

Pertes d'azote par lessivage

Cultures intermédiaires : immédiate et durable

Que penser de l'effet des cultures intermédiaires, du travail du sol ou de la gestion des pailles sur les fuites d'azote par lessivage ? La réponse dans les résultats d'un essai de longue durée conduit pendant une douzaine d'années sur le site de Boigneville (91).

Quelle est l'efficacité relative de différentes techniques culturales pour limiter les pertes d'azote par lessivage sur le long terme ? L'essai dit « environnement » de Boigneville (91) a débuté en 1992 pour répondre à cette question. Ce dispositif de longue durée fait partie d'une série d'essais initiés par ARVALIS-Institut du végétal au début des années 1990 : Thibie dans la Marne (collabo-

ration AREP) et Kerlavic dans le Finistère (collaboration avec les chambres d'agriculture de Bretagne). Il était en effet indispensable de quantifier sur de longues périodes les effets de techniques dont l'efficacité à court terme vis-à-vis de la diminution du lessivage de l'azote avait été démontrée (ITCF, 1995). À ce sujet prévalait l'idée d'un effet de « bombe à retardement » lié à l'accumulation d'azote

sous forme organique dans le sol. Certains prédisaient une reminéralisation « explosive » annulant tout l'effet bénéfique établi sur le court terme. Nous verrons qu'il n'en est rien et que cette crainte était sans fondement.

Trois leviers d'action ont été testés dans cette expérimentation (tableau 1) :

- **la gestion des résidus de culture.** Il y a quinze ans, était évoqué l'intérêt de l'absence



La pose de bougies poreuses permet de recueillir la solution du sol.

de travail du sol après récolte et du maintien des pailles à la surface du sol pour limiter la minéralisation nette de l'azote en période d'interculture. Cette modalité a donc été introduite (traitement 2) comparativement à la pratique de référence qui consistait à enfouir précocement les résidus par le déchaumage (traitement 1).

Descriptif des huit traitements expérimentaux (tab. 1)

n° traitement ⁽¹⁾	Travail sol	Résidus culture	Cipan
1	labour	déchaumage	-
2	labour	mulch ⁽²⁾	-
5	labour	déchaumage	moutarde (destruction mécanique)
6	labour	déchaumage	moutarde (destruction chimique)
7	semis direct	mulch	-
8	semis direct	mulch	moutarde
9	semis direct	mulch	dactyle (jusqu'en 1994), puis moutarde dans l'interculture pois-blé, seigle dans l'interculture blé-orge et orge-pois
10	semis direct	mulch	seigle

(1) les traitements 3 et 4 ont été abandonnés - (2) pailles laissées en surface jusqu'au labour

Huit traitements expérimentaux combinant travail du sol, gestion des pailles et cultures intermédiaires ont été testés pendant 12 ans.

François Laurent
f.laurent@arvalisinstitutduvegetal.fr
Alain Fontaine
ARVALIS – Institut du végétal

Remerciements

Remerciements au personnel technique d'ARVALIS-Institut du végétal pour l'aide à la conduite de cet essai et tout particulièrement à Daniel Couture, Françoise Lancelot et Christian Papin.

une efficacité



• **le régime de travail du sol** : le labour est comparé au semis direct. Cette dernière technique est mise en œuvre pour l'implantation des cultures principales (pois, blé, orge de printemps) et pour les Cipan (cultures intermédiaires piège à nitrate : moutarde, seigle).

• **les cultures intermédiaires piège à nitrate (Cipan)** : pour les traitements concernés, ces cultures ont été implantées systématiquement tous les ans.

