267	845	50	1,022	690	60

Source: Cavero, J., et al. 1997. The affect of nitrogen source and crop rotation on the growth and yield of processing tomatoes. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers. Nutrient Cycling in Agroecosystems 42:271-282.

D'autres mesures et analyses effectuées sur les plantes, qui ne figurent pas dans ce rapport, confirment les faibles niveaux de N disponible dans le sol (Cavero et al., 1997). Pendant l'année 1994, des plants de tomates cultivées selon les systèmes à faible apport et biologique ont également été soumis à des niveaux réduits de N disponible dans le sol.

Des mesures directes du (NO₃-N + NH₄-N) dans des échantillons du sol prélevés respectivement à 0-30 cm et à 30-90 cm confirment également les faibles niveaux de N disponible dans les sols organiques (Cavero et al., 1997).

On ne note aucune référence à l'effet des sources d'azote et de leur disponibilité sur la qualité de la tomate dans le rapport de Cavero (1997) traité plus haut.

Transformation de l'azote dans les engrais et composts - Californie

L'étude menée par Cavero et al. (1997) abordée dans la section précédente indique que l'une des raisons de la faible disponibilité de N pour la culture de la tomate dans le cadre du système biologique était la faible proportion de N organique provenant du fumier de dinde transformé en N nitrique pendant la saison de croissance.

Etant donné l'importance des engrais organiques comme sources supplémentaires de N pour les cultures selon des systèmes biologiques, Hartz, Mitchel et Gianini (2000) ont mené une recherche composée de deux parties pour évaluer la dynamique de transformation de l'azote (N) et du carbone (C) dans des fumiers, fumiers compostés et composts de résidus de plantes et de déchets de déchetteries municipales. Une partie de l'étude consistait en un essai biologique où la Fétuque roseau (*Festuca arundinacea* Shreb.) cultivée en pots dans des conditions contrôlées était utilisée pour mesurer le N libéré lors des différents amendements. L'autre partie de l'étude comportait des mesures directes en laboratoires de N et de C minéralisés au départ d'amendements incubés à 25 °C selon des techniques de laboratoire standard. Comme l'affirment les auteurs, "l'objectif primaire de cette étude était de déterminer la dynamique de minéralisation de N (transformation) d'une variété de fumiers et de composts représentatifs de ceux couramment utilisés comme amendement en production horticole en Californie" (Hartz, Mitchel et Gianini, 2000).

Un résumé des caractéristiques sélectionnées des amendements organiques inclus dans l'étude sont décrits au Tableau 7.

Les concentrations de N total et organique dans les amendements vont de 4,7 à 1% et de 3,9 à 1%, respectivement. Aucun fumier composté n'a les niveaux de N les plus élevés et les plus grandes différences entre les deux types de N sont probablement dues à une

teneur en N minérale plus importante. Le compostage occasionne une réduction de la différence entre le N total et organique, cet effet

TABLEAU 7. ENSEMBLE DE CARACTERISTIQUES SELECTIONNEES D'AMENDEMENTS ORGANIQUES

Amendments	Number of samples	Total N %	Organic N %	P %	K %	C/N ratio
<u>Manure</u>						
Poultry, pelletized	1	4.7	3.9	5.2	2.6	4.5
Poultry, dewatered	1	3.3	3.0	1.1	2.0	9.0
Poultry, aged	3	3.1 - 2.5	2.9 - 2.2	2.6 - 1.9	3.2 - 2.7	9.1 - 11.6
Feedlot, aged	2	2.4 - 2.0	2.0	1.3 - 1.1	1.7 - 1.4	12.4 - 12.5
<u>Manure compost</u>						
Poultry	7	3.8 - 1.3	3.6 - 1.3	1.4 - 2.9	0.5 - 3.0	5.7 - 10.2
Feedlot	6	2.2 - 1.9	2.2 - 1.8	1.2 - 0.6	3.2 - 2.0	8.8 - 11.4
Dairy	2	1.5 - 1.2	1.4 - 1.2	1.1 - 0.5	1.8 - 1.5	10.5 - 14.0
<u>Residue compost</u>						
Crop residue	1	1.2	1.2	0.2	1.4	9.3
Municip yard waste	8	1.7 - 1.0	1.7 - 1.0	0.4 - 0.2	1.4 - 0.6	9.3 - 15.5

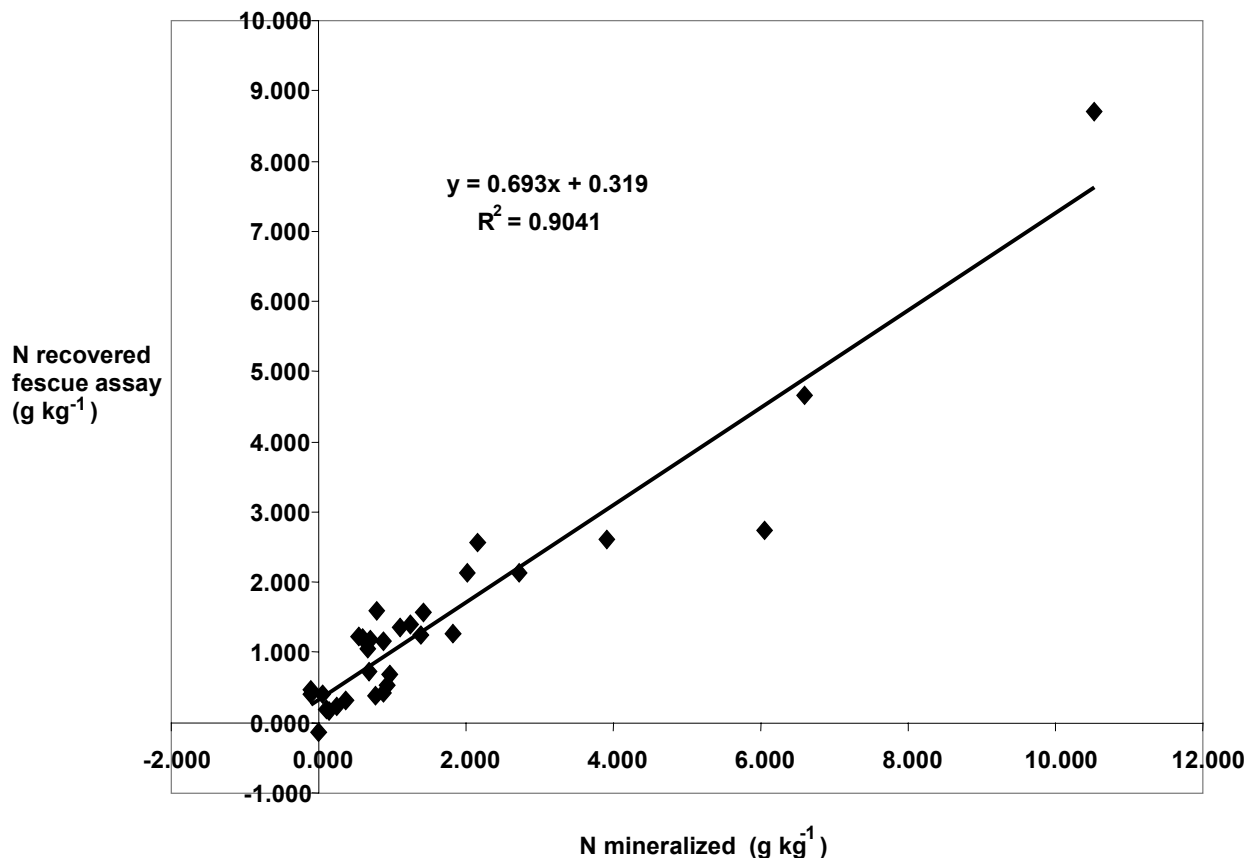
Source: Hartz, T.K., Mitchell, J.P. & C. Giannini. 2000. Nitrogen and carbon mineralization dynamics of manures and composts. HortScience 35(2): 209-212.

