

La part du sol dans la production intégrée

1. Gestion de la matière organique et bilan humique

J.-A. NEYROUD, Station fédérale de recherches en production végétale de Changins, CH-1260 Nyon

P. SUPCIK, Ecole suisse d'ingénieurs en agriculture, CH-3052 Zollikofen

F. MAGNOLLAY, Service romand de vulgarisation agricole, CH-1000 Lausanne

Résumé

Une des composantes essentielles de la mise en place d'une agriculture durable, respectueuse du milieu environnant, est le maintien dans le sol d'un taux d'humus satisfaisant, capable d'assurer à celui-ci un fonctionnement chimique, physique et biologique irréprochable. En Suisse, la production intégrée poursuit ce but.

Une ancienne méthode française de calcul du bilan humique a été reprise et améliorée pour tenir compte de plusieurs facteurs modifiant le coefficient de minéralisation du carbone organique.

Testée sur quelques essais de longue durée, la méthode s'avère fiable dans des conditions moyennes, mais répond mal lorsque des apports importants de matières organiques produisent une intensification de la minéralisation, lorsque des pratiques de travail mécanique réduisent le sol ralentissent la minéralisation et lorsque le taux d'humus initial du sol ne correspond pas à un taux stabilisé par de nombreuses années de pratiques culturales analogues.

Testée sur un réseau de parcelles pratiquant la production intégrée, la méthode s'avère fiable, sous réserve des remarques ci-dessus. Elle peut également être appliquée sur l'ensemble des terres assolées d'une exploitation dans une année donnée. Certaines précautions doivent néanmoins être prises dans ce dernier cas.

Le bilan humique permet de porter un jugement global sur la gestion de l'humus dans l'exploitation et de proposer des solutions dans les cas où il est déficitaire.

Introduction

Dans le monde entier, les pratiques agricoles évoluent vers une conception plus globale de leur impact sur l'environnement. Ce concept d'«agriculture durable» (*sustainable agriculture*) trouve dans notre pays son application dans la production intégrée, où le principal but recherché en ce qui concerne le sol est le maintien de sa fertilité à long terme.

La matière organique, ou humus du sol, a toujours été considérée comme une composante essentielle de la fertilité; son effet bénéfique est démontrable sur

le plan chimique, physique et biologique. Le maintien d'une teneur suffisante en humus dans les sols est donc une tâche prioritaire de la production intégrée.

En milieu naturel, le carbone est soumis à un cycle, dont les principales phases sont connues. Les plantes assimilent le CO₂ de l'atmosphère et le restituent au sol à leur mort, fournissant ainsi des substrats dégradables par les micro-organismes. Durant leur dégradation, ces substrats, comme également les composés d'origines microbiennes, deviennent de plus en plus résistants et

forment l'humus. Comme l'humus n'est pas totalement résistant à la dégradation, la quantité de carbone présente dans le sol résulte d'un équilibre entre la formation de nouveaux composés (humification) et leur dégradation (minéralisation). Les conditions climatiques et pédologiques orientent cet équilibre vers des taux d'humus caractéristiques de chaque type de sol.

Le milieu cultivé se distingue du milieu naturel par le fait que des récoltes sont exportées, que des engrais organiques et minéraux sont apportés, et que le travail du sol favorise la minéralisation, grâce en particulier à un meilleur accès de l'oxygène à la couche travaillée. Il est donc tout à fait logique qu'un sol cultivé contienne moins de carbone organique que son homologue non cultivé.

Principe du bilan humique

Le bilan humique représente la différence entre les gains annuels en humus apportés par les racines, les chaumes, les résidus de récolte et les engrais organiques et la perte annuelle d'humus par minéralisation du carbone organique. Il s'exprime en kilogrammes par hectare et doit être calculé pour une parcelle sur une durée de plusieurs années – une rotation entière dans le cas idéal.

L'estimation des quantités entrant en jeu s'avère particulièrement ardue. HENIN et DUPUIS (1945) ont les premiers proposé un modèle de calcul: la perte d'humus est estimée en pourcents de l'humus présent (taux de minéralisation), sur la base d'essais de longue

durée sur divers types de sols. Les gains d'humus ont été déterminés en comparant l'effet de divers engrais organiques sur le taux d'humus dans des essais de longue durée. Ce modèle possède plusieurs défauts, dont les principaux sont de prendre en compte des coefficients fixes, indépendants d'autres facteurs comme le type de succession culturale, et de ne considérer qu'un seul compartiment de carbone organique incluant l'humus jeune et l'humus stable.

D'autres modèles d'évolution du carbone et de l'azote organique du sol ont été proposés, qui ne considèrent pas la dégradation de la matière organique dans son ensemble comme une réaction chimique ou biochimique du premier ordre. JENKINSON et RAYNER (1977) classent les matières organiques du sol en fonction de leur période de demi-vie dans le sol. MOREL (1971) considère les taux de minéralisation et de réorganisation de la matière organique dans le sol. ELZEIN et BALESDENT (1995) proposent un modèle de simulation des mouvements et de la dégradation des composés organiques du sol, incluant plusieurs compartiments de carbone de dégradabilités différentes et des apports de carbone en surface et au niveau des racines. L'ensemble des travaux publiés est en général validé sur des sites et avec des pratiques agricoles spécifiques. Des difficultés majeures surviennent lorsque les modèles sont testés dans des conditions différentes de celles de l'expérimentation.