Les différentes modalités de ces trois techniques (déchaumage/mulch, labour/semis direct, présence/absence de Cipan). Leurs combinaisons définissent huit traitements expérimentaux appliqués de façon continue entre 1992 et 2004 (tab. 1). La fertilisation azotée du blé et de l'orge de printemps a été ajustée annuellement pour chaque traitement selon la valeur du reliquat d'azote mesuré à la sortie de l'hiver et en fonction de la

Le dispositif expérimental

1

L'essai a débuté en 1991. Il comporte une sole, support d'une rotation pois de printemps – blé – orge de printemps. Tous les résidus de culture sont restitués. Trois techniques différentes étaient mises en œuvre selon différentes modalités pour évaluer leur efficacité vis-à-vis de la limitation des fuites d'azote par lessivage (tableau 1) :

- le travail du sol : les cultures principales et intermédiaires étaient implantées soit après labour, (traitements 1 à 6), soit par semis direct (traitements 7 à 10),
- la gestion des résidus de culture : l'absence de déchaumage pour constituer un mulch de paille jusqu'au semis suivant (traitement 2),
- l'implantation systématique de cultures intermédiaires était testée pour chaque régime de travail du sol. Le semis a été réalisé début septembre et la destruction a eu lieu fin septembre (pour le semis du blé) ou mi-novembre (avant les cultures de printemps), laissant la possibilité de la réalisation du labour d'hiver pour les traitements concernés.



Vue générale du dispositif

La combinaison de ces différentes modalités conduit à huit traitements expérimentaux (avec trois blocs répétition). Chaque parcelle expérimentale mesure 9 m x 48 m et est équipée d'un système de mesure de la concentration de nitrate dans la solution du sol à 90 cm de profondeur. Associées à deux cases lysimétriques extérieures au dispositif, ces bougies poreuses permettent le calcul de la quantité d'azote percolée au-delà de la zone exploitée par les racines (voir encadré 2).

L'essai a été conduit selon ce protocole entre les récoltes 1992 et 2004, soit douze campagnes de mesures.

quantité d'azote minéralisée à partir de la Cipan quand elle est présente. Tous les autres termes du bilan prévisionnel sont supposés identiques (objectif de rendement, minéralisation de l'humus, effet des résidus de culture du précédent).

Un faible drainage, très variable entre années, et peu influencé par les Cipan

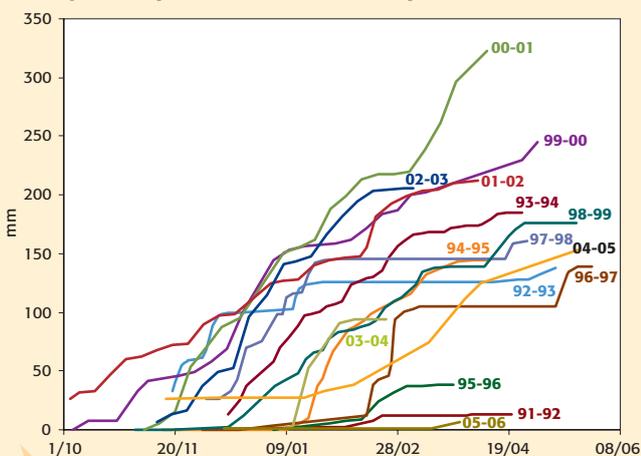
Le contexte climatique du sud du Bassin Parisien a en-

gendré de faibles drainages (en moyenne 170 mm/an pour la période d'étude) et très variables entre années : 40 à 320 mm/an (figure 1).

L'implantation d'une moutarde a peu réduit le volume drainé : 7 mm/an, soit 3 % en moyenne pour les douze années d'étude. Ce constat rejoint celui d'Alexandre (2004) qui montre par simulation avec STICS que la réduction du drainage n'est que de 8 % en moyenne sur

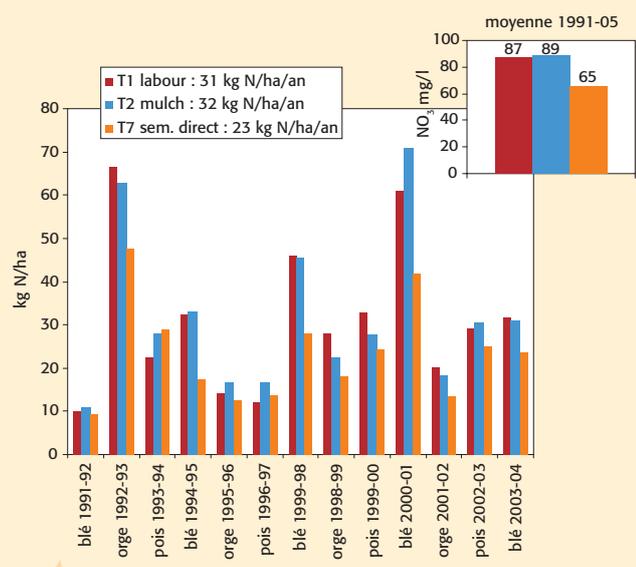
Variabilité interannuelle du drainage observé sur le site de Boigneville (91) (fig. 1)