étant plus apparent à mesure que la teneur en N dans l'amendement diminue. Aucune différence n'a été observée à une concentration d'azote inférieure à 1,4%. Le rapport C/N affiche une tendance à augmenter quand la teneur en N des amendements diminue. Les vitesses de minéralisation de N des amendements organiques mesurées par l'essai biologique utilisant la fétuque roseau (*Festuca arundinacea* Shreb) et par les tests d'incubation en laboratoire présentaient un coefficient de corrélation élevé $R = 0.95$. L'équation de régression linéaire et le coefficient de détermination R^2 sont présentés à la Fig. 2.

La corrélation élevée ($R^2 = 0.904$) entre le N minéralisé déterminé par la méthode d'incubation en laboratoire et par l'essai biologique avec les plantes indique que la méthode d'incubation est une procédure analytique adéquate pour estimer la quantité de N organique qui sera disponible pour la plante en provenance d'amendements organiques. Toutefois, étant donné l'effet important de la température sur l'activité microbienne mentionné plus haut dans ce document, on peut prévoir des vitesses de minéralisation

inférieures à des températures plus basses qui dominent pendant les saisons froides dans de nombreuses régions agricoles du monde.

FIGURE 2. CORRELATION DE N RECUPERE PAR LA FETUQUE ROSEAU (*Festuca arundinacea* shreb.) ET LE N MINERALISE PENDANT L'INCUBATION D'AMENDEMENTS ORGANIQUES - ESSAI BIOLOGIQUE



Source: Hartz, T.K., Mitchell, J.P. & C. Giannini. 2000. Nitrogen and carbon mineralization dynamics of manures and composts. *HortScience* 35(2): 209-212.

Les valeurs d'absorption de N total par la fétuque roseau et le N organique minéralisé pendant l'incubation, dont les moyennes ont été établies pour les différents types d'amendements, figurent au Tableau 8.

Les quantités absolues de N minéralisé varient de 10,5 à moins de 1,0 kg N mt⁻¹ de l'amendement, ce qui correspond à une plage de 27,0 % à 1,3 % du N organique présent. Les fumiers non-compostés contiennent les plus grandes quantités de N organique et le pourcentage le plus important de ce N qui se minéralise, variant de 39 à 20 kg N mt⁻¹ et de 27 à 11,4 %, respectivement. Les composts de résidus, que ce soit de cultures ou de déchetteries municipales, présentent la teneur en N organique la plus basse et les taux de

minéralisation les plus bas, variant de 15 à 12 kg mt⁻¹ et de 1,3 à -05%, respectivement. Ce dernier chiffre, correspondant au compost de résidus de récoltes, représente une immobilisation nette du N minéral par l'amendement plutôt qu'une libération de N minéralisé. Les composts de fumier présentent des chiffres intermédiaires entre le fumier non composté et les composts de résidus. Les chiffres moyens du N total récupéré dans l'essai biologique avec la fétuque roseau suivent un modèle similaire à celui du test en laboratoire pour la minéralisation de N, et correspondent à la haute corrélation entre les observations individuelles (Fig. 2).

Tableau 8. Azote récupéré par la fétuque roseau (*Festuca arundinacea* Shreb.) à partir du N total et à partir du N minéralisé organique, selon les différents amendements. Valeurs moyennes.

Amendments	Number of samples	Average total N kg mt-1	N recovered by Fescue [1]		Organic N [1]		Organic N mineralized [2]	
			kg mt-1	%	kg mt ⁻¹	%	kg mt-1	%
<u>Manure</u>								
Poultry, pelletized	1	47	8.70	18.5	39	83	10.53	27.0
Poultry, dewatered	1	33	4.70	14.2	30	91	6.60	22.0
Poultry, aged	3	28	2.43	8.7	26	93	2.70	10.4
Feedlot, aged	2	22	1.71	7.8	20	91	2.27	11.4
<u>Manure compost</u>								
Poultry	7	24	1.47	6.1	23	96	1.83	8.0
Feedlot	6	21	1.01	4.8	20	95	0.74	3.7
Dairy	2	14	0.82	5.8	13	93	0.74	5.7
<u>Residue compost</u>								
Crop residue	1	12	0.40	3.3	12	100	-0.06	-0.5
Municip yard waste	8	15	0.27	1.8	15	100	0.19	1.3

[1]: kg N per mt of amendment. % of total N in amendments.

[2]: kg N per mt of amendment. % of Organic N in amendments.

Source: Hartz, T.K., Mitchell, J.P. & C. Giannini. 2000. Nitrogen and carbon mineralization dynamics of manures and composts. HortScience 35(2): 209-212.

D'un point de vue pratique, les données du Tableau 8 indiquent que pour fournir à une culture, par exemple, 50 kg de N ha⁻¹ disponible lorsque la température du sol pendant la journée est d'au moins 25 °C, la quantité requise d'amendement varie de 5 à 20 mt ha⁻¹ lorsqu'on utilise des fumiers non compostés, de 25 à 65 mt ha⁻¹ lorsqu'on utilise des fumiers compostés, et s'élève à plus de 200 mt ha⁻¹ lorsqu'on utilise des résidus compostés de la déchetterie municipale. Le coût pour l'agriculteur biologique associé au transport de quantités plus importantes de substance ne peut être ignoré.

Transformation du N organique des fumiers - Royaume-Uni

Une étude a été menée au Royaume-Uni pour (a) caractériser les différentes fractions du N du fumier, et, (b) déterminer la vitesse de minéralisation (transformation) du N organique du fumier par le biais d'un essai biologique utilisant des plantes dans une expérience en pots. Ces informations sont nécessaires pour prévoir l'apport en N disponible à court et à long terme pour les plantes afin d'éviter l'accumulation dans le sol et d'éventuelles pertes par lessivage et/ou volatilisation (Chadwick, D., John, F., Pain, B., Chambers, B. & J Williams, 2000). Cinquante échantillons de types de fumiers différents ont été requis pour cette étude. La composition moyenne des types de fumiers figurent au Tableau 9.

Une expérience en pot fut menée pour estimer le taux de minéralisation du N organique dans un sous-échantillon de 17 fumiers, appliqués à une dose cible de 200 kg total N/ha.

Tableau 9. VALEURS MOYENNES POUR CARACTERISTIQUES SELECTIONNEES D'ECHANTILLONS DE FUMIER

Manure type	Number of samples	Dry matter %	Fresh Weight basis		Dry Weight basis			C / N ratio
			Total N kg mt ⁻¹	Organic N kg mt ⁻¹	Total N kg mt ⁻¹	Organic N kg mt ⁻¹	% [1]	
Cattle slurry	12	11.1	4.1	2.9	37	26	71	9.63
Pig slurry	8	5.7	4.5	1.6	80	28	35	4.01
Cattle FYM	14	20.2	5.2	4.5	26	22	87	14.8
Pig FYM	6	22.7	8.6	6.1	38	27	71	9.84
Broiler litter	6	56.3	24.9	20.2	44	36	81	7.64
Layer manure	4	44.0	19.8	12.4	45	28	63	3.67

[1]: Organic N as % of total N, dry weight basis.

Source: Chadwick, D., John, F., Pain, B., Chamber, B. & J. Williams. 2000.

Mineralization of organic nitrogen from animal manures. Fertilization for sustainable plant production and soil fertility.- 11th World Fertilizer Congress of CIEC.

