



La part du sol dans la production intégrée

4. Nouvelles observations sur la reproductibilité des résultats d'analyses de sol

J.-A. NEYROUD, Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil, ACW, CP 1012, 1260 Nyon 1
P. LISCHER, ConStat Consulting, 3059 Berne
A. ZIMMERMANN¹, Agridea, CP 128, 1000 Lausanne 6

 E-mail: jean-auguste.neyroud@acw.admin.ch
Tél. (+41) 22 36 34 656.

Résumé

Sur un réseau d'environ 800 parcelles de grandes cultures, les propriétés stables et variables des sols ont été suivies durant dix-sept ans, dans le cadre de la production intégrée (prestations écologiques requises, PER). La répétition de l'analyse à une fréquence d'environ cinq ans montre la nature hétérogène du sol, illustrée par la fluctuation du taux d'argile et de la capacité d'échange de cations (CEC), paramètres réputés stables en l'espace d'une génération. L'analyse détecte avec certitude des différences de 3-4% d'argile, 3,0 cmol⁺/kg de CEC, huit points de taux de saturation, 0,4% de matière organique, 0,4 unité de pH, six indices P-CO₂, 1,8 mg K-CO₂, 4,3 mg Mg-CaCl₂, 30 mg de P-AAEDTA et 70 mg de K ou de Mg-AAEDTA. En raison de ces seuils élevés de détection et des incertitudes accompagnant le prélèvement et l'analyse des échantillons, les fluctuations observées sur les propriétés variables du sol sont pour l'heure trop faibles pour porter un jugement sur les effets des exigences PER sur la qualité des sols et la durabilité des pratiques. Il est néanmoins possible de conclure que le respect des exigences PER, combiné à la qualification professionnelle des exploitants, maintient les sols à leurs niveaux actuels de fertilité. Par ailleurs, la réduction massive des apports d'engrais PK du commerce n'a pas affecté les niveaux de fertilité P et K à ce jour.

tées. Les mesures des propriétés dites «stables» du sol (texture, matière organique, pH) montraient une reproductibilité limitée et une marge d'erreur admissible dans l'interprétation. Les valeurs des propriétés dites «variables» du sol (teneurs en fertilisants P, K et Mg disponibles) étaient un peu moins reproductibles mais ne subissaient pas de trop grandes fluctuations. Cela pouvait être expliqué soit par le respect généralisé des recommandations de fumure, soit par la lenteur de la réaction du sol à des pratiques de fumure devenues plus restrictives dans le cadre des PER.

A l'achèvement d'une première phase d'étude de notre réseau, il est apparu nécessaire d'évaluer l'ensemble des résultats d'analyse afin de trouver en quoi dix-sept années de pratiques de production intégrée sur le réseau étudié ont modifié les sols et contribué au maintien de leur fertilité. Cet article porte sur les propriétés des sols et les fluctuations de leurs niveaux d'enrichissement en phosphore, potassium et magnésium; il sera suivi d'une communication sur la relation entre les fumures pratiquées, les rendements obtenus et l'évolution des propriétés des sols.

Introduction

Dans une précédente communication (Neyroud et Magnollay, 1999), nous avons étudié la reproductibilité des résultats d'analyses périodiques des sols au cours des premières années de fonctionnement d'un réseau d'exploitations agricoles de Suisse romande et du Tessin. Des analyses périodiques de sol sont en effet prescrites dans le catalogue des prestations écologiques requises (PER) donnant droit à des contributions finan-

cières pour une gestion respectueuse du milieu (Anonyme, 2006).

La nature hétérogène du sol est connue depuis longtemps (Neyroud et Zuodar, 1981). De plus, des erreurs peuvent intervenir dans le choix précis du site, l'époque, le mode et la profondeur de prélèvement, la confection de l'échantillon à analyser, l'analyse proprement dite, la transcription du résultat, etc., et déboucher sur des résultats d'analyse différents des résultats précédents.

La communication de Neyroud et Magnollay (1999) portait sur la répétabilité des analyses dans un intervalle de moins de dix ans entre analyses répé-

Matériel et méthodes

Une quarantaine d'exploitations comprenant plus de 800 parcelles forment le réseau d'exploitations pilote considéré. Ces chiffres ne sont pas restés constants durant les dix-sept années sous revue, tant il est vrai que l'agriculture a évolué, que les générations ont parfois changé et que l'utilisation des

¹Adresse actuelle: Agri-Genève, rue des Sablières 15, 1217 Meyrin.

sols s'est modifiée. Les exploitants ne subissant aucune contrainte liée au réseau, des modifications de mode d'exploitation des terres sont parfois intervenues, de sorte que la fréquence et l'intervalle entre les analyses n'ont pas été strictement maintenus; le présent réseau d'observation est donc beaucoup plus proche de la réalité agricole du terrain que d'essais en conditions contrôlées. Du point de vue de l'exploitation statistique des données, l'incertitude liée aux résultats est un peu supérieure à celle que l'on obtiendrait sur un réseau d'essais en conditions contrôlées.

Les prélèvements d'échantillons de sol ont été effectués par les agriculteurs selon nos recommandations de choix précis du site, de l'époque, du mode et de la profondeur de prélèvement ainsi que de la confection de l'échantillon à analyser. Les analyses ont été exécutées selon les méthodes officielles (Anonyme, 2004). Elles portent sur la texture (argile, silt, sable), la matière organique (MO), le pH, la CEC et le taux de saturation, et enfin sur les teneurs en éléments nutritifs P, K et Mg «disponibles» et «de réserve» selon la terminologie usuelle. L'analyse de la CEC n'a été effectuée que sur un nombre limité d'échantillons. La durée de notre étude a couvert la période du passage des analyses des éléments «disponibles» aux analyses des éléments «de réserve»: cela a malheureusement pour conséquence que nous disposons d'un moins grand nombre de résultats d'analyses répétées des éléments P, K et Mg «de réserve».