La réflexion sur le bilan humique s'inscrit dans le cadre d'une recherche sur de meilleurs modes de gestion du sol agricole. La maîtrise du pouvoir minéralisateur du carbone et de l'azote du sol conduit à une meilleure utilisation de l'engrais azoté (CAMPBELL *et al.*, 1994).

Le modèle choisi dans notre expérimentation

Nous avons tenté de mettre au point un bilan humique applicable à l'ensemble des terres assolées de notre pays, à l'aide d'un nombre réduit de paramètres de mesure, afin de permettre son application pratique dans une exploitation agricole quelconque. Le modèle adopté reprend dans ses grandes lignes celui de HENIN et DUPUIS (1945) et le complète par des corrections adaptées à la situation de l'exploitation, sur la base d'expériences pratiques constatées à de nombreuses reprises. Il est tout d'abord testé sur quelques essais de longue durée de notre Station de Chan-

gins, puis appliqué à un réseau pilote d'exploitations pratiquant la production intégrée.

Le modèle est construit de la manière suivante:

- recherche du taux minimal souhaitable d'humus
⇒ coefficient brut k_2 de minéralisation
- correction selon le pH du sol
- correction selon le taux de cultures sarclées de la rotation
- correction selon le taux de prairies de la rotation
⇒ coefficient net k_2 de minéralisation
⇒ perte annuelle d'humus
- recensement des apports organiques
⇒ grain annuel en humus
⇒ bilan gain-perte.

☞ Un **taux minimal d'humus souhaitable** doit être fixé pour éviter les distorsions causées par l'application du taux de minéralisation à des quantités excessives ou insuffisantes d'humus dans les sols, qui entraîneraient une péjoration ou une amélioration abusive du bilan. On sait tout d'abord qu'une terre argileuse contient naturellement plus d'humus qu'une terre sableuse; à partir de l'appréciation du taux d'humus en terre assolée proposée dans nos «Données de base pour la fumure des grandes cultures» (RYSER *et al.*, 1994), on calcule le taux d'humus correspondant au minimum de l'appréciation «suffisant» pour des taux d'argile de 10, 20 et 30%; ces trois points définissent la droite du taux minimal d'humus souhaitable Y en fonction du taux d'argile X (%) selon l'équation:

$$Y = 0,53 + 0,065 X \text{ pour } X \geq 10$$

☞ Le **coefficient brut de minéralisation de l'humus**, exprimé en pourcent, dépend aussi du taux d'argile du sol: si des apports organiques équivalents fournissent durant de nombreuses années la même quantité d'humus à un sol riche et à un sol pauvre en argile, il paraît normal que des quantités égales d'humus subissent la minéralisation dans ces deux sols. Il résulte que le coefficient de minéralisation du sol riche en argile, et enrichi en humus comme nous l'avons vu précédemment, doit être plus faible dans le sol argileux que dans le sol sableux. Cette exigence est satisfaite en calculant un *coefficient brut k_2 de minéralisation de l'humus* adapté à la teneur en argile. De nombreux coefficients ont été proposés par plusieurs chercheurs. Nous avons pour notre part choisi: 1,0% pour un sol à 50% d'argile et 1,59% pour un sol

à 5% d'argile. Le coefficient brut Y exprimé en fonction du taux d'argile X (%) devient donc

$$Y = 1,6 - 0,012 X$$

Ce coefficient brut doit être ensuite adapté pour tenir compte de certaines caractéristiques du sol et de l'exploitation agricole. Trois corrections successives sont appliquées:

☐ **Rôle du pH:** il est établi que la minéralisation de l'humus est ralentie en milieu calcaire ou riche en cations Ca^{++} (pH alcalin). Elle l'est aussi en milieu nettement acide, grâce à l'action analogue des ions Al^{+++} , mais nous n'avons pas rencontré de telles terres dans notre étude. Le calcium forme des liaisons stables et résistantes avec l'humus, qui préservent ce dernier de la dégradation rapide. La correction du coefficient brut prend en compte la valeur du pH (H_2O) du sol (X) selon la formule suivante:

$$Y_{\text{corr}} = Y_{\text{brut}} - 0,2(X - 7,0) \text{ pour } X > 7,0$$

☐ **Rôle des cultures sarclées dans la succession culturale:** la présence de betterave et de pomme de terre est liée à un brassage intensif du sol par le passage d'outils de culture et de récolte. C'est pourquoi ces cultures sont appelées sarclées «sensibles» dans notre modèle. Faute d'informations plus précises sur les itinéraires culturaux et l'intensité du travail du sol, nous considérons la part accrue de ces deux cultures dans la rotation comme un facteur accentuant la minéralisation. Une correction du coefficient brut est apportée sous la forme d'une augmentation de 0 à 0,2 pour une proportion de sarclées sensibles (X) variant entre 0 et 40% dans la succession culturale, selon l'équation:

$$Y_{\text{corr}} = Y_{\text{brut}} + 0,005 X$$

☐ **Rôle des prairies temporaires dans la succession culturale:** la prairie temporaire exerce un effet contraire à celui d'une sarclée «sensible» sur le taux de minéralisation. Une correction analogue est donc apportée au coefficient brut, sous la forme d'une réduction de 0 à 0,2 pour une proportion de prairies (X) variant entre 0 et 40% dans la succession culturale, selon l'équation:

$$Y_{\text{corr}} = Y_{\text{brut}} - 0,005 X$$

Au terme des opérations précédentes, le *coefficient net k_2 de minéralisation* est obtenu par la somme arithmétique du coefficient brut et des trois corrections appliquées. Le produit de la masse de terre (4000 t/ha) par le taux d'humus souhaité et le coefficient k_2 net correspond à la perte annuelle (kg humus/ha).