On a semé de l'ivraie vivace (*Lolium perenne* L.) dans des pots et on l'a gardée pendant 200 jours à 18 °C pendant 16 heures par jour et à 12 °C pendant 8 heures par nuit. On trouvera un résumé des résultats au Tableau 10.

Le fumier en couche et le purin de porc présentent les niveaux les plus élevés de minéralisation du N organique dans les amendements, à savoir 55% et 27,6%, respectivement, mesurés par l'absorption de N de l'ivraie vivace cultivée dans des conditions contrôlées. La minéralisation du N organique pour d'autres substances varie de 21,3% pour le fumier de porc (paillé) à 12,2% pour le purin de bétail. On a constaté que le taux de minéralisation était inversement proportionnel au rapport carbone – azote dans les amendements organiques.

Tableau 10. TENEUR MOYENNE EN N ET ABSORPTION PAR L'IVRAIE VIVACE DE N PROVENANT DU N ORGANIQUE DANS DES AMENDEMENTS (EXPERIENCE CONTROLEE EN POTS).

Manure type	Number of samples	Dry matter %	Total N FW [1] kg mt ⁻¹	Organic N FW		N uptake from org. N -- FW	
				kg mt ⁻¹	% [2]	kg mt ⁻¹	% [3]
Cattle slurry	3	11.08	4.12	2.92	70.87	0.36	12.20
Pig slurry	3	5.71	4.54	1.60	35.24	0.44	27.60
Cattle FYM	3	20.15	5.20	4.50	86.54	0.63	14.00
Pig FYM	4	22.66	8.58	6.08	70.86	1.30	21.30
Broiler litter	3	56.28	24.86	20.22	81.34	4.17	20.60
Layer manure	1	44.04	19.75	12.38	62.68	6.81	55.00

[1]: FW = based on fresh weight of amendment.

kg mt⁻¹ = kg per mt of FW amendment.

[2]: Organic N as % of total N.

[3]: N uptake as % of organic N.

Source: Chadwick, D., John, F., Pain, B., Chamber, B. & J. Williams. 2000.

Mineralization of organic nitrogen from animal manures. Fertilization for sustainable plant production and soil fertility.- 11th World Fertilizer Congress of CIEC.

Selon les résultats susmentionnés, sauf pour le fumier en couche et le fumier de volaille, l'application d'une dose même modérée de N disponible nécessitera l'application de quantités substantielles de fumiers par hectare. L'application de, par ex., 50 kg de N ha⁻¹ disponible nécessitera des taux de fumier variant de 38 tm/ha de fumier de porc (paillé) à 138 tm/ha de purin de bétail.

On observe une concordance générale des résultats de cette étude (Chadwick, D., John, F., Pain, B., Chambers, B. & J Williams, 2000) avec l'étude réalisée par Hartz et al. (2000). A l'exception de quelques substances, les taux de minéralisation sont d'environ 20% ou moins de l'azote organique présent dans l'amendement.

Rendement de maïs cultivé en système biologique et en d'autres systèmes en rotations de cultures - Minnesota

Des expériences de rotation de deux et de quatre ans ont été menées sur 2 sites, V1 et V2, au "Southwest Research and Outreach Center" situé près de Lamberton, Minnesota (Porter, P.M. et al., 2003). L'objectif consistait à comparer quatre systèmes de gestion, à savoir, apports élevés (HI), apports faibles (LI), apports organiques (OI) et aucun apport (ZI) dans le cadre de système de rotation de deux et de quatre ans. La rotation de deux ans était une séquence de culture maïs-soja. La rotation de quatre ans était une séquence de culture de maïs-soja-avoine/luzerne-luzerne. Chaque culture de chaque rotation était cultivée chaque année, avec trois répétitions. Comme base de la comparaison, on a utilisé les rendements de la rotation de deux ans HI maïs-soja parce que cette stratégie de culture ressemble le plus aux pratiques de la majorité des agriculteurs du nord du Midwest des États-Unis. On trouvera un résumé des résultats les plus importants correspondant aux stratégies HI, OI et ZI au Tableau 11.

Tableau 11. RENDEMENTS DE MAIS DANS LES EXPERIENCES DE ROTATIONS AU MINNESOTA

Crop rotation	Farming strategy	Average fertilizer rates			Average corn yield		Yield increase dY mt ha ⁻¹ [2]	Nitrogen efficiency dY/dN [3]
		N kg ha ⁻¹	P2O5 kg ha ⁻¹	K2O kg ha ⁻¹	1993-1999 mt ha ⁻¹	%		
	[1]							
<u>Site V1</u>								
2 year	HI	146	70	44	8.96	100	4.57	31.3
4 year	OI	318	136	289	8.15	91	3.76	11.8
4 year	HI	69	69	43	8.60	96	4.21	61.0
4 year	ZI	0	0	0	4.39	49		
<u>Site V2</u>								
2 year	HI	143	24	22	8.72	100	1.05	7.3
4 year	OI	185	90	158	8.11	93	0.44	2.4
4 year	HI	62	29	17	8.72	100	1.05	16.9
4 year	ZI	0	0	0	7.67	88		

[1]: HI = high inputs; OI = organic inputs; ZI = Zero inputs.

[2]: dY = yield difference over the ZI yield.

[3]: dY/dN = Yield increase per unit of fertilizer N (kg kg⁻¹)

Source: Porter, P.M., Huggins, D.R., Perillo, C.A., Quiring, S.R., & R.K. Crookston. 2003. Organic and other management strategies with two- and four-year crop rotations in Minnesota. Madison, Wisconsin, Agronomy Journal 95:233-244

Sur le site V1, le rendement de maïs avec la stratégie de rotation de 2 ans à apports élevés (HI) fut une moyenne de 8,96 mt ha⁻¹ sur la période de 7 ans 1993-1999. Si l'on prend cette stratégie HI de 2 ans comme base de comparaison, la stratégie organique (OI) de 4 ans produisit 91%, la stratégie de 4 ans HI produisit 96% et la stratégie de 4 ans sans apport (ZI) produisit 49%. Des niveaux faibles de P dans le sol peuvent contribuer à expliquer la faible moyenne du rendement de maïs dans la stratégie ZI.

Sur le site V2, le rendement de maïs avec la stratégie de rotation de 2 ans à apports élevés (HI) a produit une moyenne de 8,72 mt ha⁻¹ sur la période de 7 ans 1993-1999. Si l'on prend la stratégie de 2 ans HI comme base de comparaison, la stratégie organique (OI) de 4 ans a produit 93%, la stratégie HI de 4 ans a produit le même résultat et la stratégie sans apport de 4 ans (ZI) a produit 88%. Toutes les réponses en rendement pour la stratégie ZI sur le site V2 sont plutôt faibles et le niveau plus élevé du P dans le sol, par comparaison avec le niveau de P dans le sol sur le site V1, peut être un facteur expliquant le rendement élevé des végétaux cultivés selon la stratégie ZI de 4 ans sur le site V2. Le niveau élevé de rendement moyen de la stratégie ZI peut également expliquer la faible efficacité de l'engrais azoté ajouté sur le site V2. Cependant, l'efficacité de l'azote dans la stratégie OI est la plus basse des deux sites.

Synchronisation de la transformation de l'azote organique avec absorption d'azote par les cultures

Lorsqu'on utilise uniquement du fumier paillé comme source d'éléments nutritifs pour les plantes, il peut se révéler difficile de coordonner la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol avec la demande d'éléments nutritifs de la plante sur une période de temps relativement courte. La minéralisation (transformation en ammonium et en nitrate) de l'azote organique dépend dans une large mesure des conditions météorologiques et des propriétés du sol. Et contrairement à ce qui peut se faire en agriculture conventionnelle, il n'est pas possible en culture biologique d'appliquer de l'azote disponible immédiatement au départ d'une source d'engrais externe (Hebeisen et al., 2003), sauf si cela est spécifiquement autorisé (USDA 2002). Il convient de souligner que ce qui est important, ce n'est pas uniquement le contenu absolu de l'azote disponible dans les sols mais également le moment (timing) de la disponibilité de l'azote en relation avec la vitesse d'absorption par les plantes cultivées.