Résultats

Propriétés stables des sols

Texture

En toute logique, une seule analyse de texture est suffisante car aucune modification n'est attendue sur la durée d'une génération d'exploitants. La réalité du terrain conduit cependant parfois l'exploitant à fractionner des soles et à répéter certaines analyses. Nous avons encouragé cette pratique dans le but de mieux définir l'incertitude liée à l'emplacement exact de l'aire de pré-

lèvement. De nombreux travaux montrent en effet que des analyses effectuées dans un laboratoire accrédité et des instructions strictes de prélèvement/conditionnement des échantillons réduisent grandement les possibles sources d'autres erreurs, de sorte que la localisation exacte de l'aire de prélèvement devient la principale variable explicative des différences enregistrées.

La relation entre les teneurs en argile obtenues sur 563 paires de textures provenant de mêmes parcelles est présentée dans la figure 1. Le coefficient de corrélation entre deux mesures est de 0,91. La reproductibilité des résultats d'analyses de silt et de sable est moins bonne que pour les analyses d'argile. Cela s'explique en partie par le fait que la séparation entre silt et sable est délicate en laboratoire et que la teneur en sable est calculée par déduction (argile + silt + sable = 100%). Comme l'attention de l'agronome et du conseiller en fumure se porte avant tout sur le taux d'argile, l'incertitude sur les taux de silt et de sable a moins de conséquences pratiques. La figure 2 montre les distributions de fréquence des différences enregistrées entre deux dosages d'argile, de silt et de sable. Sous cet angle également, le résultat est plus satisfaisant pour l'argile que pour les deux autres fractions et confirme que la difficulté de séparation entre ces deux fractions durant l'analyse au laboratoire est la principale cause des différences observées.

Huitante-trois pour cent des différences observées à quelques années d'intervalle entre deux résultats d'analyse du taux d'argile de la même parcelle sont inférieures à 4%; un écart de cet ordre correspond à la fourchette de teneur en argile (5%) des groupes texturaux définis dans les données de base pour la fumure (Ryser *et al.*, 2001). Les teneurs moyennes en argile, silt et sable des horizons de surface des terres de notre

réseau sont de 20, 38 et 41% (chiffres arrondis); les médianes correspondantes sont 19, 37 et 42%. L'analyse de la texture du sol selon la méthode recommandée doit donc être considérée comme fiable dans les conditions usuelles de la pratique. Par contre, le test tactile, souvent présenté comme alternative à l'analyse, est loin de présenter les mêmes garanties.

Ces nouvelles comparaisons de textures confirment celles décrites dans notre précédente communication.

Matière organique

Neyroud et Magnollay (1999) signalaient que 70% des différences entre les résultats d'analyses de matière organique (MO) répétées étaient inférieures à 0,5% de MO, 80% inférieures à 0,6% et 90% inférieures à 1,15%. Ces différences, plus importantes que l'hypothèse d'une évolution modérée des taux ne le laisse prévoir, s'expliquent vraisemblablement par la prise en compte de résultats anciens, moins fiables, d'autant des années 70 et 80. L'évaluation après dix-sept années de pratiques intégrées réduit notablement la marge d'incertitude par rapport à cette première évaluation: 70% des différences entre résultats d'analyses répétées sont maintenant inférieures à 0,3%, 80% inférieures à 0,5% et 90% inférieures à 1,0% de MO. Ces différences restent cependant importantes; en effet, de nombreux essais de longue durée à l'étranger (Paustian *et al.*, 1995) et à Changins (Vullioud *et al.*, 2006a et b) témoignent de la lenteur de la réaction du taux de MO aux changements de mode d'entretien du sol (rotation, travail du sol, amendements organiques, etc.). Les modifications de taux de MO observées dans de nombreux sols de notre réseau s'expliquent selon toute probabilité par la difficulté d'un prélèvement irréprochable, exempt de résidus végé-

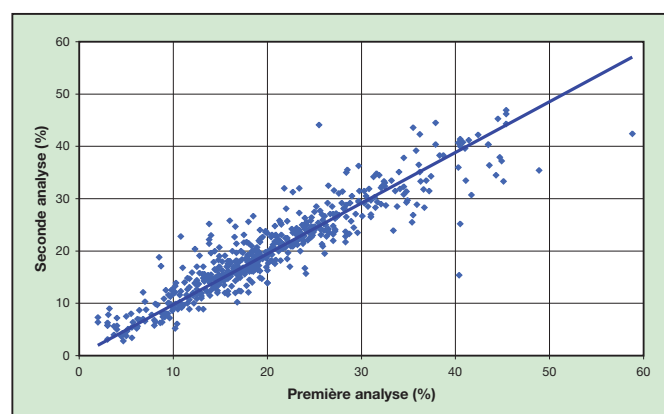


Fig. 1. Relation entre deux mesures consécutives (\pm 5 ans) des taux d'argile ($r = 0,91$, $n = 563$ paires de mesures).

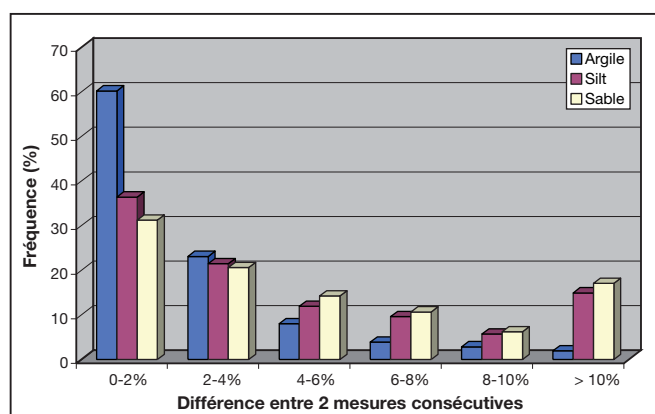


Fig. 2. Distribution de fréquences des différences absolues entre deux mesures consécutives (\pm 5 ans) de la texture ($n = 563$ paires de mesures).

