

Les cultures intermédiaires pièges à nitrate (CIPAN) et engrais verts : protection de l'environnement et intérêt agronomique

Jean-Pierre Destain, Véronique Reuter, Jean-Pierre Goffart

Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W). Département Production végétale. Rue du Bordia, 4. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : destain@cra.wallonie.be, goffart@cra.wallonie.be

Au cours du temps, et en relation avec l'évolution de la législation environnementale, la notion d'engrais vert est supplantée par celle de culture intermédiaire piège à nitrate (CIPAN). Les CIPAN (moutarde, phacélie, ray-grass, seigle) ont, au cours de leur culture en automne, une capacité importante de piégeage du nitrate contenu dans le sol (parfois > 100 kg N·ha⁻¹) et limitent ainsi le risque de lixiviation. Cette capacité est propre à chaque espèce, mais également à la phytotechnie qui leur est appliquée, principalement la date de semis. La restitution de cet azote piégé, liée aux caractéristiques physico-chimiques de la biomasse enfouie et mesurée grâce au marquage isotopique ¹⁵N, apparaît toutefois limitée (souvent moins de 45 % de l'azote enfoui) et ne se traduit pas nécessairement par une diminution du conseil de fumure pour la culture suivante. Il n'en reste pas moins qu'un stockage d'azote et de carbone dans le sol est susceptible d'avoir, sur le long terme, un effet bénéfique tant sur la minéralisation naturelle de l'azote que sur le taux d'humus et les propriétés structurales du sol.

Mots-clés. N, culture intermédiaire piège à nitrate, minéralisation, humus, pertes d'azote.

Autumn cover crops and green manures: environment protection and agronomic interest. Due to the evolution of the environmental policy, practice of green manure cropping has been replaced by autumn cover crops in order to take up nitrate residues of the soil. These crops (mustard, phacelia, rye-grass, rye) show a high ability to take up N (sometimes more than 100 kg N·ha⁻¹), leading to a decreasing threat for nitrate leaching. Such an ability is however related to species, but also to cropping practices mainly sowing date. Subsequent mineralization (measured with labeling ¹⁵N technic) of this organic-green manure-N, influenced by physical and chemical characteristics of the ploughed biomass, seems however limited (less than 45% of N ploughed in the soil) and does not lead obviously to a reduction of the N advice for the following crop. Nevertheless, stocking of organic N and C in the soil is expected to have a beneficial long-term effect on both mineralization (providing more N) and soil humus content leading to improve structural properties of soil.

Keywords. N, autumn cover crops, mineralization, humus, N losses.

1. INTRODUCTION

Jusqu'au début des années 1990, lorsqu'une culture intermédiaire était implantée après la culture principale, l'objectif était soit d'enrichir en azote le profil pour la culture suivante, soit de produire un maximum de matière organique afin d'enrichir le sol en humus (Geypens et al., 1995).

Ce n'est qu'avec la préoccupation de satisfaire à la Directive Nitrates, et donc de limiter la lixiviation de nitrate en période d'interculture, que la fonction de piège à nitrate a trouvé toute son importance.

Actuellement, la culture pure de légumineuses comme la vesce a presque entièrement disparu de nos paysages d'automne, pour faire place à des couverts

ne comportant plus de légumineuses ou très peu. De plus, une imposition récente du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) en région wallonne porte sur la proportion minimale des terres qui ne seront ré-emblavées qu'au printemps et qui doivent à l'automne être couvertes par des CIPAN (cultures intermédiaires pièges à nitrate).

Parmi ces cultures, la moutarde est de loin la plus pratiquée, mais on rencontre aussi la phacélie, le ray-grass, l'avoine de printemps, le seigle, etc.