Selon Hebeisen (2003), la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol est aujourd'hui un facteur limitateur de productivité en agriculture biologique. Dans certains cas, le timing, les conditions environnementales ou les contraintes du marché peuvent limiter l'utilisation du compostage et des cultures de couverture, renforçant dès lors le besoin d'une application d'azote aisément disponible. Ceci est spécialement vrai dans les systèmes d'agriculture biologique intensives et pour les terres à haute valeur commerciale où les cultures de couverture et le compostage offrent un apport en azote bien moindre selon leur poids (National Organic Standards Board Technical Advisory Panel Review. 2002; Small Planet Foods. 2002.).

Destin du N appliqué comme nitrate de sodium naturel et comme sulfate d'ammonium à des cultures de froment - Belgique

Dans une expérience sur le terrain menée en Belgique par Riga, A. et al. (1988), on a évalué le destin de l'azote appliqué de façon séparée à partir de NSN et de sulfate d'ammonium à l'aide d'un bilan ^{15}N et d'une technique de micro-parcelles. L'objectif spécifique consistait à évaluer l'influence du moment de l'application fractionnée et du type de support N sur le destin de la quantité de N appliqué à chaque application fractionnée. Une dose totale de 100 kg N ha^{-1} a été divisée en 35 kg ha^{-1} appliqués à la fin du labour, 45 kg ha^{-1} à la montée en graine et 20 kg ha^{-1} au commencement de la floraison. Afin de suivre le destin de chaque application fractionnée de N, on a utilisé du nitrate de sodium naturel marqué ^{15}N ($\text{Na}^{15}\text{NO}_3$) et du sulfate d'ammonium marqué ^{15}N - $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Le pourcentage de récupération du N de l'engrais par les cultures est mentionné au Tableau 12.

Le pourcentage le plus important de N récupéré par la plante entière récoltée ainsi que par les composants grains et paille provient du NSN, alors que le sulfate d'ammonium a laissé le pourcentage le plus important de N dans le sol. Ce résultat montre que l'azote disponible dans le sol appliqué comme nitrate de sodium naturel peut être mieux synchronisé avec l'absorption par la plante que le N fourni par les formes d'ammonium.

Tableau 12. EFFET DU SUPPORT D'ENGRAIS AZOTE SUR LA RECUPERATION PAR LE FROMENT DU ^{15}N DIVISE APPLIQUE A DIFFERENTS STADES DU DEVELOPPEMENT.

N carrier	Plant component	N applied (kg ha^{-1})		
		Tillering end 35	Heading 45	Flower inic. 20
		----- N recovered (%) -----		
NaNO_3	Grain	34.2	51.5	55.7
	Straw	20.4	16.3	14.2
	Whole plant	54.6	67.8	69.85
	Soil	17.9	10.4	11.6
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Grain	32.2	48.4	52.5
	Straw	19.4	15.2	13.6
	Whole plant	51.6	63.6	66.1
	Soil	22.5	12.7	15.2

Source: Riga, A., Francois, E., Destain, J.P., Guiot, J. & R. Oger. 1988.

Fertilizer nitrogen budget of $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$ and $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ split-applied to winter wheat in microplots on a loam soil. Plant and Soil 106:201-208.

L'utilisation de l'azote NSN est un complément aux sources organiques de l'azote dans les systèmes d'agriculture biologique. Une application opportune de doses partielles de NSN peut être synchronisée avec l'absorption du N par les cultures, ce qui donne les meilleurs résultats en termes de rendement, de qualité des cultures et de protection de l'environnement.

Comportement similaire de l'azote et du soufre en agriculture biologique

Les plantes absorbent le soufre (S) du sol sous forme d'ion sulfaté qui est dissout dans la solution du sol. Les sulfures métalliques dans les roches constituent la source originale du S du sol. Après oxydation, ils ont pris la forme chimique du sulfate. Une autre source de S est l'atmosphère. La combustion du charbon et d'autres produits contenant du S libère de l'anhydride de soufre dans l'air, qui après avoir été oxydé sous forme de sulfate est déposé sur le sol par les pluies. Après avoir été absorbé par les racines des plantes et les micro-organismes du sol, l'ion de sulfate est réduit et incorporé dans les composés organiques métaboliques, de la même façon que l'ion de nitrate. A partir de ce stade, la molécule de S suit un cycle naturel similaire à celui de N et la matière organique en

décomposition devient une source non seulement de N mais également de S pour les récoltes.

L'ion sulfaté est facilement lessivé et peu ou pas de sulfate⁻ dérivé de l'érosion des roches mères dans le sol reste dans les profils de sols mûrs. D'autre part, en raison de la préoccupation humaine croissante pour la pollution de l'air, la libération de S contenant des gaz vers l'atmosphère est restreinte avec la réduction correspondante d'apport atmosphérique de S aux sols. En conséquence, après les carences de N, la carence de soufre est en passe de devenir un trouble nutritionnel important et fréquent dans l'agriculture biologique (Hegel, 2000; Hagard et al., 2000).

Les amendements biologiques fournissent uniquement une quantité très limitée de S avec une moyenne de 0,07 kg de S par kg de N. Une tonne métrique de fumier solide (paillé) ou un mètre cube de fumier liquide de vache apporte environ 0,3 à 0,4 kg de S au sol. Cependant, la libération des ions sulfatés disponibles pour les plantes dépend des étapes de la décomposition organique similaires à celle de l'azote (Revue Suisse d'Agriculture, 2001). Pour compenser le faible apport en S des substances organiques et pour empêcher ou corriger les carences en S en agriculture biologique, on peut utiliser des substances naturelles non-organiques spécifiques comme le sulfate de potasse et le sulfate de calcium (Lampkin, N., 2002). Et pour les mêmes raisons, et pour corriger la situation incohérente actuelle, il devrait être permis à tous les agriculteurs biologiques d'utiliser le nitrate de sodium naturel pour compenser l'apport insuffisant de N des amendements organiques.

Rôle du nitrate de sodium naturel en agriculture biologique

Le NSN est une substance qui complète les sources d'azote organique en fournissant des quantités contrôlées d'azote nitrique qui peuvent être synchronisées avec les besoins des cultures et qui sont disponibles quelles que soient les conditions climatiques et quel que soit le pH du sol. Il couvre également une partie des besoins en oligo-éléments importants pour les cultures et l'homme plus une quantité de sodium qui contribue à neutraliser l'acidité du sol qui s'accumule à la suite de la décomposition des sources organiques du N et du S. Comme il est mentionné à plusieurs endroits de ce document, cette source naturelle d'azote nitrique, extraite de la nature sans recours à des traitements chimiques, est conforme aux principes de l'agriculture biologique et, pour cette raison, elle est couramment acceptée et utilisée par d'importants groupes d'agriculteurs biologiques.

5.1 (a)-2. Les ingrédients sont d'origine végétale, animale, microbienne ou minérale et peuvent subir les traitements suivants d'ordre : physique (par exemple, mécanique, thermique), enzymatique, microbien (par ex., compostage, fermentation) ; ce n'est que si les procédés susmentionnés ont été épuisés, que les procédés chimiques peuvent être considérés et ceci uniquement pour l'extraction des supports et des liants.