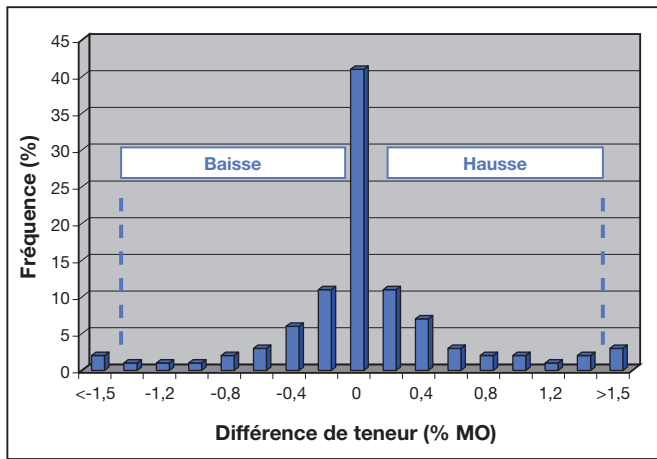


Fig. 3. Distribution de fréquences des différences entre deux mesures consécutives (+/- 5 ans) du taux de matière organique (MO) du sol (n = 1214 paires de mesures).

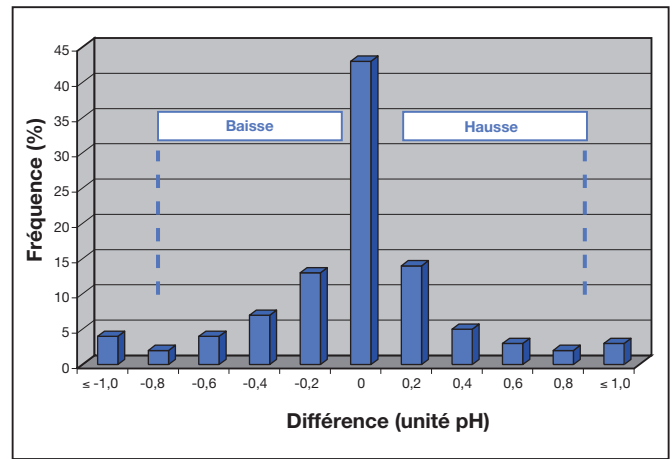


Fig. 4. Distribution de fréquences des différences entre deux mesures consécutives (+/- 5 ans) du pH du sol (n = 1357 paires de mesures).

taux, racines ou organismes vivants (Neyroud *et al.*, 1997). Tous ces substrats sont distincts de l'humus proprement dit, car susceptibles d'être rapidement dégradés dans le sol. La difficulté de dosage du seul carbone de l'humus est reconnue.

La comparaison des résultats et des dates d'analyse indique si le sol a subi une augmentation ou un abaissement de son taux de MO. La distribution de fréquence des différences observées entre mesures consécutives est présentée dans la figure 3. Les plus fortes différences sont peu vraisemblables et procèdent probablement d'erreurs sur l'emplacement de la parcelle ou durant le cheminement de l'échantillon (6% des cas). Le taux de MO n'a pas varié (+/- 0,1%) dans 41% des 1214 paires de mesures répétées. 338 parcelles (28%) ont vu leur teneur en MO s'abaisser et 307 parcelles (25%) leur teneur en MO s'élever; en moyenne, le taux de MO s'est abaissé de 0,02%. La symétrie entre gains et pertes en MO se reflète visuellement dans la figure 3. La teneur moyenne en MO des horizons de surface des terres du réseau est de 2,78% et la médiane se situe à 2,80%.

L'hétérogénéité du sol de même que la complexité du prélèvement et de l'analyse de la MO restent les principales variables explicatives des différences

observées; elles rendent difficile le diagnostic sur l'évolution temporelle des taux en dix-sept ans dans notre réseau. Desales *et al.* (2004) ont montré de manière analogue que les teneurs en métaux lourds des 100 sols du réseau suisse NABO, analysées à une fréquence de cinq ans, présentent des fluctuations telles que plusieurs analyses consécutives sont indispensables avant toute estimation de la tendance d'évolution («trend») des taux.

S'agissant d'identifier une parcelle, le taux de MO est un indicateur moins fiable que le taux d'argile: une même parcelle peut présenter une différence de 0,4% de MO entre deux dosages séparés de quelques années. S'agissant de détecter une évolution de ce même taux, l'incertitude liée au prélèvement masque les éventuelles tendances. Elle complique également l'interprétation du bilan humique (Mayer et Neyroud, 2005).

Une augmentation des taux de MO des sols du réseau étudié, liée à l'introduction de la production intégrée, ne peut donc pas être mise en évidence. Il convient de préciser que les pratiques intégrées ne devraient pas faire monter les taux de MO de sols déjà convenablement pourvus, sauf dans les situations où la part de prairies temporaires dans l'assolement a notablement augmenté.

pH

Les observations sur les fluctuations des valeurs du pH (mesuré dans l'eau, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) sont semblables à celles faites sur le taux de MO (fig. 4). Nos calculs ne prennent pas en compte le fait que la valeur pH est en réalité une expression logarithmique de la concentration du ion H^+ dans l'eau du sol; cette omission prête peu à conséquence, puisque seules les différences enregistrées lors de mesures consécutives sur les mêmes parcelles sont considérées ici.

Septante pour cent des 1357 comparaisons montrent des différences de pH inférieures ou égales à 0,3 unité pH, 82% à 0,5 et 89% à 0,7 unité pH. Les différences les plus élevées sont peu vraisemblables et résultent probablement d'erreurs dans le processus de prélèvement et d'analyse. Aucune tendance d'évolution dans le temps n'est visible car les cas de baisse de pH tendent à équilibrer les cas de hausse. Nous nous sommes demandé dans quelle gamme de pH se retrouvaient les écarts les plus importants; le tableau 1 montre les distributions de fréquences des écarts de pH dans quatre groupes de valeurs pH croissantes: on observe que les plus grands écarts (au-delà de +/- 0,4 unité pH) correspondent à des élévations de pH dans des sols initiale-

Tableau 1. Distribution de fréquence des écarts de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ entre deux dosages séparés de quelques années dans quatre groupes de valeurs croissantes de pH (n = 1357 paires).