L'objectif de cet article est de répondre à la question : « La CIPAN est-elle aussi efficace dans son rôle de fourniture en éléments fertilisants, et surtout d'azote, que dans sa fonction protection de l'environnement ? »

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les expérimentations reprises dans cet article proviennent de différents travaux qui ont été menés depuis 1990 au Département Production végétale du CRA-W et qui avaient des objectifs multiples :

- situer le niveau de production de biomasse de divers couverts automnaux couramment installés en région wallonne ces 20 dernières années,
- évaluer leur potentialité en termes de prélèvement d'azote dans le profil,
- déterminer leurs caractéristiques chimiques permettant d'en prévoir l'évolution lors de leur enfouissement,
- suivre l'évolution de leur décomposition après enfouissement en ciblant particulièrement le devenir de l'azote (par marquage isotopique ^{15}N) et établir un bilan complet de cet azote.

Ces diverses expérimentations ont été menées au champ en parcelles (min. 5 m x 10 m) et en micro-parcelles (5 m²) pour ce qui concerne le marquage isotopique ^{15}N .

Outre l'évaluation de la quantité de matière sèche aérienne produite par les cultures (MS), on y a déterminé les caractéristiques suivantes : N (total et Kjeldahl), C (méthode Dumas), C/N, taux de cellulose et lignine (suivant Van Soest et al., 1968).

Pour les cultures marquées avec ^{15}N , du $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ enrichi à 5.5 At% ^{15}N a été utilisé. La teneur en azote et l'abondance isotopique des échantillons (végétaux) ont été mesurées par un spectromètre VG SIRA 12, ainsi que par un spectromètre Europa Scientific couplé avec un appareil de Dumas.

Le stockage d'azote de la biomasse dans le sol a été évalué de la même manière tant pour l'azote total que pour les différentes fractions suivant Bremner, 1965.

Le suivi de l'azote minéral (N-NO_3^- et N-NH_4^+) du sol a été réalisé suivant la méthode de Guiot et al. (1992).

Enfin, l'efficacité de fourniture en azote pour la culture suivante a également été évaluée sur base du logiciel AZOBIL (INRA, F) mis au point par Machet et al. (1990) appliqué à de nombreuses situations échantillonnées en vue du conseil de fumure et analysées pour leur contenu en nitrate du sol (Guiot et al., 1992).

3. RÉSULTATS

3.1. Estimation de la production de biomasse et de la quantité d'azote piégée par différents couverts hivernaux

L'estimation de la quantité d'azote piégée peut être effectuée de manière directe ou indirecte. Pour le premier cas, on analyse la biomasse produite par la

CIPAN et son contenu en azote total, ce qui permet d'obtenir une estimation de l'azote contenu dans la partie aérienne et les grosses racines, une partie du système racinaire échappant à cette estimation. Dans le deuxième cas, on compare les contenus en azote minéral d'un profil de sol (couche de 0 à 150 cm) couvert ou non par une CIPAN. Dans ce cas, on ne détermine que la minéralisation nette de l'azote.

Le **tableau 1** donne un aperçu de mesures en azote réalisées fin automne (± 20 novembre) entre 1990 et 2007 pour diverses espèces de cultures intermédiaires semées à des dates préconisées.

Pour la vesce, seule légumineuse expérimentée, alors que le contenu en azote apparaît élevé, son prélèvement d'azote dans le profil du sol apparaît nettement inférieur aux trois CIPAN classiques suivantes, ceci étant bien sûr dû à la fixation symbiotique et au développement racinaire en profondeur plus limité.

Pour la moutarde, la phacélie et le ray-grass, on peut observer une production de biomasse très variable, entraînant une large fourchette de variation du prélèvement d'azote; ceci peut être lié directement à la disponibilité en azote. La méthode indirecte semble restreindre cette fourchette de variation, mais il faut préciser que cette évaluation ne provient pas du même set de données. Il est à remarquer que le seigle peut s'avérer très efficace (94 kg N·ha⁻¹ capté), alors que le potentiel d'un blé d'hiver, même semé tôt début octobre, n'excède pas 40 kg N·ha⁻¹.