Localisation des dépôts de nitrate de sodium naturel

Le nitrate de sodium naturel est extrait des dépôts naturels de caliche. On trouve le minerai de nitrate, dénommé caliche, dans le désert d'Atacama au Chili, en bandes discontinues sur la partie orientale de la Cordillère de la Côte entre les latitudes 19° et 26° (Fig. 4). La plupart des dépôts se situent à des altitudes de moins de 2000 m bien que certains se trouvent plus haut. Les terrains de nitrate se trouvent dans des régions typiquement basses en relief. Dans le district de Tarapaca – qui fut la principale source de nitrate avant 1870 – on trouve les minerais les plus riches. L'activité minière actuelle se concentre dans le district de Tocopilla dans la province d'Antofagasta. Des dépôts de nitrate de pourcentage variable contenant de 1 à 7% de NSN sont disséminés sur tout le désert d'Atacama.

FIG. 4. Localisation des dépôts de nitrate

Le désert d'Atacama

Dans un article récent publié dans Science magazine par Navarro-Gonzalez, Rainey & d'autres (2003), une équipe de scientifiques de la NASA signalaient avoir découvert une région du monde qui était étonnamment similaire à la surface de Mars, le désert d'Atacama. La mission Viking de la NASA vers Mars dans les années 1970 a



montré que le sol martien ne présentait aucune vie ni matériaux organiques, les précurseurs chimiques nécessaires à la vie. Dans le courant de 2002, des expériences similaires à celles de Viking ont été réalisées par l'équipe de recherche dans la partie la plus sèche du désert d'Atacama et ce, dans le but d'identifier la présence de micro-organismes et aucune preuve de vie n'a été trouvée.

Le désert d'Atacama est de climat tempéré et s'étend sur 1000 km avec des températures mensuelles moyennes de l'air se situant entre 16 et 14 °C qui sont remarquablement uniformes tout au long de l'année (± 3 °C). L'extrême aridité est due aux effets combinés d'un système de haute pression situé sur la partie ouest de l'Océan Pacifique, l'effet siccatif du courant océanique froid de Humboldt qui s'écoule vers le Nord, l'effet de barrière que forme la Cordillère de la Côte aux nuages océaniques et l'effet de barrière de la Cordillère des Andes qui intercepte les précipitations en provenance de la Convergence Inter-tropicale (Navarro-Gonzalez, Rainey & Autres, 2003). Des évidences géologiques et minéralogiques suggèrent que les conditions d'extrême aridité ont persisté dans le sud du désert Atacama pendant 10 à 15 millions d'années, faisant de ce désert l'un des plus anciens déserts, si ce n'est le plus ancien de la planète. L'âge et l'aridité du désert d'Atacama sont probablement directement responsables des importantes accumulations de nitrate présentes dans cette région. Les nitrates sont probablement d'origine atmosphérique (Ericksen, 1983).

Description et origine des dépôts de nitrate de sodium naturel

On rencontre les dépôts de caliche dans les roches et les sédiments non consolidés qui ne présentent pas de variation systématique au niveau du contenu minéral. Les plus répandues sont les conglomérats de régolite de matériel insoluble et stérile cimenté par des sels solubles, principalement des sulfates, des nitrates et des chlorures de Na, K et Mg. Hormis le nitrate de sodium naturel, le caliche contient de petites quantités de borates, chromates et iodates ainsi qu'environ 30 oligo-éléments incluant l'iode, le cuivre, le zinc, le bore et le molybdène. Il existe différentes théories sur l'origine et la formation des dépôts de nitrate naturel. Le débat va bien au delà de l'objet de ce document et le lecteur intéressé se reportera à Ericksen, G.E. (1981) pour une présentation de ses propres investigations et une discussion bien documentée sur le sujet. Néanmoins, il convient de noter que le seul facteur et le plus important dans l'accumulation de matières salines dans le désert d'Atacama a été l'extrême aridité de la région qui existe depuis 10 à

15 millions d'années. Mais, bien que le climat du désert d'Atacama ait été extrêmement aride durant les ères tertiaire et quaternaire, il y a eu des intervalles de changement climatique lorsque des pluies croissantes ont grandement modifié et détruit les dépôts de nitrate pré-existants. Selon Ericksen G.E. (1981), si les dépôts de nitrate s'étaient formés durant ces 10 à 15 millions d'années et s'ils ont une histoire complexe de déposition et de destruction répétées, on peut estimer raisonnable un taux de déposition qui permet l'accumulation du nitrate en 200.000 années. Ceci serait une période de temps théorique estimée pour la formation des dépôts qui existent aujourd'hui, ce qui implique en plus qu'aucune pluie avec une capacité de lessivage du nitrate ne s'est produite au cours de cette période.

Les sols riches en nitrate existent localement dans d'autres régions désertiques du monde mais ils ne sont nulle part aussi répandus et avec des concentrations comparables à celles que l'on trouve dans le désert d'Atacama.

Mines de caliche et extraction du nitrate de sodium naturel

L'extraction du NSN est basée sur un système de dissolution – cristallisation n'incluant pas de procédés chimiques ou d'échange ionique.

Le caliche est broyé à une taille de 1,0 centimètre. Entre 75 et 80% du tonnage réduit à cette taille sont déposés dans de grandes cuves de lessivage d'une capacité de 10,000 m³. Les résidus fins du processus de broyage sont envoyés vers un système de lessivage différent, où l'iode est récupérée.

On fait circuler de “faibles solutions mères” chauffées à 48°C entre les particules de caliche dans les cuves jusqu'à ce que les solutions soient saturées en NSN pour devenir des “solutions mères concentrées”. La solution concentrée est refroidie à 12°C pour cristalliser et précipiter le NSN dissout. Après avoir récupéré l'iode dissoute à l'usine d'iode, la “faible solution mère” qui en résulte est renvoyée aux cuves de lessivage pour entamer un nouveau cycle dans le circuit fermé de lessivage-précipitation. Dans ce circuit fermé de lessivage, l'eau est perdue uniquement par évaporation, en particulier lorsqu'elle est envoyée vers le système d'évaporation solaire, traité dans la section suivante.

On n'utilise pas d'eau fraîche dans le cycle de lessivage sauf lorsqu'il est nécessaire de déplacer la “solution mère concentrée” des rebuts. En raison de limitations au niveau de

la quantité d'eau utilisée pour laver les rebuts et du fait que ce volume est limité, la récupération du nitrate de sodium du caliche n'est que de 75% environ.

Le nitrate de sodium cristallisé est centrifugé et granulé, il est alors prêt à être utilisé comme source d'azote nitrique naturel dans la production de cultures.

Système d'évaporation solaire - Utilisation de l'énergie renouvelable dans l'extraction du nitrate de sodium naturel

Le procédé de refroidissement et de centrifugation permet de ne récupérer que le NSN et l'iode du minerai dénommé caliche. Cependant, le système d'évaporation solaire (SES) permet une plus grande récupération de NSN et d'autres sels de la "faible solution mère" avant qu'elle ne soit recyclée dans les cuves de lessivage. Le SES est également utilisé pour concentrer les solutions produites par le "lessivage en tas" ou lessivage de vieux stocks de rebuts du minerai dénommé caliche qui ont été traités il y a de nombreuses années pour extraire le NSN à l'aide de procédés moins efficaces.

L'opération du SES commence par un ajout d'eau supplémentaire au lavage des déchets dans les cuves de lessivage. L'eau ne déplace pas uniquement du NSN supplémentaire qui autrement se perdrait avec les déchets, mais il dissout également les doubles sels de potassium, les borates, l'iode, les sulfates, les sels de magnésium et autres, qui ne sont que partiellement solubles dans la "solution mère concentrée". Après être passé par l'étape normale de refroidissement-cristallisation, les nouvelles solutions faibles ne sont pas renvoyées vers les cuves de lessivage pour entamer un nouveau cycle, mais sont pompées vers le système d'évaporation solaire pour être concentrées.