Tableau 1. Contribution des résidus de récolte (racines et chaumes), des parties aériennes des récoltes et des engrais de ferme à la production d'humus. Résultats exprimés en kg humus/ha.

Culture/produit	Humus formé (kg/ha)		
	par les racines et chaumes	par les parties aériennes	Total
Céréales <i>Céréales</i>	350	550	900
Maïs	350	550	900
Colza <i>Raps</i>	550	550	1100
Pomme de terre	200	100	300
Betterave <i>Rüben</i>	200	500	700
Pois <i>Erbesen</i>	350	400	750
Soja	300	200	500
Féverole <i>Bohnen</i>	300	400	700
Tabac	300	200	500
Prairie temporaire <i>Kundweise</i>	800	800	1600
Légumes <i>Gemüse</i>	200	100	300
Engrais vert <i>Gründüngung</i>	-	400	400
Fumier (10 t) <i>Mist</i>	-	-	800
Lisier complet (10 m³) <i>Vollgülle</i>	-	-	250
Purin (10 m³) <i>Wolle/Sauche</i>	-	-	Insignifiant

Les gains en humus sont présentés dans le tableau 1, exprimés en kg d'humus formé par hectare à partir des résidus de récolte (racines, chaumes, etc.), des apports par enfouissement des parties aériennes des récoltes (pailles, etc.) et des apports par les engrais organiques. Ces chiffres sont issus d'une évaluation générale de sources bibliographiques diverses et d'expériences réalisées dans notre station. Ils possèdent par la force des choses un caractère global, tant il est vrai que la quantité de paille n'est pas la même pour toutes les céréales et que les pratiques de fumure azotée jouent un rôle décisif sur les quantités de substrats produites (MOREL, 1989).

Le bilan humique est obtenu par la différence entre les gains et les pertes et s'exprime en kg humus/ha · an.

Validation du modèle sur un premier essai de fertilisation

Dans un essai de longue durée, mis en place en 1975, nous comparons six procédés de fumure organique, combinés à quatre niveaux de fumure minérale azotée, dans un dispositif à quatre répétitions et sur une succession culturale «maïs - blé - orge - colza - avoine - blé». Les procédés organiques comprennent un témoin sans fumure organique à l'exception des pailles de colza et de maïs, un engrais vert semé tous les deux ans avec une fumure minérale de 60 kg N/ha, de la paille laissée sur le

champ chaque année, du fumier de bovin à raison de 35 t/ha dans un procédé et 70 t/ha dans l'autre tous les trois ans, du lisier complet de bovin à raison de 60 m³/ha chaque année.

Le bilan humique annuel, calculé sur trois rotations (18 ans), est présenté dans le tableau 2. Le taux de matière organique atteint, calculé par le bilan humique et mesuré sur trois niveaux de fumure azotée minérale est présenté à la figure 1.

Comme attendu, le bilan est fortement négatif dans le procédé témoin, et à tendance négative dans les procédés engrais vert et paille; il devient fortement positif en relation avec les quantités d'engrais de ferme apportés. Concernant la qualification du bilan, il convient de rappeler les nombreuses simplifications utilisées dans le modèle: on admettra donc qu'un bilan humique est équilibré entre - 200 et + 200 kg humus/ha · an, et qu'il est négatif ou positif au-delà.

Tableau 2. Comparaison de six bilans humiques sur les procédés expérimentaux d'un essai de fumure organique de longue durée entre 1975 et 1993 kg humus/ha. Teneur moyenne initiale du sol en début d'essai: 2,0% = 80 t/ha.

Procédé organique	Gain annuel moyen	Perte annuelle moyenne	Bilan humique annuel	Bilan humique cumulé (18 ans)
Témoin	570	1020	- 450	- 8100
Engrais vert	770	1020	- 250	- 4500
Paille	930	1020	- 90	- 1620
Fumier 35 t/ha	1500	1020	+ 480	+ 8640
Fumier 70 t/ha	2430	1020	+ 1410	+ 25380
Lisier 60 m³/ha	2060	1020	+ 1040	+ 18720