Case lysimétrique conduite avec sol nu pendant l'interculture



Les niveaux de drainage sont très variables selon les années : 40 à 320 mm/an.

Quantité drainée et concentration moyennes d'azote nitrique dans les eaux de drainage pour les trois traitements sans couverture hivernale du sol par les Cïpan (fig. 2)



Le mulch de paille ne permet pas une réduction du lessivage. L'abandon du labour au profit du semis direct abat la concentration moyenne en nitrate de 25 %.

30 ans. La transpiration par les plantes serait en partie compensée par la réduction de l'évaporation du sol grâce à la présence du couvert végétal.

Sur les quinze dernières années, le début du drainage est rarement observé avant la fin novembre et 80 % du volume total drainé l'est avant la fin février. Les

techniques préventives des pertes d'azote par lessivage doivent donc être aptes à gérer ce risque essentiellement en phase hivernale.

La faiblesse du drainage observé à Boigneville (91) nécessite une gestion fine des flux d'azote pour maîtriser la qualité de l'eau percolée.

Effet de la gestion des pailles et du régime de travail du sol

L'effet de la suppression du déchaumage précoce après la récolte (technique du mulch) a été analysé en comparant les traitements 1 et 2. Cette suppression n'a pas permis de modifier le profil d'azote minéral en début de période de drainage. Ceci est cohérent avec les connaissances acquises : ne pas enfouir les pailles, c'est se priver de ce potentiel précoce de consommation d'azote minéral en surface.

Par contre, le semis direct a affecté le profil d'azote minéral, notamment en profondeur, diminuant ainsi le risque de transfert d'azote par lessivage. Il faut y voir un effet spécifique du travail du sol puisque cette technique implique également le mulchage des pailles en surface, dont on vient de conclure à son inefficacité en régime labour.

La figure 2 compare les valeurs annuelles de lessivage de ces deux traitements (« labour + mulch » et « semis direct ») avec notre « référence » représentée par le traitement 1. La technique « mulch » s'est montrée incapable de diminuer le lessivage hivernal d'azote, alors que l'amélioration fut plus sensible par la suppression du labour : 24 kg N.ha⁻¹.an⁻¹ sous semis direct contre 32 sous labour. Quoi qu'il en soit, les concentrations moyennes de l'eau drainée sous la zone racinaire sont restées élevées, et ceci malgré la gestion rigoureuse de la fertilisation azotée des céréales : 68 à 95 mg NO₃.l⁻¹ selon les traitements considérés. Ces résultats sont conformes à ceux observés dans d'autres dispositifs de même nature, comme celui de Thibie (concentration moyenne de 111 mg NO₃.l⁻¹ sous le traitement « sol nu pendant l'hiver » entre 1992 et 2003).

Les mesures de lessivage

La concentration de nitrate dans la solution du sol a été mesurée sous chaque parcelle expérimentale grâce à un ensemble de sept bougies poreuses, posées sub-horizontalement à 90 cm de profondeur, et qui permettent de recueillir de l'eau en période de drainage (prélèvements de 3 à 5 dates selon les années). Le calcul de la quantité d'azote lessivé dans chaque parcelle est réalisé par multiplication de la concentration moyenne de nitrate par la quantité d'eau drainée. Celle-ci a été mesurée dans deux cases lysimétriques extérieures à l'essai, mais recevant la même succession culturale que celui-ci (avec ou sans culture intermédiaire), et selon la procédure de calcul trapézoïdal (Lord et Sheperd, 1993).