Groupe de pH initial	Nombre de cas	Ecart de pH (valeur récente moins valeur ancienne)							TOTAL
		< -0,5	de -0,4 à -0,5	de -0,2 à -0,3	de -0,1 à 0,1	de 0,2 à 0,3	de 0,4 à 0,5	> 0,5	
< 6,0	178	0	0	4	54	12	8	22	100
6,0-6,9	401	3	7	9	53	8	8	12	100
7,0-7,9	692	8	3	8	63	12	4	2	100
> 7,9	86	13	7	13	67	0	0	0	100

ment acides et à des baisses de pH dans des sols initialement alcalins. Une telle symétrie confirme la thèse des erreurs de prélèvement ou de mesure.

Dans le domaine des écarts d'amplitude réduite, on observe aussi que les pH des sols acides et des sols alcalins tendent à se rapprocher de la neutralité, ce qui peut s'expliquer par le choix d'engrais raisonnés en fonction des pH des sols. La valeur médiane du pH de l'horizon de surface est de 7,2.

Comme souvent relevé dans la littérature, le pH du sol est soumis à d'assez importantes fluctuations qui sont attribuées selon les auteurs à la saison, à l'alimentation hydrique du sol ou encore à l'activité microbienne (Conyers *et al.*, 1997; Yan *et al.*, 1996). Comme le taux de MO, le pH du sol n'est donc pas un indicateur aussi fiable que le taux d'argile: une même parcelle peut présenter une différence de 0,4 unité entre deux dosages séparés de quelques années. Ces dix-sept années de pratiques intégrées ne semblent pas avoir influencé le pH.

Capacité d'échange de cations (CEC)

Seules 60 parcelles ont été analysées à deux reprises. Six d'entre elles ont donné des résultats très différents sans qu'il soit possible d'en trouver la cause. Les autres résultats montrent une très bonne répétabilité des analyses CEC et %Sat, avec des coefficients de corrélation de 0,89 dans les deux cas. Ils montrent que la CEC et son complément, le taux de saturation (%Sat), sont des descripteurs très reproductibles d'une parcelle, au même titre que le taux d'argile. Les terres de surface analysées de notre réseau présentent une CEC moyenne de 15,5 cmol⁺/kg de terre (médiane = 14,8 cmol⁺) et un taux moyen de saturation de 71% (médiane = 74%).

Il convient de signaler que cette analyse est relativement longue, donc coûteuse, et que les critères d'interprétation des résultats ne sont pas souvent utilisés dans le cadre du conseil de fumure (Spring *et al.*, 2003).

Phosphore, potassium et magnésium facilement disponibles

Les analyses de P, K et Mg facilement disponibles (extraction à l'eau saturée de CO₂ pour P et K, dans une solution centimolaire de CaCl₂ pour Mg) ont été effectuées à plusieurs reprises sur les parcelles du réseau. 1335 paires de valeurs P et K répétées et 1231 paires de valeurs Mg répétées ont ainsi pu être constituées.

D'une manière générale, d'importantes fluctuations se produisent entre les résultats d'analyses répétées, que confirment des coefficients de corrélation assez bas: $r = 0,65, 0,36$ et $0,55$ respectivement pour P, K et Mg. En moyenne cependant, l'évolution des niveaux d'enrichissement en fertilisants est peu perceptible entre deux analyses consécutives; le phosphore disponible passe de l'indice moyen P₂O₅ 11,5 à 12,1 (médianes = 7,8), le potassium disponible passe d'une moyenne de 2,6 à 2,7 mg K₂O/100 g (médiane de 2,1 à 2,2) et le magnésium disponible d'une moyenne de 7,5 à 7,7 mg Mg/100 g (médiane de 6,4 à 6,9). Les écarts importants entre les moyennes et les médianes témoignent de la distribution asymétrique des teneurs en fertilisants: un petit nombre de teneurs particulièrement élevées en P, K ou Mg dans les sols fait monter la valeur moyenne mais n'a pas d'effet sur la médiane. La légère augmentation des niveaux d'enrichissement en magnésium s'explique par le fait que la pratique de la fumure Mg est plus récente et que les sols sont donc moins enrichis en magnésium qu'en phosphore et en potassium. Rappelons ici que la présente étude porte sur les résultats bruts d'analyses et non sur l'interprétation des teneurs en termes de niveaux de fertilité.

La relative stabilité des valeurs moyennes observées cache en réalité des

écarts parfois importants, malgré des directives précises sur l'époque et le mode de prélèvement de terre; l'étude se poursuit dans cette direction. Les écarts les plus extrêmes ne trouvent pas d'autres explications que des erreurs dans les processus de prélèvement-analyse, comme précédemment mentionné. Les écarts «raisonnables» traduisent l'hétérogénéité naturelle des sols et l'effet des pratiques de fertilisation sur les teneurs en fertilisants, sous réserve de l'incertitude de mesure.

Les trois graphes de la figure 5 montrent les distributions de fréquences des écarts observés entre les mesures consécutives des éléments P, K et Mg disponibles. Sur ces trois graphes, les trois colonnes centrales représentent des écarts faibles, c'est-à-dire la «stabilité» des mesures répétées, et les trois colonnes situées de part et d'autre de ces dernières, des «écarts raisonnables»: baisse de teneur sur la partie gauche du graphe, hausse à droite. Les limites de classe ont été fixées en fonction des fréquences observées. Il est intéressant de noter que l'étendue de la plage de «stabilité» est de l'ordre de grandeur de la plage définissant le niveau de fertilité «satisfaisant» des actuelles données de base sur la fumure (Ryser *et al.*, 2001). On observe également la symétrie entre hausses et baisses de teneurs; en d'autres termes, les fumures prati-

Tableau 2. Distribution de fréquences des écarts entre deux dosages de P, K et Mg disponibles séparés de quelques années dans quatre groupes d'enrichissement initial croissant (n = 1335 paires).