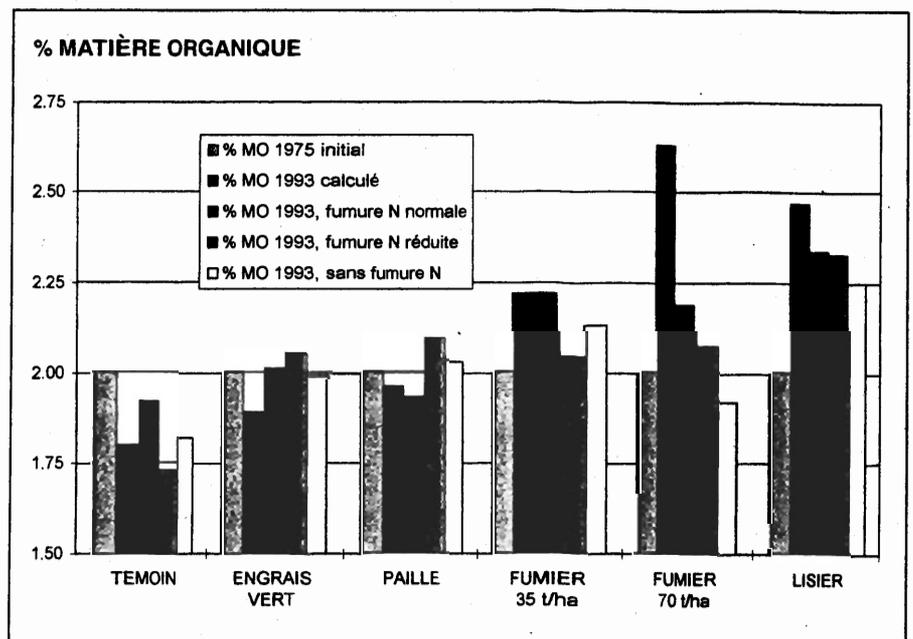


Fig. 1. Incidence des procédés de fertilisation organique dans un essai de longue durée sur les taux d'humus atteints après dix-huit ans. Comparaison entre les taux calculés et les taux réels atteints à divers niveaux de fumure azotée minérale.

L'évaluation du taux d'humus calculé est clairement en relation avec celle du taux mesuré dans le procédé fertilisé selon la norme pour l'azote (fig. 1). Cependant, on observe que le bilan est trop généreux pour les apports d'engrais de ferme. Une telle constatation a déjà été faite par plusieurs auteurs (résumée par exemple par SAUERLANDT et TIETJEN (1970), WELTE et TIMMERMANN (1976), MOREL *et al.* (1981), et VAUGHAN et ORD (1985), selon lesquels des apports copieux d'engrais organiques activent la vie microbienne et augmentent le pouvoir minéralisateur du sol.

Dans le procédé témoin, le bilan calculé prédit une baisse du taux d'humus, car les apports ne compensent pas les pertes par minéralisation; la baisse est vérifiée par les résultats d'analyse. Elle est en outre très nettement aggravée par la réduction de la fumure minérale azotée: en réduisant la dose d'azote, on réduit le rendement et, par conséquent, la quantité de résidus de récolte et de racines.

En résumé, l'application du modèle de bilan humique à notre essai de longue durée présente une bonne conformité avec l'évolution mesurée du taux d'humus dans les procédés proches des pratiques traditionnelles. Lorsque l'on s'écarte de ces pratiques, le bilan humique ne répond plus aussi bien, car il n'intègre pas d'option de minéralisation accrue du carbone en cas d'apport important de substrat, ni d'option de gains réduits d'humus en cas de fertilisation insuffisante.

Validation du modèle sur un second essai de fertilisation

Une parcelle occupée par une prairie permanente depuis de nombreuses années a été labourée en 1962. A cette date, un essai sur l'efficacité de la fumure organique a été mis en place, comprenant un procédé *témoin* sans fumure organique, un procédé d'*enfouissement systématique des résidus* et un procédé avec apport de *fumier* sur une rotation maïs - blé - betterave - blé (MAILLARD et VEZ, 1984).

Le bilan humique a été testé sur ces trois procédés. La figure 2 présente l'évolution du taux d'humus dans le temps. On constate une importante perte d'humus en début d'essai et une stabilisation dès 1972. La minéralisation initiale massive de l'humus s'explique par la modification du système cultural: il est impossible de conserver le taux d'humus correspondant à celui de la prairie dans une terre assolée.

Appliqué à la période 1962-1971, le bilan humique ne parvient pas à rendre compte de l'évolution de l'humus. Par contre, entre 1972 et 1995, le bilan

humique colle à la réalité, comme le confirme le tableau 3.

En résumé, l'application du modèle de bilan humique n'est possible que sur un sol dont le taux d'humus est stabilisé après plusieurs années de pratiques culturales constantes.

Validation du modèle sur un essai de travail du sol

Une portion de la parcelle citée au chapitre précédent a fait l'objet d'un essai de travail du sol, dans lequel on a comparé un procédé laissé en *prairie permanente* à un procédé classique de *labour* et à un procédé de *travail minimal du sol* sur une rotation à dominance céréalière (MAILLARD et VEZ, comm. pers.).

L'évolution du taux d'humus dans les trois procédés a été suivie et les résultats sont présentés à la figure 3. Comme précédemment, on observe l'effet négatif de la mise en culture de la prairie sur le taux d'humus. Plus tard, le travail minimal du sol se traduit clairement par une action protectrice sur l'humus, dont la minéralisation est ralentie par un brassage et une aération du sol réduits.

Tableau 3. Comparaison de trois bilans humiques sur les procédés expérimentaux d'un essai de fumure organique de longue durée, entre 1972 et 1995.