Les cultures intermédiaires : une efficacité incontestable

Les productions de biomasse des cultures intermédiaires ont été variables entre années (tableau 2), voire nulles dans un cas sur quatre. Pour l'essentiel, ces échecs sont dus à des problèmes de levée (sécheresse) ou de phytotoxicité d'herbicides utilisés sur le précédent. Les biomasses produites ont été en moyenne de 1.2 t ms.ha⁻¹ pour la moutarde et 0,8 t ms.ha⁻¹ pour le seigle, correspondant à une absorption d'azote par les parties aériennes de 41 et 22 kg N.ha⁻¹ respectivement.

Malgré le développement limité des couverts, ceux-ci ont néanmoins contribué à réduire les fuites d'azote par lessivage (figure 3). Les quantités d'azote lessivé pour les traitements 5 et 8 sont toutes les intercultures ont fait l'objet d'un semis de Cïpan. Elles ont été très inférieures à celles observées pour le traitement 1 de référence. De ce fait, la concentration



Profil de sol support de l'essai.

moyenne de nitrate dans l'eau drainée sur la durée de l'essai a été réduite de 43 % sous « labour + moutarde » et de 54 % sous « semis direct + moutarde » par rapport au traitement I: la concentration moyenne calculée pour les treize campagnes de drainage sur ces deux traitements était égale ou inférieure à 50 mg NO₃.l⁻¹, seuil au-dessous duquel il est convenu de se situer à l'échelle d'un bassin d'alimentation en eau.

Biomasse et azote absorbé par les cultures intermédiaires au moment de leur destruction (parties aériennes) (tab. 2)													
Biomasse (t MS/ha)													
traitement	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
5	0,80	1,36		1,19	1,36		1,60	1,14	1,31	2,46	0,57	1,12	1,41
6	0,78	1,47		1,12	1,37		1,29	1,12	1,52	2,16	0,59	1,08	1,36
8	0,77	1,37		0,90			0,84	0,97	1,38	1,44	0,48	0,74	1,49
9		0,30		1,19				0,39		1,16	0,30	0,91	1,14
10		0,96		1,27		1,02		0,62	1,04	0,96	0,58	0,95	1,01
N absorbé (kg/ha)													
traitement	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
5	37	44		47	51		69	33	45	50	23	33	56
6	36	47		45	62		57	35	50	47	23	33	54
8	36	36		40			35	33	51	42	18	23	62
9		14		36				11		33	10	22	35
10		25		34		21		14	16	26	20	26	34

fond vert = moutarde, fond orange = seigle, fond bleu = dactyle (semé sous couvert du pois)

L'absence de valeur signifie l'absence de croissance des couverts. Les années sont celles de la date de destruction des Cïpan.

Biomasse moyenne produite : 1,2 t MS/ha pour la moutarde et 0,8 t MS/ha pour le seigle.

Néanmoins, insistons sur deux faits qui nous paraissent importants :

- la teneur en nitrate moyenne annuelle des eaux drainées dépend plus de l'année (facteur 7 entre les extrêmes) que des traitements expérimentaux (facteur 2). On ne peut donc juger l'effi-

cacité de mesures destinées à sauvegarder la qualité de l'eau que sur le long terme.

- il est possible d'atteindre 50 mg NO₃.l⁻¹ dans les eaux drainées sans remettre en cause les systèmes de cultures, mais à condition d'y introduire les cultures intermédiaires. C'est en effet le seul levier ayant démontré une efficacité suffisante. Par ailleurs, tous nos dispositifs expérimentaux de ce type ainsi que les récents travaux de simulation de l'INRA (Lacroix et al., 2005) montrent qu'il est illusoire pour les systèmes de grande culture en vigueur d'espérer une concentration moyenne de nitrate dans les eaux drainées très inférieure à ce seuil. À titre d'exemple, l'implantation d'une culture intermédiaire, pour toutes les intercultures de la rotation betterave - pois - blé dans l'essai de Thibie s'est traduite par une concentration moyenne pendant 12 ans de 52 mg NO₃.l⁻¹ dans les eaux de drainage.

nu en période d'interculture.