Groupe d'indice P initial	Nombre de cas	Ecart d'indice P ₂ O ₅ (valeur-récente moins valeur ancienne)					Total
		Baisse extrême < -9,0	Baisse modérée -3,1 à -9,0	Stabilité de -3,0 à 3,0	Hausse modérée 3,1 à 9,0	Hausse extrême > 9,0	
0 - 5,9	460	0	2	75	14	9	100%
6,0 - 11,9	475	0	18	65	11	6	100%
12,0 - 17,9	167	7	43	32	10	8	100%
> 17,9	233	35	19	26	9	11	100%
Groupe d'indice K initial	Nombre de cas	Ecart d'indice K ₂ O (valeur récente moins valeur ancienne)					Total
		Baisse extrême < -2,7	Baisse modérée -1,0 à -2,7	Stabilité de -0,9 à 0,9	Hausse modérée 1,0 à 2,7	Hausse extrême > 2,7	
0 - 1,24	287	0	0	80	16	4	100%
1,25 - 3,24	723	0	10	71	14	5	100%
3,25 - 5,24	222	7	40	34	14	5	100%
> 5,24	103	51	24	14	8	3	100%
Groupe d'indice Mg initial	Nombre de cas	Ecart d'indice Mg (valeur récente moins valeur ancienne)					Total
		Baisse extrême < -6,3	Baisse modérée -2,2 à -6,3	Stabilité de -2,1 à 2,1	Hausse modérée 2,2 à 6,3	Hausse extrême > 6,3	
0 - 7,9	791	0	5	82	11	2	100%
8,0 - 12,9	314	2	22	62	11	3	100%
13,0 - 17,9	67	13	37	30	18	2	100%
> 17,9	59	28	22	36	12	2	100%

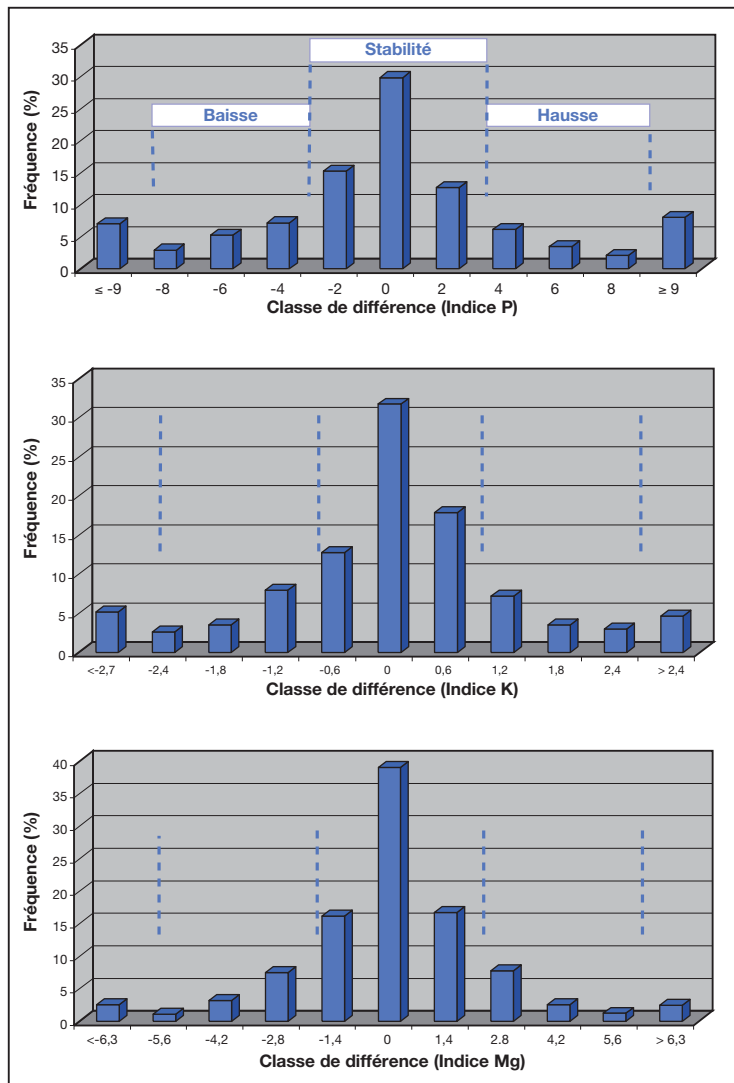


Fig. 5. Distribution de fréquences des différences entre deux mesures consécutives (+/- 5 ans) du P-CO₂ (n = 1357), du K-CO₂ (n = 1335) et du Mg-CaCl₂ (n = 1231 paires de mesures).

quées ne modifient en moyenne pas les niveaux de fertilité en phosphore, potassium et magnésium disponibles.

Le tableau 2 montre les distributions de fréquences des écarts de teneurs en P, K et Mg disponibles entre deux mesures consécutives dans quatre groupes de teneurs croissantes. On observe que la proportion des écarts minimales (colonne «Stabilité» du tableau) tend très nettement à diminuer lorsque le sol s'enrichit en P, K ou en Mg; cela pourrait indiquer que les méthodes de dosage sont moins robustes dans les domaines de concentrations plus élevées ou, plus généralement, que les conditions d'équilibre entre fractions mises en solutions («disponibles») et fractions restées fixées sur la matrice solide du sol («réserve») deviennent précaires lorsque l'enrichissement du sol croît. On observe encore que les écarts négatifs importants, correspondant à des baisses de teneurs, sont nettement plus abondants dans les sols enrichis en fertilisants que dans les sols moins pourvus; la correction de l'état de fertilité des sols par les agriculteurs, que nous documenterons dans une prochaine communication, apparaît donc nettement.