Le système d'évaporation solaire se compose d'une série de bassins interconnectés où la solution se déplace depuis un premier bassin ayant la concentration initiale ou la plus basse en sel vers le dernier bassin ayant la concentration en sel la plus élevée pouvant être atteinte par évaporation solaire. Après avoir atteint la concentration en sel optimale prédéterminée, le NSN est récupéré des solutions par refroidissement et cristallisation et la solution faible finale est envoyée vers les cuves pour entamer un nouveau cycle de lessivage du minerai dénommé caliche.

On dispose de deux usines d'évaporation solaire, Coya Sur et Pampa Blanca, avec, respectivement, 550.000 m² et 544.000 m² de surface d'évaporation effective. Les taux

moyens d'évaporation quotidienne pour l'ensemble de l'année pour chaque usine sont respectivement de $4,5 \text{ L m}^{-2}$ et de $3,5 \text{ L m}^{-2}$, ce qui est une autre conséquence des conditions de sécheresse permanente du désert d'Atacama. Le volume total de l'eau évaporée des bassins solaires est supérieure à 1,6 million de mètres cubes par an et l'énergie solaire correspondante capturée est de 3,6 millions de Giga Joules (GJ). Cette quantité d'énergie correspond à 25 GJ par tonne métrique d'azote (N) extraite du caliche. En production d'engrais chimiques, l'énergie moyenne utilisée pour produire une tonne métrique de N est d'environ 40 GJ (EFMA, ca 2000). L'énergie totale utilisée pour produire une tonne métrique de nitrate de sodium naturel est proche de cette moyenne. Toutefois, seuls 19 GJ sont de l'énergie non-renouvelable, soit 43%, alors que les 57% restants sont de l'énergie solaire. Le nitrate naturel n'est pas seulement une substance naturelle mais la plus importante proportion d'énergie utilisée dans le processus d'extraction est de l'énergie solaire renouvelable.

5.1 (a)-3. Leur utilisation n'a pas un effet inacceptable sur l'équilibre de l'écosystème des sols ou les caractéristiques physiques du sol, ou la qualité de l'eau et de l'air

Dynamique de l'azote nitrique dans les sols

Tout type d'azote organique, c.-à-d. des résidus de cultures, des cultures de couverture de légumes, compost, fumier, etc., est naturellement transformé en N minéral dans le sol, la plus grosse partie en azote nitrique, afin d'être absorbé par les racines des plantes. La transformation est réalisée par les micro-organismes du sol et est principalement affectée par la température du sol, l'humidité du sol, la disponibilité de l'oxygène, le pH du sol, le type d'argile et le rapport carbone - azote (C/N) dans les substances organiques. En conséquence, l'azote nitrique est une substance naturelle dans les sols et est la principale source d'azote pour les cultures en développement.

Comme il a été signalé dans d'autres sections du présent document, il n'est pas toujours possible, dans les champs, de maintenir à des niveaux optimaux tous les facteurs naturels qui contrôlent l'activité des micro-organismes du sol. Une conséquence directe est que la vitesse de transformation de l'azote organique du sol n'est pas toujours synchronisée avec la vitesse d'absorption d'azote par les cultures. Même si les facteurs agronomiques et pédologiques les plus importants sont maintenus à des niveaux adéquats, pendant les

saisons froides, la vitesse de transformation peut ne pas être suffisante pour apporter l'azote minérale requis par les cultures en développement afin de produire des niveaux de rendement et de qualité adéquats. Mais, pendant les saisons chaudes, la vitesse de transformation sera élevée et des pratiques de culture spéciales peuvent se révéler nécessaires pour empêcher le lessivage de l'azote nitrique produit en excès par rapport aux besoins des cultures.

L'hiver et le début du printemps sont les saisons au cours desquelles une grande partie du lessivage du nitrate se produit sous les climats tempérés humides et méditerranéens (Brady & Weil. 1999. p. 505) et l'azote nitrique disponible ne peut être stocké en tant que tel dans le profil du sol à la fin de l'été et pendant l'automne pour être utilisé par les cultures hivernales et printanières. L'azote nitrique produit en excès pendant la saison chaude peut être stocké dans le sol uniquement s'il est reconverti en azote organique par les micro-organismes du sol et par des végétaux spécialement cultivés à cet effet. Cet azote ne sera à nouveau minéralisé qu'au début de la saison chaude suivante.

L'application de l'azote nitrique provenant du NSN pendant les saisons à basse température est seulement un complément des bas niveaux de nitrate produit à ce moment par les micro-organismes du sol en raison des conditions saisonnières défavorables. Le NSN était le produit de processus écologiques à des époques reculées et son utilisation en agriculture biologique est complètement analogue à l'utilisation du guano fossile également produit comme engrais il y a longtemps ou à l'utilisation de composants minéraux de calcium, potassium ou magnésium produits par des réactions naturelles à des époques reculées (et autorisés en agriculture biologique).

Dynamique du sodium dans les sols

Les ions positifs du calcium, magnésium, potassium et sodium sont des composants normaux de la solution du sol. Toutefois, ils sont également retenus à la surface des colloïdes du sol par des charges négatives électrostatiques. Ce système constitue la capacité d'échange cationique (CEC) du sol. Une importante caractéristique de la CEC est que les différents éléments ne sont pas retenus avec la même énergie. L'ordre croissant de la force d'adsorption cationique, ou *Série lyotropique*, est calcium > magnésium > potassium > sodium (Tisdale, S.L. et al. 1993. p. 89-90). Le sodium est retenu avec la moindre force car il est l'ion positif le plus facile à lessiver par les pluies ou

l'eau d'irrigation. Dès lors, le processus de lessivage de sol normal empêche l'accumulation du sodium dans les profils de sols normaux. La seule exception sont les sols secs ou les sols avec un faible drainage interne où aucun sel de sodium ne devrait être utilisé.

Il est un fait historique que le nitrate de sodium naturel a été largement utilisé dans la production de cultures sous différentes conditions de sol et de climat dans de nombreux pays depuis 1860 environ et continue à être utilisé aujourd'hui sans qu'on signale de dommage au sol. Le froment, le maïs, le coton, le tabac, la betterave sucrière, les légumes et les fruits ne sont que quelques unes des cultures les plus communes fertilisées avec succès avec le NSN. Au Japon, la culture de la betterave sucrière a été fertilisée avec du NSN pendant plus de 80 ans et l'application se poursuit aujourd'hui sans aucun signe d'effets négatifs (Mitsubishi, 2001). Comme le relève Cooke (1982, p. 158) l'application continue de sels de sodium y compris le NSN pendant près de 100 ans dans les Expériences classiques de Rothamsted au Royaume-Uni n'a montré aucun signe de dommage au sol. Les résultats des Expériences classiques de Rothamsted qui montrent non seulement l'absence de dommage mais également les bénéfices de l'utilisation continue de NSN pour le rendement - par comparaison avec l'autre engrais azoté à base d'ammonium - sont présentés à la section suivante.

Le sodium en agriculture

L'utilisation correcte du sodium en agriculture, avec des restrictions pour des sols mal drainés et des sols secs, comporte des bénéfices non seulement pour les sols agricoles mais également pour les cultures halophytes et les animaux d'élevage. Un débat complet sur ce thème ne fait pas l'objet de ce document et les lecteurs intéressés se reporteront à Lunt (1966), Marschner (2002)) et Phillips & Chiy (1995) pour des présentations mises à jour sur le sujet.