Généralement, c'est la moutarde qui rencontre le plus de succès chez les agriculteurs, en particulier en région limoneuse : avant la culture de la betterave, dans deux situations sur trois, une culture de moutarde est implantée. Dans une enquête réalisée annuellement en vue d'établir un conseil moyen de fumure (± 200 situations analysées chaque année), on observe que le profil en azote minéral au printemps est moins sensiblement riche par rapport à une absence de CIPAN, notamment dans des situations où un effluent à action rapide (par exemple, fientes de poules) a été appliqué (**Tableau 2**). De plus, l'azote apparaît plus distribué en profondeur en l'absence de CIPAN.

La production de biomasse et en conséquence le prélèvement d'azote par une CIPAN sont également fortement influencés par sa date de semis, comme le montre clairement le **tableau 3** pour la moutarde. Après début septembre, biomasse et prélèvement d'azote sont fortement réduits. Une étude hollandaise a montré qu'à partir du 1^{er} septembre, la capacité de prélèvement de la moutarde diminue de 2 kg N·ha⁻¹ par jour de report du semis (Vos, 1992). Dans le même ordre d'idée, les travaux de Renard et al. (2007) ont montré qu'après le 20 septembre, seul le seigle (comparé au blé d'hiver et au ray-grass) présentait encore une capacité de prélèvement rapide et prolongée du nitrate dans le sol.

Tableau 1. Production de biomasse sèche totale et prélèvement automnal d'azote par diverses cultures intermédiaires dans la couche de sol de 0 à 1,5 m — *Dry matter production and nitrogen uptake by autumn cover crops in the 0 to 150 cm soil layer.*

CIPAN	Production de biomasse sèche (t MS·ha ⁻¹)	Prélèvement N (mesure de N contenu dans la biomasse) (méthode directe) (kg N·ha ⁻¹)	Prélèvement N minéral (N minéral disparu du profil du sol) (méthode indirecte) (kg N·ha ⁻¹)
Vesce (<i>Vicia faba</i>) culture non CIPAN	4,5 ± 0,4	125	60
Moutarde (<i>Sinapis alba</i>)	3,2 ± 0,4 6,9 ± 0,5 ⁽¹⁾	50 - 170 ⁽²⁾	88 - 114 ⁽³⁾
Phacélie (<i>Phacelia tanacetifolia</i>)	3,5 ± 0,5 8,3 ± 0,5 ⁽¹⁾	50 - 150 ⁽²⁾	78 - 106 ⁽³⁾
Ray-grass (<i>Lolium</i> sp.)	4,5 ± 0,4 8,8 ± 0,3 ⁽¹⁾	70 - 170 ⁽²⁾	56 - 73 ⁽³⁾
Seigle (<i>Secale cereale</i>)	-	-	94 ⁽³⁾
Blé d'hiver (<i>Triticum aestivum</i>)	-	-	35 - 40 ⁽³⁾

⁽¹⁾ La valeur la plus élevée a été observée après application d'une fumure starter de 80 kg N·ha⁻¹ — *Highest value was observed after starter fertilization rate of 80 kg N·ha⁻¹.* Huit expérimentations comportant quatre répétitions ont fourni ces données — *Eight trials with four repetitions provided these data.*

⁽²⁾ Cette valeur varie en fonction de la biomasse produite — *This value has varied depending on the biomass production.*

⁽³⁾ Trois expérimentations en 2007 après précédents pois-haricots-épinards — *Three field trials in 2007 after a succession of pea, bean and spinach.*

Tableau 2. Contenu en azote minéral du sol au printemps avec ou sans CIPAN — *Soil mineral nitrogen content with or without autumn cover crops at springtime.*

Profondeur	Situations avec fientes de volaille appliquées à l'automne (moyenne 4-6 t·ha ⁻¹) (kg N·ha ⁻¹)	
	Avec CIPAN	Sans CIPAN
0 - 30 cm	27	29
30 - 60 cm	37	45
60 - 90 cm	30	99
Total	94	173

Source : Destain et al., 2006 (communication personnelle).

Tableau 3. Influence de la date de semis de la moutarde sur la production de matière sèche et le prélèvement d'azote — *Influence of sowing date of white mustard on dry biomass production and N uptake.*

Date de semis	Production de biomasse (t MS·ha ⁻¹)	Prélèvement d'azote (kg N·ha ⁻¹)
17 août	3,2	50
30 août	2,4	53
13 septembre	0,7	30

Source : Goffart et al., 1997.