Phosphore, potassium et magnésium de réserve

Les analyses de P, K et Mg de réserve (extraction à l'acétate d'ammonium additionné d'agent EDTA) ne sont exécutées que depuis le milieu des années 90, à la suite d'une décision de compléter l'information sur la disponibilité immédiate des fertilisants par une information sur la disponibilité à terme

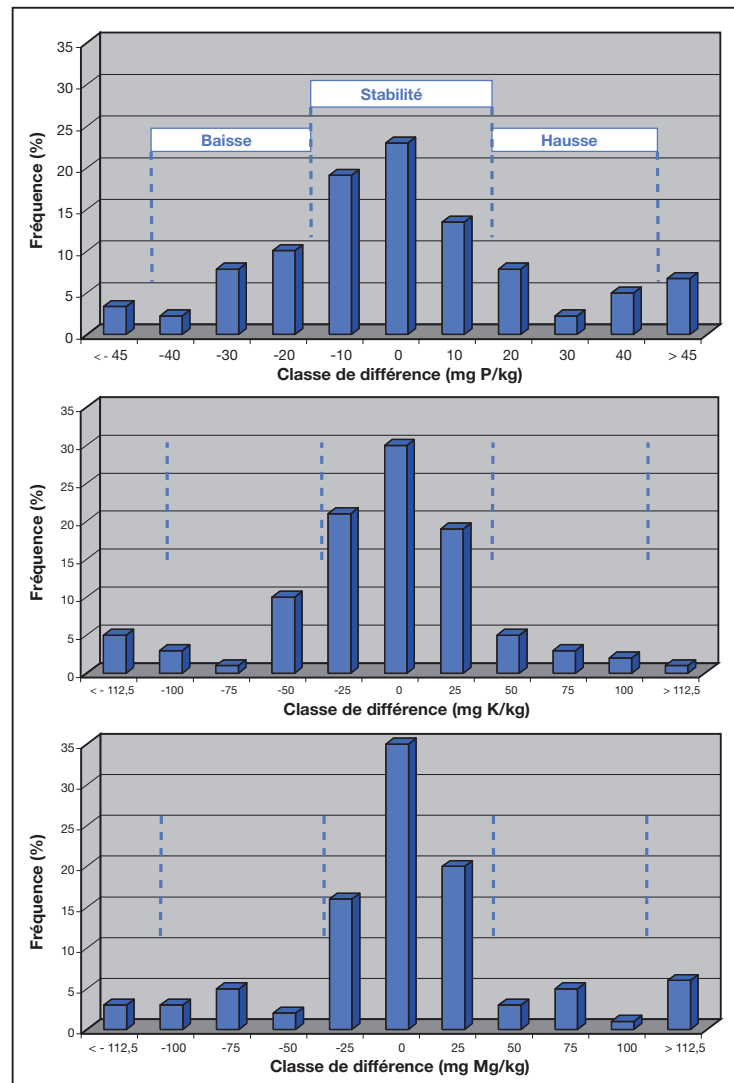


Fig. 6. Distribution de fréquences des différences entre deux mesures consécutives (+/- 5 ans) du P-AAEDTA (n = 89), du K-AAEDTA (n = 89) et du Mg-AAEDTA (n = 89 paires de mesures).

des fertilisants dans le sol (P, K et Mg «de réserve»). Cette dernière est plus propice à l'observation des effets à long terme des pratiques agricoles. En conséquence de cette période de plus courte, seuls 743 résultats d'analyse ont été obtenus à ce jour, dont 178 provenant de paires d'analyses répétées à quelques années d'intervalle (selon les PER, l'analyse du P et du K doit être répétée au maximum tous les dix ans). Le calcium de réserve, dont le dosage n'est exigible qu'en cultures spéciales, a été dosé dans un petit nombre de cas seulement et ne sera pas commenté ici.

Sur 89 paires de résultats P, K et Mg répétés à quelques années d'intervalle, les coefficients de corrélation sont meilleurs qu'avec les éléments «disponibles»: $r = 0,78, 0,66$ et $0,92$ respectivement pour P, K et Mg. Ils montrent la plus grande robustesse de ce type d'analyse, qui ne doit cependant pas être comprise comme une supériorité en termes de conseil de fumure. En moyenne de nos analyses, l'agent d'extraction AAEDTA extrait 63 mg de P par kg de terre, 154 mg de K et 198 mg de Mg, avec des valeurs médianes de 53, 142 et 148. Sans surprise, et sous réserve d'une interprétation plus fine tenant compte des taux d'argile, les quantités moyennes mesurées correspondent aux teneurs des sols normalement pourvus définies dans les données de base pour la fumure (Ryser *et al.*, 2001).

Les distributions de fréquences des écarts observés entre mesures consécutives des éléments P, K et Mg de réserve sont présentées dans la figure 6, de manière analogue à celles de la figure 5; elles montrent également d'importantes fluctuations entre analyses répétées et une même symétrie entre

hausse et baisse, traduisant une certaine stabilité des résultats d'analyses. Le trop faible nombre d'analyses et la durée limitée des intervalles de répétitions ne permettent toutefois pas de discerner une évolution des teneurs. En ce qui concerne l'interprétation des teneurs en termes de niveaux de fertilité, Célarin (2003) a déjà rendu attentif à la nécessité d'une révision du barème du phosphore.

Discussion

La poursuite des analyses sur le réseau d'exploitations pilote durant dix-sept ans a permis de confirmer les résultats déjà obtenus après une dizaine d'années: les propriétés dites stables des sols sont soumises à des fluctuations qui résultent de leur hétérogénéité naturelle. En effet, la qualité reconnue du laboratoire d'analyses et le soin apporté au prélèvement des échantillons réduisent la part d'erreur attribuable à ces facteurs et assignent la plus grande part de l'incertitude de répétabilité à cette hétérogénéité. Dans l'application pratique, ce risque d'erreur ne peut être maintenu à un niveau acceptable que si les recommandations de prélèvement et d'analyse des échantillons sont strictement respectées.

L'incertitude de mesure dans les analyses de sol est une donnée qui a longtemps été négligée. Par contraste, on admet une certaine dose d'incertitude dans chaque essai agronomique, puisqu'il doit être établi sur plusieurs répétitions et que seule l'analyse statistique permet d'attribuer une valeur significative aux résultats obtenus.

La reconnaissance d'une incertitude de mesure implique une grande prudence dans l'interprétation des résultats. Il y aura par exemple toujours un doute sur l'origine d'un faible abaissement du pH d'un sol: fluctuation saisonnière ou acidification? Loin de remettre en cause le principe de l'analyse de sol, l'identification de ce facteur démontre la nécessité pour chaque praticien de tenir à jour le registre des analyses qu'il a fait effectuer; seule la comparaison avec des valeurs anciennes lui permet, pour autant qu'il ait recours aux mêmes méthodes et au même laboratoire, de tirer des conclusions valables sur la fertilité de ses sols.