Procédé	Taux d'humus (%)		
	initial mesuré	final mesuré	final calculé
Sans fumure organique	2,70	2,35	2,22
Pailles et collets	2,66	2,55	2,49
Fumier et paille de maïs	2,74	2,65	2,71

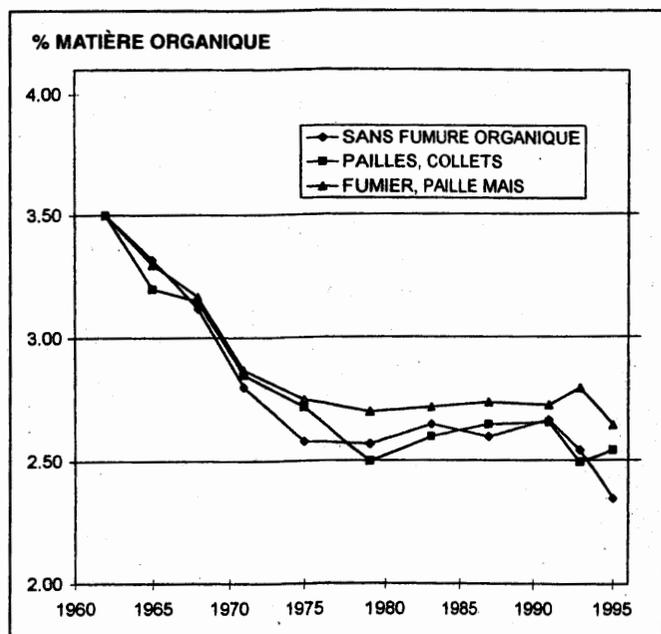


Fig. 2. Evolution du taux d'humus d'un sol après la mise en culture d'une ancienne prairie. Effet de trois pratiques de restitution de matière organique.

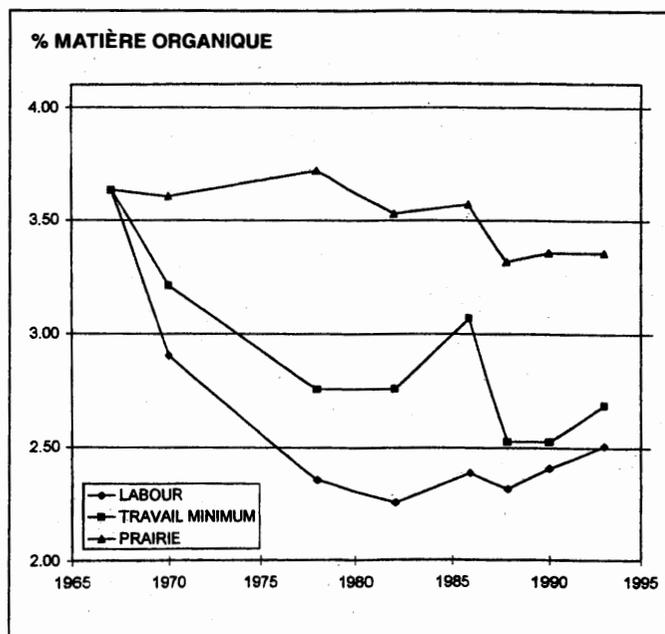


Fig. 3. Evolution du taux d'humus d'un sol après la mise en culture d'une ancienne prairie. Effet de deux modes de travail du sol.

Le modèle de bilan humique utilisé ne rend pas compte de l'intensité du travail du sol: la prise en compte de la proportion de sarclées «sensibles» est constante dans notre cas et le bilan ne tient aucun compte du facteur travail minimal du sol.

La validation de notre modèle de bilan humique dans les trois essais précédemment décrits démontre que le bilan n'est applicable que dans des conditions de pratiques agricoles traditionnelles. Il ne rend compte ni de l'effet de l'accroissement des apports organiques sur le coefficient k_2 de minéralisation, ni de celui de la réduction d'intensité du travail du sol. Il n'est de plus applicable qu'à des pratiques agricoles stabilisées après plusieurs années. Ces restrictions doivent être gardées en mémoire lorsqu'il sera mis en œuvre dans la pratique agricole, où de nombreuses données peuvent faire défaut.

Application du modèle de bilan humique à un réseau d'exploitations pratiquant la production intégrée

Un certain nombre d'agriculteurs ont accepté que les futures recommandations de la production intégrée soient testées sur leurs exploitations avant la mise en place officielle du système. C'est ainsi que nous avons récolté de nombreuses données sur un réseau d'une vingtaine d'exploitations depuis 1988. En ce qui concerne la gestion de l'humus, nous disposons des résultats d'analyse des sols, nous connaissons les cultures mises en place et les quantités d'engrais organiques et minéraux apportés. Il a ainsi été possible de dresser un bilan humique pour chaque parcelle de chacune des exploitations entre 1987 et 1994. Il convient de rappeler ici que les conditions d'application du bilan humique énoncées aux chapitres précédents ne sont pas toujours vérifiables dans la pratique.

□ **Bilan humique sur la rotation et sur l'assolement:** la récolte des données nécessaires, facile à effectuer dans le réseau, s'avère difficile sur une exploitation quelconque: elle requiert en effet la présence de dossiers bien documentés sur toutes les pratiques culturales réalisées durant la période de calcul et comporte une incertitude majeure au sujet des pratiques les plus anciennes. Nous avons donc tenté de remplacer le bilan sur la rotation, dressé sur chaque parcelle durant une succession culturale donnée, par un bilan sur l'assolement, dressé sur l'ensemble des terres assolées de l'exploitation dans une

Tableau 4. Bilans humiques sur huit années des 17 parcelles d'une exploitation choisie.