L'effet des cultures intermédiaires sur la teneur moyenne en nitrate des eaux drainées est moins sensible pour les traitements 9 et 10 pour lesquels la croissance et le prélèvement d'azote par les Cïpan à base de seigle ont été les plus faibles (tableau 2). Néanmoins, les concentrations moyennes calculées pour ces deux derniers traitements se révèlent déjà largement compatibles avec les objectifs de préservation de la qualité des eaux.

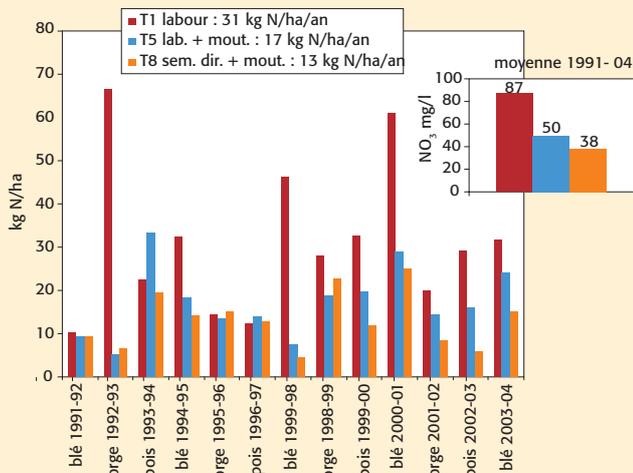
Les cultures intermédiaires : incontournables et rapidement efficaces.

Le rendement des cultures principales

Lorsque le sol était régulièrement labouré, le rendement des cultures n'a pas été significativement modifié par l'introduction des cultures intermédiaires : + 2 % sur la durée de l'essai (figure 4). L'abandon du labour au profit du semis direct (T7) s'est traduit par des chutes de rendement parfois importantes, notamment en nitrate des eaux drainées largement inférieure à celle des traitements avec sol

Quantité drainée et concentration moyennes d'azote nitrrique dans les eaux de drainage pour les deux traitements avec présence de Cïpan (fig. 3)

T5 : labour + moutarde et T8 : semis direct + moutarde), entre 1991 et 1995. Le traitement de référence T1 (labour + sol nu) est le même que celui de la figure 2.



La variabilité du lessivage entre années est supérieure à celle induite par les techniques testées. Les Cïpan démontrent toute leur efficacité en réduisant de plus de la moitié la concentration moyenne du nitrate de l'eau percolée.

Le type de sol

3

L'essai est situé en position de plateau à l'extrémité nord-est de la Beauce. Le

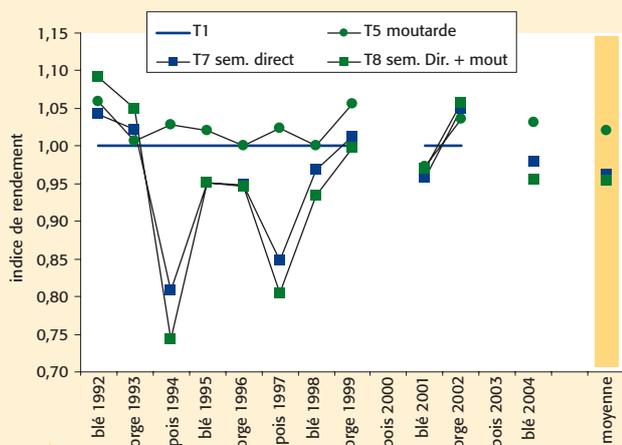
sol est un limon argileux moyennement épais, sain, développé sur un substrat

calcaire qui apparaît entre 60 cm et 100 cm de profondeur.