L'analyse de la texture du sol est fiable, elle détecte avec certitude des différences de 3-4% d'argile. L'analyse de la matière organique du sol présente un moindre degré de fiabilité, explicable par la difficulté de prélever un échantillon libre de résidus organiques. Pour

des écarts inférieurs à 0,4% de MO, plusieurs résultats d'analyses sont nécessaires pour détecter avec certitude une modification de taux. Par ailleurs, les nouvelles techniques de travail minimum du sol vont encore augmenter la complexité du prélèvement. L'analyse du pH présente des fluctuations en relation avec l'état du sol lors du prélèvement. En normalisant ce dernier, elle détecte une différence de 0,4 unité de pH. L'analyse de la capacité d'échange de cations et du taux de saturation présente, elle, de bonnes garanties de fiabilité. Sous réserve de quelques problèmes techniques et d'un trop faible nombre de résultats, elle détecte des différences de l'ordre de 3,0 cmol+/kg de CEC et des différences de huit points de %Sat.

En ce qui concerne l'analyse des éléments fertilisants P, K et Mg disponibles, l'interprétation de différences inférieures à six indices P_2O_5 , 1,8 mg $K_2O/100$ g ou 4,2 mg $Mg/100$ g devient hasardeuse (fig. 5). Il en est de même pour l'interprétation des résultats d'analyse des éléments fertilisants P, K et Mg de réserve, qui devient incertaine au-dessous de 30 mg P/kg, 70 mg K/kg ou 70 mg Mg/kg (fig. 6). Ces limites devront être prises en compte lors de l'élaboration d'un nouveau barème d'interprétation des résultats en termes de correction de la norme de fumure.

L'incertitude de mesure rend difficile l'appréciation des effets de la production intégrée sur les sols de grandes cultures en Suisse. Une première constatation, relevant de la litote, est que les propriétés stables des sols ne se sont pas péjorées! Les valeurs relevées dans le réseau expérimental concernant le pH, le taux de MO et le taux de saturation de la CEC montrent qu'aucune évolution notable ne se dessine. Cela peut soit signifier que les sols continuent à être bien entretenus, grâce à l'action conjointe des recommandations PER et à la qualification professionnelle des exploitants du réseau, soit qu'une durée plus longue est nécessaire à la mise en évidence de modifications des sols.

La stabilité des teneurs des sols en fertilisants pose un problème majeur: dès la mise en place de la production intégrée, l'obligation de prendre en compte la valeur fertilisante des engrais de ferme et autres résidus a eu pour conséquence une réduction massive des achats de fertilisants minéraux, de l'ordre de deux tiers. Après dix-sept ans de production intégrée, cette réduction n'a apparemment eu aucun effet jusqu'à présent sur les niveaux d'enrichisse-

ment en P et K disponibles (la fertilisation magnésienne est une pratique plus récente). Par ailleurs, les teneurs en P et K de réserve ne sont pas enregistrées depuis une durée suffisante pour montrer déjà des différences. Une des explications possibles est que deux générations d'agriculteurs fertilisant copieusement leurs sols ont créé d'importants stocks de P et de K (Frossard *et al.*, 2004); ces éléments ont vraisemblablement été rétrogradés en formes peu solubles que les méthodes d'analyse ne détectent pas. Comme des essais en cours à la Station de recherche Agroscope ART montrent que les premiers signes de carence en phosphore ne sont pas visibles avant au moins dix ans sans aucune fertilisation P (R. Flisch, comm. pers.), il est permis de conclure que l'état de fertilité phosphorique et potassique des sols suisses est largement sous-estimé et que d'importantes économies de fertilisants sont envisageables, moyennant une définition précise des situations où de telles «impasses» sont possibles.

Conclusions

- ❑ La nature hétérogène du sol d'une parcelle agricole est le principal facteur des variations observées entre les résultats d'analyse obtenus à quelques années d'intervalle.
- ❑ Cette incertitude complique l'interprétation des écarts entre mesures consécutives. Un suivi régulier par l'analyse permet de la réduire.
- ❑ Une procédure de prélèvement rigoureuse et constante, de même que le choix d'un laboratoire reconnu, réduisent l'incertitude des résultats. Des documents ad hoc sont disponibles dans tous les laboratoires.
- ❑ A ce jour, l'application des règles PER n'a pas modifié l'état de fertilité des sols examinés par les méthodes décrites dans cet article. En d'autres termes, la qualification professionnelle des exploitants et de leur encadrement a assuré la durabilité des pratiques exécutées selon les règles PER.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement les nombreux exploitants, conseillers de vulgarisation et collègues de laboratoires qui ont participé à la mise en place et à l'entretien du réseau PI de Suisse romande et du Tessin.