Parcelle No	% sarclées sensibles	% prairies temporaires	k_2 net (%)	perte/ha ¹ annuelle	gain/ha ¹ annuel	Bilan ¹ humique
1	38	0	1,36	- 1136	1095	- 41
2	25	0	1,32	- 936	1225	289
3	25	13	1,43	- 1022	1096	74
4	25	38	1,07	- 900	1205	305
5	25	25	1,10	- 993	1070	77
6	38	0	1,33	- 1081	1118	37
7	25	25	1,06	- 1007	1154	147
8	25	38	0,98	- 931	1109	178
9	25	25	1,02	- 1007	1113	106
10	25	25	1,13	- 952	1248	296
11	25	25	1,11	- 984	1174	190
12	25	25	1,18	- 859	1220	361
13	38	0	1,35	- 991	1400	409
14	25	38	1,14	- 743	1185	442
15	13	38	0,97	- 862	624	- 238
16	25	25	1,19	- 787	1359	572
17	25	25	1,10	- 945	1008	63
Moyenne pondérée	26	24	1,15	- 928	1163	236

¹ Exprimé en kg humus/ha · an.

année donnée. L'incertitude sur les résultats les plus anciens disparaît, mais est remplacée par une incertitude d'ampleur équivalente: le bilan sur l'assolement postule en effet que toutes les parcelles soient soumises à la même succession culturale et reçoivent les mêmes doses d'engrais organiques, ce qui est loin d'être le cas dans la plupart des exploitations. Dans les paragraphes suivants, les deux types de bilan sont comparés sur une exploitation choisie.

□ **Bilan humique sur la rotation dans une exploitation choisie:** le tableau 4 résume les bilans humiques sur huit ans des 17 parcelles de l'exploitation choisie. Les successions culturales ne sont pas les mêmes dans toutes les parcelles. Chaque parcelle a porté une culture sarclée «sensible» au moins une fois en huit ans, mais plusieurs d'entre elles n'ont pas porté de prairie temporaire dans la période considérée. Les pertes annuelles par hectare varient entre 743 et 1136 kg d'humus, les gains annuels entre 624 et 1400 kg d'humus. Les bilans sont satisfaisants ou excédentaires, à l'exception de celui d'une

parcelle n'ayant pratiquement reçu aucun apport organique. Dans le cas de ce sol lourd, le coefficient k_2 est bas en raison du pH élevé, du taux élevé de prairies temporaires et du taux réduit de sarclées «sensibles» dans la rotation, mais le fait de n'apporter aucun engrais organique et de ne pas enfouir de paille ou d'engrais vert durant huit ans ne permet cependant pas de compenser la perte par minéralisation. Une amélioration du bilan est ici souhaitable pour maintenir la fertilité du sol.

□ **Bilan humique sur l'assolement dans l'exploitation choisie:** les résultats des bilans de 1987 à 1994 sont présentés dans le tableau 5. Sur cette ferme de 28 hectares, dont l'assolement comprend en moyenne 26% de sarclées «sensibles» et 25% de prairies temporaires, on obtient chaque année un bilan humique positif. L'analyse détaillée des chiffres montre des restitutions importantes par le fumier et par une pratique très fréquente de l'engrais vert en interculture.

Si les moyennes calculées sur les rotations et les assolements sont les mêmes,

Tableau 5. Bilans humiques annuels de 1987 à 1994 sur une exploitation choisie.

Année	% sarclées sensibles	% prairies temporaires	k_2 net (%)	perte/ha ¹ annuelle	gain/ha ¹ annuel	Bilan ¹ humique
1987	24	22	1,15	- 926	1023	97
1988	28	23	1,14	- 914	1006	92
1989	29	23	1,17	- 942	1155	212
1990	19	33	1,09	- 880	1305	425
1991	22	29	1,13	- 911	1171	259
1992	32	22	1,19	- 959	1362	403
1993	25	22	1,16	- 930	1099	169
1994	29	23	1,17	- 942	1188	245
Moyenne	26	25	1,15	- 926	1164	238

¹ Exprimé en kg humus/ha · an.

aux arrondis près (tabl. 4 et 5), on observe que les bilans sur les assolements sont très groupés autour de la moyenne, ce qui n'est pas le cas des bilans sur les rotations. La conséquence de cette observation est qu'il convient de prêter une attention particulière à quelques aspects non exprimés du bilan sur l'assolement: les mêmes cultures et les mêmes doses d'engrais reviennent-elles vraiment sur toutes les parcelles?

Validation du bilan sur un réseau d'exploitations pratiquant la production intégrée

Les bilans humiques sur les assolements de 19 exploitations sont présentés dans le tableau 6. Quelques informations complémentaires sur les sols et les exploitations sont également mentionnées. L'exploitation n° 1 possède un bilan nettement déficitaire. Sur cette ferme sans bétail, le coefficient de minéralisation k_2 n'est pas plus élevé qu'ailleurs; il est même relativement bas en raison de l'absence de sarclées sensibles, mais les restitutions de précurseurs d'humus sont insuffisantes. La pratique régulière de l'engrais vert avant les cultures de printemps ne suffit pas à compenser le vide créé par l'exportation des pailles de céréales, qui sont apparemment vendues. L'enfouissement de ces pailles permettrait de redresser le bilan.

Dans les exploitations n°s 2 et 3, également sans bétail, une charge très élevée en sarclées «sensibles» accroît la minéralisation de l'humus. Les bilans sont négatifs malgré l'enfouissement systématique des pailles et la pratique occasionnelle de l'engrais vert.

Quelques autres exploitations possèdent encore un bilan négatif, mais le déficit ne paraît pas excessif, compte tenu des nombreuses estimations participant au calcul. Selon notre modèle de calcul, la plupart des exploitations sans bétail doivent vouer un soin particulier à l'équilibre du bilan humique.

Du point de vue de la gestion de l'humus, les bilans équilibrés et excédentaires ne posent pas de problèmes particuliers.