Effet de l'utilisation continue de sulfate d'ammonium et de nitrate de sodium naturel pendant plus de 80 ans sur le rendement des graines de froment et de la paille

Cette comparaison de sulfate d'ammonium et de NSN fait partie de l'expérience Broadbalk menée à Rothamsted, Royaume-Uni, depuis 1844. La comparaison s'étend sur les années 1885 – 1967, et les engrais ont été appliqués à deux doses, 48 et 96 kg N ha⁻¹, tout

d'abord sur des cultures continues de froment (1885-1925) et puis sur des cycles de jachère de six ans. D'autres éléments nutritifs ont été fournis à toutes les parcelles afin d'éviter toutes carences. On trouvera un résumé des résultats principaux au Tableau 13.

L'avantage du NSN fut plus important pendant les 41 premières années lorsque le froment était cultivé continuellement, spécialement pour la dose plus petite de N avec des différences positives de 376 kg de grains ha⁻¹ (26%) et de 916 kg paille ha⁻¹ (40%).

Tableau 13. COMPARAISON ENTRE LE NITRATE DE SODIUM NATUREL ET LE SULFATE D'AMMONIUM PENDANT PLUS DE 80 ANS A LA STATION EXPERIMENTALE DE ROTHAMSTED, R.-U.

Crop rotation	Time period	Fertilizer N Rate kg N ha ⁻¹	Wheat yield		Straw yield	
			Ammonium sulphate	Nat. Sodium nitrate	Ammonium sulphate	Nat. Sodium nitrate
			kg grain ha ⁻¹	kg grain ha ⁻¹	kg straw ha ⁻¹	kg straw ha ⁻¹
Continuous wheat	1885-1925	0	904		1,268	
		48	1,456	1,832	2,309	3,225
		96	2,108	2,221	3,803	4,418
		Mean N effect	1,782	2,027	2,460	2,548
Six fallow cycles	1935-1964	0	1,606		2,748	
		48	1,995	2,134	3,577	3,828
		96	2,472	2,711	4,706	5,083
		Mean N effect	2,234	2,422	4,142	4,455
Whole period	1885-1967	0	1,142		1,795	
		48	1,606	1,870	2,761	3,414
		96	2,184	2,359	4,142	4,606
		Mean N effect	1,895	2,115	3,451	4,010
		Yield difference		220		558
Yield difference %		12		16		

Source: Garner, H.V. & G.V. Dyke. 1968. The Broadbalk yields. Harpenden, UK, Rothamsted Experimental Station. Report for 1968, Part 2 pp. 34-35

La mise en jachère a augmenté le rendement moyen du grain et de la paille mais la supériorité du NSN s'est maintenue au cours de la seconde période. Si l'on fait la moyenne du résultat pour les deux doses de N sur l'ensemble de la période de 83 ans, le NSN a produit 220 kg de grains en plus et 558 kg de paille en plus par ha que le nitrate d'ammonium, ce qui représente des augmentations de rendement de 12% et de 16%, respectivement.

Effet de sources d'azote organique et inorganique sur la population des vers de terre dans les sols

Les vers de terre jouent un rôle unique dans la formation de la structure du sol, en favorisant l'agrégation des particules du sol et la formation d'une structure de granules. En traitant le sol et les résidus organiques dans ses intestins, l'argile et la matière organique sont intimement mêlées et recouvertes de substances gommeuses organiques stabilisantes et de chaux secrétées par une glande spéciale dans l'appareil digestif. Le résultat, les déchets du ver, se compose du type et de la taille de l'agrégat dont le sol a besoin pour fournir une capacité adéquate de rétention d'eau, d'aération et de réserves d'éléments nutritifs pour la croissance des plantes (Lampkin, N., 2002). Les vers de terre ne supportent pas l'acidité du sol, l'utilisation de sulfate d'ammonium, certains herbicides et fongicides, les motobêches et l'incapacité à retenir suffisamment de résidus organiques dans le sol.

Il y a encore beaucoup à apprendre sur les interactions entre le type et la quantité d'utilisation des engrais, les espèces cultivées, les pratiques agricoles et l'activité des vers de terre. Dans les recherches réalisées par Edwards et Lofty (1982) à Rothamsted, et d'autres articles concernant la recherche cités par Lampkin, N., (2002), on a constaté que l'enlèvement de la paille et certaines techniques de culture pourraient avoir un effet négatif sur les vers de terre et d'autres organismes du sol. Ils ont également trouvé que les espèces de vers de terre étaient plus nombreuses dans les parcelles traitées aux engrais organiques que dans les parcelles non traitées. Il existait une forte corrélation positive entre la dose de N inorganique appliquée et les populations de vers de terre, probablement en raison de l'accroissement de la production de racines et de résidus, bien que les engrais organiques aient beaucoup plus augmenté la population des vers de terre que les sources de N inorganique. Toutefois, les parcelles recevant à la fois le N organique et inorganique avaient la plus grande population de vers de terre.

Edwards et Lofty (1982) considèrent que l'effet nuisible d'engrais rapporté ailleurs peut être dû à une augmentation de l'acidité du sol. Selon les résultats susmentionnés, l'utilisation des sources organiques de N combinées au nitrate de sodium naturel devrait fournir un bon environnement de sol pour le développement des vers de terre, en particulier parce que la réaction alcaline du nitrate de sodium naturel contribue à neutraliser l'acidification résultant de la décomposition de substances organiques et la libération d'azote nitrique.

5.1 (a)-4. Leur utilisation peut être restreinte à des conditions, des régions ou des denrées spécifiques

Considérations générales

Le NSN peut ne pas être appliqué à des sols salins et sodiques ainsi qu'à l'agriculture alimentée par des pluies limitées sans autre source d'eau, à des environnements semi-arides et arides sans irrigation, à des sols mal drainés et, en général, à des conditions où le sodium peut avoir tendance à s'accumuler dans le profil du sol. Aux Etats-Unis, l'utilisation du NSN en agriculture biologique est limitée à 20% des besoins en N des végétaux cultivés.

Sols salins et sodiques

Un cas spécial est celui des sols salins et sodiques que l'on trouve dans quelques régions spécifiques du monde. Les sols salins ont un excès de sels solubles. La conductivité électrique (EC) de l'extrait saturé de sols salins est de 4 dS m^{-1} (decisiemens par mètre) ou plus. Certains sols salins sont également sodiques parce qu'ils présentent un excès de sodium. Les sols sodiques ont généralement un pH supérieur à 8,5. Un sol salin est classifié comme sodique si le pourcentage de sodium échangeable (ESP), à savoir le pourcentage de saturation du sodium de la Capacité d'échange cationique, est égal ou supérieur à 15%. Un autre critère de définition d'un sol sodique est que la valeur du taux d'adsorption de sodium (SAR) est égale ou supérieure à 13 (Brady & Weil, 1999. p. 385-389)

Les déterminations chimiques EC, EPS et SAR utilisées pour définir les sols salins et sodiques sont des procédures analytiques standard et peuvent être demandées dans la plupart des laboratoires d'analyse du sol (Westerman, 1990). Elles peuvent être utilisées pour décider de l'utilisation correcte du nitrate de sodium naturel. Toutefois, il convient de tenir compte de deux considérations spéciales dans le cas des sols soumis à l'agriculture biologique. La décomposition de sources organiques appliquées et la libération de N nitrique produisent une acidification du sol. A cet égard, l'ajout de nitrate de sodium naturel n'est pas uniquement un complément du N directement disponible mais également un agent neutralisant cette acidification résultant de la minéralisation des sources

organiques de N. En outre, les substances organiques décomposées représentent une source supplémentaire de charges négatives qui augmentent la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, et donc la capacité du sol à traiter correctement les quantités limitées de sodium contenues dans le nitrate de sodium naturel.