Bibliographie

- Anonyme, 2004. Méthodes de référence des stations fédérales de recherches agronomiques, dernière mise à jour 2005. Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), 8006 Zurich-Reckenholz.
- Anonyme, 2006. Ordonnance sur les paiements directs versés dans l'agriculture (OPD), chapitre 3: prestations écologiques requises. Office fédéral de l'agriculture, 3003 Berne.
- Célarin F., 2003. Evaluation of soil P-test values of canton Geneva, Switzerland in relation to P-loss risk. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **166**, 416-421.
- Conyers M. K., Uren N. C., Heylar K. R., Poile G. J. & Cullis B. R., 1997. Temporal variation in soil acidity. *Aust. J. Soil Res.* **35**, 1115-1129.
- Desaules A. *et al.*, 2004. Analysen von Zeitreihen und Ursachen gemessener Konzentrationsveränderungen von Schwermetallen und Phosphor in Böden auf Dauerbeobachtungsflächen. Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), 8006 Zurich-Reckenholz, 93 p.
- Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. & Sinaj S., 2004. Le phosphore dans les sols. *Cahier de l'Environnement* n° 368. Office fédéral de l'environnement, Berne, 180 p.
- Mayer J. & Neyroud J.-A., 2005. Matières organiques: usage, stockage et bilan humique. Journée d'agriculture 2005, Agroscope Changins-Wädenswil (ACW), 1260 Nyon.
- Neyroud J.-A. & Zuodar L., 1981. Enquête sur la fertilité des sols. 2. Etude critique des relations entre les fumures pratiquées et l'évolution correspondante des indices de fertilité du sol. *Revue suisse Agric.* **13** (5), 221-228.
- Neyroud J.-A., Supcik P. & Magnollay F., 1997. La part du sol dans la production intégrée. 1. Gestion de la matière organique et bilan humique. *Revue suisse Agric.* **29** (1), 45-51.
- Neyroud J.-A. & Magnollay F., 1999. La part du sol dans la production intégrée. 3. Reproductibilité des résultats d'analyse de sols. *Revue suisse Agric.* **31** (5), 239-243.
- Paustian K., Elliott E. T., Collins H. P., Cole C. V. & Paul E. A., 1995. Use of a network of long-term experiments for the analysis of soil carbon dynamics and global change. *Aust. J. Exp. Agr.* **35**, 929-939.
- Ryser J.-P., Walther U. & Flisch R., 2001. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages. *Revue suisse Agric.* **33** (3), 4-80.
- Spring J.-L., Ryser J.-P., Schwarz J.-J., Basler P., Bertschinger L. & Häseli A., 2003. Données de base pour la fumure en viticulture. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* **35** (4), 24 p.
- Vulliod P., Neyroud J.-A. & Mercier E., 2006a. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins. II. Evolution des propriétés du sol. *Revue suisse Agric.* **38** (1), I-XVI.
- Vulliod P., Neyroud J.-A. & Mercier E., 2006b. Efficacité de différents apports organiques et d'un engrais minéral azoté à Changins (1976-2004). *Revue suisse Agric.* **38** (4), 173-183.
- Yan F., Schubert S. & Mengel K., 1996. Soil pH changes during legume growth and application of plant material. *Biol. Fert. Soils* **23**, 236-242.

Summary

The soil's part in integrated production. 4. New findings about reproducibility of analysis results

During 17 years the stable and variable soil properties of about 800 plots belonging to farms cultivated according to the rules of the swiss integrated production were studied. Repeating the analyses showed that even supposedly stable properties like clay content or cation exchange capacity were strongly reacting to the heterogeneous nature of the soils. An analysis repeated after 5 years safely detects differences of 3-4% clay, 3.0 cmol+/kg CEC, 8% base saturation, 0.4% OM, 0.4 pH unit, 6 P-CO₂ Indices, 1.8 mg K-CO₂, 4.3 mg Mg-CaCl₂, 30 mg P-AAEDTA and 70 mg K- or Mg-AAEDTA. Because of these rather high detection levels and of the uncertainty related to sampling conditions close to practical reality, no definite response can be given so far as to whether the IP improved soil condition. One may conclude that the IP regulations, combined with farmers' professional skills were able to maintain soil fertility at its actual good level. Massively reducing the PK input from commercial fertilizers did not yet result into corresponding decreases in soil tests results.

Key words: soil fertility, soil analysis.

Zusammenfassung

Der Stellenwert des Bodens in der Integrierten Produktion. 4. Neues über die Wiederholbarkeit der Analysenresultate

Auf einem Messnetz von ca. 800 nach OeLN Vorschriften kultivierten Ackerbauparzellen wurden die stabilen und variablen Bodeneigenschaften während 17 Jahren untersucht. Unter 5-jähriger Beprobung wurde anhand der Tongehalte und der KAK Werte eine beträchtliche Heterogenität des Bodenmaterials festgestellt. Die Wiederholung der Analyse nach 5 Jahren unterscheidet mit Sicherheit Abweichungen von 3-4% Ton, 3,0 cmol+/kg KAK, 8% Basensättigung, 0,4% OS, 0,4 pH Einheit, 6 P-CO₂ Indizes, 1,8 mg K-CO₂, 4,3 mg Mg-CaCl₂, 30 mg P-AAEDTA und 70 mg K- oder Mg-AAEDTA. Wegen dieser hohen Bestimmungsgrenzen und der aus praxisnahen Beprobungsbedingungen entstandenen Ungenauigkeit können zur Zeit noch keine Äusserungen über den nachhaltigen Einfluss der Einführung der integrierten Produktion gemacht werden. OeLN und hohe Fachkenntnisse haben die Bodenfruchtbarkeit aufrecht erhalten. Die massive Reduktion der PK Handelsdüngereinträge bleibt bis jetzt ohne Einfluss auf die Bodenuntersuchungsergebnisse.

Riassunto

La parte del suolo nella produzione integrata. 4. Nuove osservazioni sulla riproducibilità dei risultati di analisi dei suoli

Le proprietà stabili e variabili dei suoli sono state seguite durante 17 anni su una rete di circa 800 parcelle di campicoltura, nel quadro della produzione integrata (Prestazioni Ecologiche Richieste, PER). La ripetizione delle analisi ad una frequenza di circa 5 anni dimostra la natura eterogenea del suolo, concretizzata nella fluttuazione del tasso di argilla e nella capacità di scambio di cationi, parametri reputati stabili nello spazio di una generazione. L'analisi rivela con certezza delle differenze di 3-4% di argilla, 3,0 cmol+/kg di CEC, 8 punti di % Sat, 0,4 % di MO, 0,4 unità di pH, 6 indici P-CO₂, 1,8 mg di K-CO₂, 4,3 mg di Mg-CaCl₂, 30 mg di P-AAEDTA, e 70 mg di K o di Mg-AAEDTA. A causa delle soglie elevate di questi risultati e delle incertezze che accompagnano il prelevamento e l'analisi dei campioni, le fluttuazioni osservate sulle proprietà variabili del suolo impediscono per ora di portare un giudizio definitivo sugli effetti delle esigenze PER sulla qualità dei suoli e la durevolezza delle pratiche. E' anche possibile concludere che il rispetto delle esigenze PER, combinato alla qualificazione professionale degli esercenti agricoli, mantiene i suoli ai loro attuali livelli di fertilità. Peraltro, la riduzione massiccia degli apporti di concimi commerciali PK non ha modificato finora i livelli di fertilità P e K.