Discussion et conclusion

Le modèle de calcul du bilan humique a été appliqué à quelques essais de longue durée et à des cas tirés de la pratique.

Les tests successifs de validation ont mis en évidence les difficultés d'intégration de tous les cas particuliers dans le modèle. Si certaines corrections, comme la prise en compte de l'intensité du travail du sol, sont faciles à apporter dans des dispositifs expérimentaux en place et bien documentés, leur application dans la pratique se heurte à l'obstacle du dé-

faut d'informations fiables. Cette remarque est également valable lorsque l'on dresse un bilan humique sur l'assolement d'une année donnée, en lieu et place de bilans spécifiques pour chaque parcelle sur une succession culturale de plusieurs années: le choix réside entre l'incertitude des données les plus anciennes des rotations et la simplification abusive consistant à admettre que toutes les parcelles d'une exploitation sont cultivées de manière uniforme! Le bilan doit impérativement être validé par quelques vérifications complémentaires, dont les principales sont:

☞ *Le bilan sur l'assolement ne doit pas occulter des disparités importantes entre les parcelles individuelles.*

☞ *Dans l'année choisie pour dresser le bilan sur l'assolement, les cultures en place, les achats et ventes de précurseurs d'humus doivent différer le moins possible par rapport aux années précédentes.*

☞ *Les apports d'engrais de ferme doivent être estimés correctement. Ils doivent correspondre à la quantité de bétail présente sur l'exploitation et être également répartis sur toutes les parcelles.*

☞ *Le recours fréquent aux pratiques de travail minimal du sol dans une exploitation peut avoir pour conséquence*

Tableau 6. Synthèse des calculs de bilan humique effectués en 1994 sur 19 exploitations.

N°	Surface (ha)	Sarclées sensibles (%)	Prairies temporaires (%)	Coeff. k_2 net	Bilan (kg/ha · an)	Appréciation du bilan	Remarques
1	35	0	0	1,15	-345	Très négatif	Ferme sans bétail, pailles non enfouies. Amélioration possible: + 235 kg
2	21	43	0	1,43	-295	Négatif	Ferme sans bétail, peu d'engrais vert. Amélioration possible: + 110 kg
3	31	39	0	1,45	-227	Négatif	Ferme sans bétail, négatif malgré l'enfouissement de pailles et engrais vert
4	24	9	24	1,18	-161	Équilibré	Ferme sans bétail, équilibré par enfouissement de pailles, trèfle et jachère
5	67	0	0	1,23	-160	Équilibré	Ferme sans bétail, pailles et engrais vert enfouis
6	19	13	0	1,32	-107	Équilibré	Ferme sans bétail, toutes pailles enfouies
7	25	17	0	1,39	-81	Équilibré	-
8	46	0	11	1,17	+77	Équilibré	Ferme sans bétail, pailles, jachère et engrais vert enfouis
9	20	0	20	1,13	+85	Équilibré	-
10	34	17	0	1,35	+96	Équilibré	-
11	16	16	31	1,26	+275	Positif	-
12	30	28	22	1,15	+278	Positif	Sols très alcalins (= minéralisation réduite)
13	19	11	3	1,26	+283	Positif	Enfouissement de pailles fréquent
14	33	21	13	1,45	+333	Très positif	Importants apports de fumier, engrais vert fréquents
15	36	21	37	1,34	+342	Très positif	Importants apports de fumier
16	26	16	7	1,43	+418	Très positif	Enfouissement de pailles, boues et engrais vert. Peu de fumier
17	26	32	0	1,42	+545	Très positif	Sols légers et alcalins
18	16	34	32	1,30	+792	Très positif	Très importants apports de fumier
19	34	13	10	1,35	+844	Très positif	Très importants apports de fumier et d'engrais vert

une diminution du taux de minéralisation de l'humus. Cette diminution n'est pas prise en compte dans notre modèle du bilan humique. Par conséquent, le bilan humique négatif d'une exploitation de ce type sera jugé un peu moins sévèrement.

☞ En cas de bilan humique fortement excédentaire, une réflexion sur le risque de perte en éléments fertilisants est indispensable. La valeur fertilisante des produits organiques apportés au sol doit impérativement être prise en compte dans le plan de fumure.

Une fois ces contrôles réalisés, le bilan humique s'avère un excellent outil de diagnostic de la gestion de la matière organique dans une exploitation.

Remerciements

Ce travail n'aurait pas été possible sans la collaboration active de nos collègues VEZ et MAILLARD, qui ont assuré la réalisation des essais de Changins, et de MM. PILET et PITTET, qui ont assuré le traitement informatique des données au SRVA.