3.2. Caractéristiques chimiques de la biomasse azotée produite par l'engrais vert et sa susceptibilité à la minéralisation

Les caractéristiques chimiques déterminantes pour évaluer la susceptibilité à la minéralisation de la biomasse azotée de la CIPAN sont son contenu en N, son rapport C/N et les teneurs en lignine et cellulose (**Tableau 4**).

Les fourchettes de variations sont importantes pour l'ensemble des caractéristiques ; les biomasses avec un C/N élevé ont généralement des taux de cellulose et de lignine élevés. C'est ce que l'on a pu observer lorsqu'on a comparé une moutarde ayant reçu une fumure minérale de 80 kg N·ha⁻¹ à une moutarde n'en ayant pas reçu (**Tableau 5**).

De plus, généralement, ces caractéristiques évoluent au cours du temps et pour la moutarde, implantée très tôt (mi-août), le rapport C/N est souvent supérieur à 20 et le contenu en lignine de plus de 3 % (exprimés sur la matière sèche).

On peut prévoir que la minéralisation de l'azote de la biomasse sera rapide dans le cas où la teneur en azote est élevée et le taux de lignine bas, soit pour des CIPAN « jeunes » ou des vesces. Afin de le vérifier, une expérimentation avec marquage isotopique au ¹⁵N a été réalisée : des engrais verts – CIPAN ont été marqués et enfouis préalablement à une culture de betterave dans des parcelles de 12 m², le taux de minéralisation a été

Tableau 4. Caractéristiques chimiques de divers engrais verts — *Chemical characteristics of different green manures.*

Engrais verts	N (% MS)	C/N	Lignine (% MS)	Cellulose (% MS)
Moutarde	1,63 - 2,82	8 - 27	1,7 - 4,2	15,8 - 23,8
Phacélie	1,44 - 1,85	21 - 23	5,4 - 6,3	19,5 - 26,5
Ray-grass	1,65 - 1,76	20 - 25	1,2 - 2,6	17,2 - 21,3
Vesce	2,42 - 3,6	9 - 11	-	-

Tableau 5. Caractéristiques chimiques d'une moutarde engrais vert — *Chemical characteristics of a mustard green manure.*

Fumure azotée	N	C/N	Lignine	Cellulose
Sans N	2,03	18,9	3,0	23,8
80 kg N·ha ⁻¹	2,39	7,8	1,7	7,1

Source : Ninane et al., 1995.

estimé après la culture de betterave (sur base du bilan, azote présent au départ, azote restant dans le sol et azote exporté par la culture + pertes, **tableau 6**).

Dans cette étude, le lien avec les caractéristiques des biomasses et le potentiel de minéralisation a été difficile à établir, même si la moutarde utilisée présentait un C/N plus faible (12-13) que les deux autres CIPAN (22 en moyenne).

Par ailleurs, la quantité d'azote provenant des CIPAN, prélevée par la culture de betterave (mesurée en octobre à la récolte de celle-ci) s'avère peu élevée (maximum de 45 kg N·ha⁻¹) par rapport à la biomasse enfouie.

Il apparaît donc qu'une proportion généralement majoritaire de l'azote enfoui des CIPAN est récalcitrante à la minéralisation, à l'échelle de l'année d'enfouissement. Grâce au fractionnement de cet azote suivant Bremner (1965), par hydrolyse avec HCl, on distingue trois compartiments :

- **Nsad** fraction d'azote soluble dans l'acide et distillable (constituée de sucres aminés),
- **Nsand** fraction soluble dans l'acide et non distillable (constituée majoritairement d'acides aminés),
- **Nia** fraction insoluble dans l'acide (cycles N complexes, liés aux acides humiques).