Références

- Blankenau, Klaus. 2000.** Einfluss der Stickstoffimmobilisation auf die Verfügbarkeit von Dungerstickstoff für Getreide. Dissertation Universität Hannover, Institute für Pflanzenernährung. Verlag Grauer, Beuren, Stuttgart, Germany. 151 p
- Brady, N.C. & R.R. Weil. 1999.** The nature and properties of soils. 12th edition. New Jersey, USA, Prentice-Hall, Inc. 881 p.
- Chadwick, D.R., John, F., Pain, B.F., Chambers, B., & J. Williams. 2000.** Mineralization of organic nitrogen from animal manures. 11th World Fertilizer Congress, Fertilization for sustainable plant production and soil fertility.
- Chadwick, D.R., John, F., Pain, B.F., Chambers, B., & J. Williams. 2000.** Plant uptake of nitrogen from the organic nitrogen fraction of animal manures: a laboratory experiment. *Journal of Agricultural Science* 134: 159-168.
- Cooke, G.W. 1982.** Fertilizing for maximum yield. 3rd ed. London, UK, Granada Publishing Limited. 465 p.
- Doran, J.W. & M.S. Smith. 1987.** Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients. In Follet, R.F. & others. Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. Madison, WI, USA, SSSA Special Publication No. 19. p. 53-72.
- Edwards, C & J.R. Lofty. 1982.** Nitrogenous fertilizers and earthworm populations in Agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 14: 515-521.
- EFMA. ca 2000.** Harvesting Energy with fertilizers. European Fertilizer Manufacturers Association. Av. E. va. Nieuwenhuysse 4, B-1116 Brussels, Belgium.
- Ericksen, George E. 1981.** Geology and origin of the Chilean nitrate deposits. US Department of Interior, Geological Survey Professional Paper 1188. 37 p.
- Ericksen, George E. 1983.** *American Scientist* 71: 366
- Garner, H.V. & G.V. Dyke. 1968.** The Broadbalk yields. Harpenden, Hert, UK. Rothamsted Experimental Station, Report for 1968, Part 2, p. 34-35.
- Hagel, I. 2000.** Auswirkungen einer Schwefeldüngung auf Ertrag und Qualität von Weizen schwefelmangelgefährdeter landbouw. Landbouwuniversiteit Wageningen.
- Haglund, S, Ebbesvik, M & S. Hansen. 2000.** Is ley production in organic farming limited by sub-optimum sulphur supply?. Proc 13th IFOAM Scientific Conference, Basel, Switzerland. P.31.
- Hartz, T.K., Mitchell, J.P & C. Gianini. 2000.** Nitrogen and carbon mineralization dynamics of manures and composts. *HortScience*, Vol. 35(2):209-212.
- Havlin, J.L, Beaton, J.D., Tisdale, S.L. & W.L. Nelson. 1999.** Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. 6th ed. New Jersey, USA, Prentice-Hall Inc. 499 p.

- Hebeisen, T., Ballmer, T., Torche, J.M. & Werner Reust. 2003.** Etude varietale pour la culture biologique des pommes de terre: le point de la situation. In: Station federale de recherches en agroecologie et agriculture, Zurich-Reckenholz, Swiss Les Cahiers de la FAL 45 : 30-36.
- Kuo, S., Sainju, U.M., & E.J. Jellum. 1997.** Winter cover cropping influence on nitrogen In soils. Madison, Wisconsin, Soil Science Soc. of Am. Journal 61:1392-1399.
- Lampkin, Nicolas. 2002.** Organic Farming. 104 Valley Road, Ipswich IP1 4PA, United Kingdom, Old Pond Publishing. 747 p.
- Lunt, Owen Raynal. 1966.** Sodium. In Chapman, H.D. ed. Diagnostic criteria for plants and soils. University of California, Division of Agr. Sciences. p. 409-432.
- Marschner, Horst. 2002.** Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. London, UK, Academic Press Limited. 889 p.
- McGill, W.B. & R.J.K. Myers. 1987.** Control on dynamics of soil and fertilizer nitrogen. In: Follett, R.F., Stewart, J.W.B. & C.V. Cole. Eds. Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. Madison, Wisconsin, USA, Soil Sci. Soc. of Am. Inc. & Am. Soc. of Agronomy. p. 73-99.
- Mengel, K. & E.A. Kirby. 1987.** Principles of plant nutrition. Bern, Switzerland, International Potash Institute. 687 p.
- Menzi, M. & M. Anders. 2003.** Essais varietaux de cereals dans les conditions de lagriculture biologique. Zurich-Rekenholtz, Swiss, Station Federal de Recherches en Agroecologie. Les Cahiers de la FAL 45: 24-29.
- Mitsubishi Co. 2001.** History of Chilean Nitrate in Japan imported by Hokuren. Personal communication.
- Navarro-Gonzalez, R., Rainey, F.A., & Others. 2003.** Mars-like soils in the Atacama Desert, Chile, and the dry limit of microbial life. Science Vol. 302 No. 5617 : 1018-1021.
- National Organic Standards Board Technical Advisory Panel Review. 2002.** Chilean Nitrate for general use as an adjuvant in crop production. USA, University of California Sustainable Agriculture Research and Education Program, USDA National Organic Program. 11 p.
- Phillips, C.J.C. & P.C. Chiy. 1995.** Sodium in agriculture. United Kingdom, Chalcombe Publications. 217 p.
- Pinilla, H. 1993.** Efecto del uso sucesivo de nitrógeno nítrico y amoniacal en la Acidificación de suelos trumaos. Frontera Agrícola 1(1): 18-22.
- Porter, P.M., Huggins, D.R., Perillo, C.A., Quiring, S.R., & R.K. Crookston. 2003.** Organic and other management strategies with two- and four-year crop rotations in Minnesota. Madison, Wisconsin, Agronomy Journal 95:233-244.

- Power, J.F. & J.W. Doran. 1988.** Role of crop residue management in nitrogen cycling and use. p. 101-113. In J.W. Doran et al., (ed.) Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. ASA Spec. Publ. 51. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Revue Suisse d'Agriculture. 2001.** Donnees de base pour la fumure des grandes Cultures et des herbages. Suisse, Station federale de recherches agronomiques de Changins et Federation des societes d'agriculture de la Suisse Romande. Vol 33, Nr. 3.
- Riga, A., Francois, E., Destain, J.P., Guiot, J. & R. Oger. 1988.** Fertilizer nitrogen budget of $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$ and $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ split-applied to winter wheat in micro-plots on a loam soil. Plant and Soil 106: 201-208.
- Schnug, E. 1991.** Das Raps-Handbuch. 5. Aufl. Bad-Homburg: ELANCO, pp. 72-87.
- Small Planet Foods. 2002.** Personal communication. National Organic Standards Board Members. USDA, Washington, DC. 4p.
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D. 1985.** Soil fertility and fertilizers. 4th ed. New York, USA, Macmillan Publishing Company. 754 p. .
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D. & J.L. Havlin. 1993.** Soil fertility and fertilizers. 5th ed. New York, USA, Macmillan Publishing Company. 634 p.
- Utomo, M., Frye, W.W., & R.L. Blevins. 1990.** Sustaining soil nitrogen for corn using hairy vetch cover crop. Madison, Wisconsin, Agronomy Journal 82:979-983.
- Westerman, R.L. editor. 1990.** Soil testing and plant analysis. 3rd ed. Madison, Wisconsin, USA., Soil Science Society of America, Inc. 784 p.