Caractéristiques physico-chimiques

horizon	argile %	limon fin %	limon grossier %	sable fin %	sable grossier %	CaCO ₃ %	pH _{eau}	CEC cmol.kg ⁻¹	M.O %	C/N
0-25 cm	24,5	28,6	36,3	4,6	2,0	0,3	7,7	18	1,69	8,7
25-50 cm	30,5	27,8	35,0	3,6	1,5	0,6	7,8		0,96	7,6

Indice de rendement des traitements T5, T7 et T8 par rapport au traitement de référence T1 (fig. 4)



Le semis direct a plus particulièrement pénalisé les rendements du pois. La moutarde n'a pas modifié le rendement des cultures en régime de labour continu.

Valeurs moyennes des quantités d'azote lessivé et de la concentration de l'eau drainée (1991-2004) (tab. 3)

traitement	1	2	5	6	7	8	9	10
N lessivé (kg N.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	31 a	32 a	17 bc	17 bc	23 b	13 c	17 bc	19 bc
concentration (mg NO ₃ -l ⁻¹)	87 a	89 a	50 bc	49 bc	65 b	38 c	49 bc	55 bc

(En vert : traitements avec Cipan. Les valeurs suivies de la même lettre a, b, c ne sont pas significativement différentes au seuil 5 %)

Les traitements avec cipan ont conduit à une teneur en nitrate des eaux drainées bien inférieure à celle des traitements avec sol nu en interculture.

La fertilisation azotée du blé et de l'orge de printemps, calculée selon la méthode du bilan, n'a pas été significativement modifiée par l'introduction des Cipan. Ceci est dû à l'effet de compétition pour l'utilisation de l'azote du sol qu'exercent ces dernières à l'encontre des cultures qui leur succèdent.

Retenons que l'implantation de Cipan induit des charges

supplémentaires de 18 €/ha lorsque le sol est labouré et 44 €/ha en semis direct. Une telle différence de charges est imputable aux surcoûts liés à la

Le faisceau de sept bougies poreuses mises en place en début d'essai (1991) et le réseau de tubes capillaires permettant le recueil de la solution du sol.

main-d'œuvre et au produit antilimace (Labreuche *et al.*, 2006).

À retenir

Les trois leviers d'action testés pendant 12 ans dans cet essai permettent d'affirmer que :

- l'absence d'enfouissement précoce des pailles après récolte (technique du mulch) n'a pas permis de limiter les pertes d'azote par lessivage par rapport au traitement de référence. Pour bénéficier au mieux du potentiel d'organisation de l'azote par ces résidus, il est préférable de les incorporer au sol dès que possible après la récolte.
- le semis direct permet de limiter les transferts d'azote par lessivage. La concentration moyenne de nitrate dans les eaux drainées reste néanmoins élevée si on n'implante pas de cultures intermédiaires (Cipan).
- le semis de Cipan s'est révélé une technique dont l'efficacité est immédiate et durable à l'échelle de la période étudiée (tout comme dans les autres dispositifs ARVALIS-Institut du végétal de ce type).

En savoir plus

• Alexandre M. (2002). *Evaluation par simulation avec le modèle Stics des effets environnemental et agronomique des cultures intermédiaires pièges à nitrate*. Mémoire ENSAT, INRA, ITCF, 69 pages et annexes.

• Briffaux G., Aubrion G. (1998). *Cultures intermédiaires : les meilleurs pièges à nitrate*. *Perspectives Agricoles*, 239, 71-75, octobre 1998.

• ITCF (1995). *Azote et interculture*. Dossier *Perspectives Agricoles*, 206, octobre 1995.

• Labreuche J, Laurent F., Moquet M. Protin P.V., Aubrion, G. (2006). *Cultures intermédiaires : la protection des eaux pour un surcoût de 20 à 45 €/ha*. *Perspectives Agricoles*, 321, mars 2006.

• Lacroix A ; Makowski D., Beaudoin N. (2005). *Agricultural water non point pollution control under uncertainty and climate variability*. *Ecological economics* 53(1), 115-127.

• Lord E.I, Sheperd M.A. (1993). *Developments in the use of porous ceramic cups for measuring nitrate leaching*. *J. Soil Science*, 44 : 435-439.

Nous détaillerons dans un prochain numéro les effets azote induits par ces différentes techniques : calendriers de restitution d'azote par les Cipan, bilans d'azote des différents systèmes à long terme. ■