Tableau 6. Taux de minéralisation de l'azote prélevé par les CIPAN et prélèvement de cet azote par la culture suivante de betterave — *Mineralization level of nitrogen absorbed by autumn cover crops and adsorption of this nitrogen by the following sugarbeet crop.*

CIPAN	N contenu dans la biomasse (kg N·ha ⁻¹)	C/N	Taux de minéralisation (% de la biomasse enfouie)	Prélèvement par la betterave (kg N·ha ⁻¹)
Moutarde	100 - 170	12 - 13	45 - 57	15 - 45
Phacélie	80 - 150	20 - 23	18 - 28	22 - 31
Ray-grass	70 - 190	19 - 24	22 - 43	26 - 42

Source : Ninane et al., 1995.

Le **tableau 7** donne la répartition dans ces différentes fractions de l'azote résiduaire des trois CIPAN considérées.

Les différences entre les CIPAN apparaissent peu discriminantes et c'est clairement la fraction acides aminés (Nsand) qui prédomine.

4. DISCUSSION

S'il apparaît clairement que la CIPAN est efficace dans sa fonction de prélèvement d'azote, et donc permet de récupérer de l'azote présent dans le profil du sol ou produit par la minéralisation à l'automne, il est évident que cet azote immobilisé est loin d'être restitué intégralement à la culture suivante. De plus, comme l'a montré le **tableau 2**, le contenu en azote minéral du sol au printemps peut être largement plus faible en cas de culture de CIPAN. Cela se confirme notamment

Tableau 7. Répartition de l'azote résiduel dans le sol de trois CIPAN enfouies avant une culture de betterave (mesure à la récolte de la betterave) — *Distribution of residual nitrogen from autumn cover crops turned under before sugar-beet crop (measurement occurs after sugar-beet cropping).*

CIPAN	Nsad	Nsand	Nia
Moutarde	20,7 - 23,2	69,3 - 71,5	7,1 - 7,8
Phacélie	17,7 - 20,9	71,1 - 73,8	8,1 - 8,5
Ray-grass	20,7 - 24,3	66,6 - 71,1	8,2 - 9,1

Source : Geypens et al., 1995 ; Nsad : fraction d'azote soluble dans l'acide et distillable — *acid soluble and distillable nitrogen* ; Nsand : fraction soluble dans l'acide et non distillable — *acid soluble and non distillable nitrogen* ; Nia : fraction insoluble dans l'acide — *acid insoluble nitrogen*.

lorsqu'on examine les données disponibles provenant des vastes enquêtes annuelles d'échantillonnage de sol en vue de l'établissement des conseils moyens de fumure pour la betterave. Le contenu en azote du profil (0-90 cm) avec CIPAN est souvent moins riche au printemps que sans CIPAN. La différence est variable en fonction des apports ou non de matières organiques à l'automne (0 à plus de 60 kg N·ha⁻¹). Le devenir de l'azote piégé par la CIPAN peut être évalué de la manière suivante (**Figure 1**).

Ce schéma apparaît tout à fait en concordance avec ce que proposent les logiciels AZOBIL et AZOFERT (INRA, F), comme adaptation de la fumure, pour tenir compte de l'effet d'un enfouissement d'engrais vert (**Tableau 8**), valeurs établies pour les conditions belges.

L'intérêt de la CIPAN ne se limite cependant pas au piégeage de l'azote, il faut aussi considérer le stockage de matière azotée et carbonée dans le sol. La **figure 1** montre que plus de la moitié de la biomasse azotée est immobilisée, susceptible de se minéraliser au cours du temps (plusieurs années) et donc d'accroître la capacité de fourniture naturelle d'azote par le sol.

Par ailleurs, si, comme dans cet exemple, on considère que 45 kg·ha⁻¹ N sont immobilisés, compte tenu du stade ultime d'évolution de la matière organique dans le sol, et d'un rapport C/N proche de 10, c'est quasi 450 kg·ha⁻¹ C qui sont aussi stockés dans l'humus.