Bibliographie

- CAMPBELL C. A., JAME Y. W. and AKINREMI O., 1994. Evaluating potential nitrogen mineralization for predicting fertilizer nitrogen requirement of long-term field experiments. In: Soil testing: prospects for improving nutrient recommendations. Spec. publ. n° 40, Soil Sci. Soc. Amer. J., Madison, USA.
- ELZEIN A. and BALESSENT J., 1995. Mechanistic simulation of vertical distribution of carbon concentrations and residence times in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 59, 1328-1335.
- HENIN S. et DUPUIS M., 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agron.* 3, 17-29.
- JENKINSON D. S. and RAYNER J. H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.* 123 (5), 298-305.
- MAILLARD A. et VEZ A., 1984. Bilan d'un essai sans fumure organique depuis 20 ans. *Revue suisse Agric.* 16, 135-139.
- MOREL R., 1971. Evolution dans le temps de la quantité d'azote organique du sol. *Science du Sol* 1, 121-129.
- MOREL R., 1989. Les sols cultivés. TEC.DOC Lavoisier, Paris, 310-331.
- MOREL R., CHABOUIS C. et BOURGEOIS S., 1981. Evolution des taux d'azote et de carbone organiques dans un sol nu après 15 ans d'enfouissement de paille sous différentes conditions. *Agronomie* 1 (1), 7-17.
- RYSER J. P., WALTHER U., MENZI H. et al., 1994. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages. *Revue suisse Agric.* 26 (4), 193-242.
- SAUERLANDT W. und TIETJEN C., 1970. Humuswirtschaft des Ackerbaues. DLG-Verlag, Frankfurt (Main), 239 p.
- VAUGHAN D. and ORD B. G., 1985. Soil organic matter. - A perspective in its nature, extraction, turnover and role in soil fertility. In: Soil organic matter and biological activity. Vaughan and Malcolm Ed., Aberdeen U.K., 1-35.
- WELTE E. et TIMMERMANN G., 1976. Fertilité du sol et bilan de l'azote dans l'essai permanent de fumure «ewiger Roggenbau» à Halle. *Ann. Agron.* 27, 721-742.

Zusammenfassung

Der Stellenwert des Bodens in der integrierten Produktion

1. Humusbewirtschaftung und Humusbilanz

Ein angemessener Humusgehalt des Bodens leistet einen wichtigen Beitrag zur Erreichung einer nachhaltigen Landwirtschaft. In der Schweiz ist die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ein Bestandteil der integrierten Produktion. Zur Berechnung des Humushaushalts eines Bodens wird ein neues Modell der Humusbilanz vorgestellt. Es baut auf einem älteren linearen Modell auf, welches durch entsprechende Korrekturen verbessert wurde. Drei Langzeitversuche im Felde gestatten es, das Modell zu prüfen. Die Anwendung liefert im Allgemeinen relativ gute Resultate, befriedigt aber nicht in allen Sonderfällen.

Der Mineralisationskoeffizient bleibt bei grosser Zufuhr von C zu niedrig und entspricht nicht dem realen Humusgehalt des Bodens. Auch wird die Auswirkung der reduzierten Bodenbearbeitung ungenügend berücksichtigt. Das Modell darf nur in Situationen eingesetzt werden, wo sich der Humusgehalt dank mehrjähriger gleicher Bewirtschaftung stabilisiert hat.

Das Modell der Humusbilanz wird auf einigen IP Betrieben angewendet. Die Bilanz kann für die Fruchtfolge jeder Parzelle, wie auch für alle Kulturen eines bestimmten Jahres kalkuliert werden. Das Modell erweist sich als gutes Hilfsmittel zur Humusbewirtschaftung eines Betriebes. Allfällige Unsicherheiten bei dessen Handhabung können nach Rücksprache mit dem Betriebsleiter geklärt werden.

Summary

The soil's part in integrated production

1. Organic matter management and humus balance

An appropriate humus content of the soil is a pre-requisite to the achievement of sustainable agricultural practices. An old linear model for the calculation of the humus balance in a soil has been completed with the inclusion of some correcting factors for specific soil properties and agricultural practices. The model is validated on three long standing field trials, and proves efficient in standard situations, but does not take some specific agricultural practices into consideration. The evaluation of the humus mineralization in the case of heavy organic fertilizations is unsatisfactory, as well as the evaluation of the effect of reduced soil tillage practices.

The model is also tested on several farms practising integrated production. The humus balance can be calculated on the crop rotation of each field, or on the crops cultivated in a single year. Several uncertainties may be resolved after a short discussion with the farmer. The humus balance model appears to be an efficient tool to evaluate the sustainability of the humus management in a farm.

Riassunto

La parte del suolo nella produzione integrata

1. Gestione della materia organica e bilancio umico

Uno dei parametri essenziali per un'agricoltura duratura, rispettosa del suo ambiente è il mantenimento nel suolo di un livello di humus soddisfacente, capace di assicurare il suo funzionamento chimico, fisico e biologico in modo irreversibile. In Svizzera la produzione integrata persegue questo scopo. Un metodo semplice di calcolo del bilancio umico, basato sull'ipotesi di reazione chimica di prim'ordine, è stato ripreso e migliorato per tenere conto di molti fattori che modificano il coefficiente di mineralizzazione del carbonio organico.

Testato su alcune prove di lunga durata, il modello si avvera affidabile in condizioni medie, ma risponde male quando degli apporti importanti di sostanza organica producono un'intensificazione della mineralizzazione, quando delle pratiche di lavorazione del terreno ridotte rallentano la mineralizzazione e quando il livello dell'umico iniziale del terreno non corrisponde più ad un tasso stabilizzato da numerosi anni di pratiche colturali analoghe.

Testato su una rete di parcelle praticanti la Produzione Integrata, il modello si avvera affidabile, a parte le riserve sopra esposte. Esso può venire ugualmente calcolato per un'annata sull'insieme delle terre arate di un'azienda. Alcune precauzioni devono pertanto essere prese in questo caso. Il bilancio umico permette di portare un giudizio globale sulla gestione dell'umico nell'azienda e di proporre delle soluzioni nel caso sia deficitario.