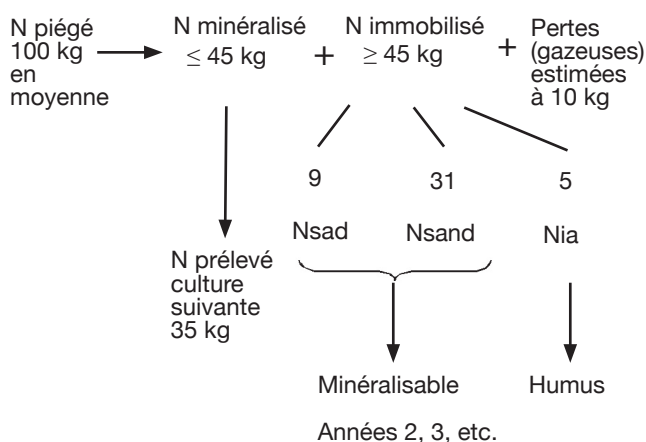


Figure 1. Devenir de l'azote piégé dans la CIPAN — *Fate of nitrogen taken up by the autumn cover crop.*

Enfin, des expérimentations de long terme, avec culture systématique d'engrais verts avant la plante tête de rotation, ont montré que la stabilité structurale était sensiblement améliorée (Destain, 2008, présentation dans le cadre d'une Journée TMCE).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement Véronique Ninane et Sophie Renard, ainsi que l'ensemble des équipes de terrain et de laboratoire du CRA-W qui ont fourni les données.

Bibliographie

- Bremner J.M., 1965. Inorganic forms of nitrogen. In: Black C.A. et al. (eds). *Methods of soil analysis. Part 2*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, 1179-1237.
- Geypens M. & Honnay J., 1995. *Matières organiques dans le sol : conséquences agronomiques et environnementales*. Bruxelles : IRSIA.
- Goffart J.-P., Destain J.-P., Ninane V. & Meeus-Verdinne K., 1997. Gérer l'interculture pour viser une meilleure maîtrise de l'azote. Applications aux cultures intermédiaires. In: *Beheersing van mineralenstromen in de ruwvoederwinning. Studie- en vervolmakingsdag, K.VIV.-Technologisch Instituut, 23/10/1997, Meise, Belgium, 59-70*.
- Guiot J., Goffart J.-P. & Destain J.-P., 1992. Le dosage des nitrates dans le sol. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, **27**(1), 61-74.
- Machet J.-M., Dubrulle P. & Louis P., 1990. AZOBIL: a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method. In: *Proceedings of the 1st Congress of the European Society of Agronomy, Paris, France, 2-21*.
- Ninane V. et al., 1995. Les engrais verts. In: Geypens M. & Honnay J., eds. *Matières organiques dans le sol: conséquences agronomiques et environnementales*. Bruxelles : IRSIA, 67-104.
- Renard S., Goffart J.-P. & Frankinet M., 2007. *Optimisation de l'efficacité de l'azote dans des rotations intégrant les cultures de légumes industriels en Hesbaye*. Namur : Direction Générale de l'Agriculture, Ministère de la Région Wallonne.

Tableau 8. Effet N de l'enfouissement d'une CIPAN (kg N·ha⁻¹) selon les logiciels AZOBIL et AZOFERT* — *Nitrogen effect of autumn cover crop (kg N·ha⁻¹) with AZOBIL and AZOFERT* softwares.*

CIPAN	Production de biomasse très faible (< 1 t MS)	Production de biomasse moyenne (1-3 t MS)	Production de biomasse élevée (> 3 t MS)
Moutarde	20	35	50
Ray-grass	20	35	45

* COMIFER, 2009, communication personnelle.

Van Soest P.J. & Wine R.H., 1968. Determination of lignin and cellulose. *J. Assoc. Off. Agric. Chem.*, **51**, 180.

Vos J., 1992. Growth and nitrogen accumulation of catch crops. In: Francois E., Pithan K. & Bartiaux-Thill N., eds. *Proceedings of the workshop COST 814, Nitrogen*

cycling and leaching in cool and wet regions of Europe, October 22–23, 1992, Gembloux, Belgium, 103-109.

(9 réf.)