

# Test en laboratoire de la méthode CO<sub>2</sub> pour le conseil de fumure

Hans Stünzi, Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zurich

Renseignements: Hans Stünzi, e-mail: hans.stuenzi@art.admin.ch, tél. +41 44 377 73 31



Blé d'automne dans l'essai «Altwy». De gauche à droite, fumure à 0/3, 3/3, 5/3 de la norme. (Photo ART)

## Introduction

Dans le sol, seule une petite part du phosphore (P) est disponible pour la croissance des plantes. Cette fraction constitue la base d'une fumure adéquate, mais elle n'est pas facile à déterminer. C'est pourquoi il existe différentes méthodes pour l'évaluation du phosphore disponible, malheureusement souvent avec des résultats contradictoires. Toutefois, plusieurs de ces méthodes sont employées de manière empirique depuis des années et semblent donner satisfaction. Mais il manque souvent la preuve scientifique établissant en quoi une méthode peut être potentiellement «la bonne».

Le but de ce travail est de vérifier, du point de vue chimique et analytique, la validité de la méthode suisse d'extraction du sol à l'eau saturée en CO<sub>2</sub>. Certains aspects sont comparés aux extraits AAE10 (acétate

d'ammonium + EDTA). L'extraction à l'eau pure (H<sub>2</sub>O10) n'est pas prise en considération ici, car les résultats dépendent trop de la qualité du papier-filtre utilisé (Stünzi 2006a, 2007, 2007a).

### Une méthode conventionnelle

Les méthodes d'analyse de sol sont des méthodes conventionnelles dont les procédures ont été définies il y a des années. Ainsi, pour quantifier le phosphore, on recourt à une réaction colorimétrique qui tient compte des orthophosphates et des polyphosphates hydrolysables; avec la méthode CO<sub>2</sub>, la part des orthophosphates varie de 18 à 98 % et le phosphore organique soluble non saisi peut varier jusqu'à 500 % (Stünzi 2006a). Par ailleurs, le résultat peut être influencé par différents processus durant la filtration, celle-ci durant plus longtemps que l'extraction (Stünzi 2007).

Malgré ces restrictions, ces méthodes de référence ont été utilisées dans ce travail afin de mieux comprendre leurs propriétés.

## Matériel et méthodes

Les méthodes d'analyses sont décrites dans le recueil des Méthodes de référence (Agroscope 2010) et caractérisées par Stünzi (2007).

Les échantillons de terre proviennent des analyses circulaires 2008 pour les laboratoires des sols accrédités pour les PER (n = 15), d'échantillons standard internes d'ART (5) et de deux essais de fumure d'ART (27). Les résultats ont été complétés en partie par ceux de travaux antérieurs. De plus, des résultats d'analyses granulométriques, de teneurs en humus ainsi que d'analyses AAE10 et H<sub>2</sub>O10 étaient disponibles, mais ils se sont révélés sans corrélation avec les phénomènes observés.

Pour simplifier les libellés, P-CO<sub>2</sub>, par exemple, signifie «P extrait avec la méthode CO<sub>2</sub>».

### La méthode CO<sub>2</sub> en bref

Un échantillon de terre séchée est mélangé à une quantité 2,5 fois plus élevée d'eau saturée en CO<sub>2</sub> et agité pendant une heure (extraction 1:2,5). Le CO<sub>2</sub> provoque une acidification qui augmente la solubilité de plusieurs composés.

L'extrait complet est passé à travers un filtre de papier, ce qui peut prendre jusqu'à trois heures selon les échantillons. Dans le filtrat, on mesure le phosphore par photométrie (méthode au bleu de molybdène) et le potassium par spectrométrie d'émission. Les résultats sont exprimés en indices (un point d'indice = 0,062 mg P ou 3,321 mg K par litre d'extrait). On a également mesuré les teneurs en Mg et Ca dans l'extrait CO<sub>2</sub> par spectrométrie d'absorption atomique.

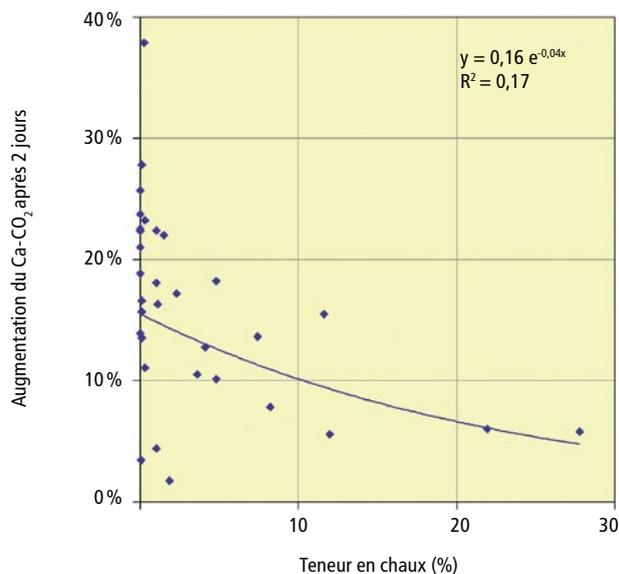
Dans l'extrait CO<sub>2</sub>, la concentration molaire de Ca est 7 à 2467 fois plus élevée que celle du phosphore (médiane 201, n = 88). A cause de cet excédent, la filtration exerce une influence importante dans la méthode CO<sub>2</sub>: pendant la filtration, du CO<sub>2</sub> s'échappe, ce qui peut entraîner une augmentation du pH jusqu'à une unité. Ce phénomène réduit à son tour la solubilité des phosphates de calcium, qui précipitent. Dans une solution saturée en Ca<sup>2+</sup> et en phosphate, en présence d'apatite (Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>OH), la concentration de PO<sub>4</sub> libre se réduirait d'un facteur 142 par l'élévation du pH pendant la filtration!

## Résultats

### Influence de la vitesse de réaction

Dans les conditions de l'extraction au CO<sub>2</sub>, une quantité de chaux correspondant à 0,2 % dans le sol (60 mg) peut >

**Résumé** Pour le conseil de fumure en phosphore (P) et en potassium (K), l'extraction à l'eau saturée en CO<sub>2</sub> est une des méthodes de référence adoptées en Suisse. Des tests en laboratoire montrent que les interactions entre CO<sub>2</sub>, calcium, phosphate, phosphates de calcium peu solubles et la chaux, jouent un rôle important. Au champ, les teneurs en CO<sub>2</sub> dans l'air du sol sont élevées et influencent ces équilibres dans la solution du sol et, par conséquent, la disponibilité du P pour les plantes. Si un échantillon de sol est soumis plusieurs fois à l'extraction à l'eau saturée en CO<sub>2</sub>, l'extrait présente toujours des concentrations comparables en P. Ceci reflète ce qui se passe au champ: un sol peut pourvoir les plantes en P pendant une longue période, même s'il subit des séquences de manque ou d'excès d'eau. De même, la méthode CO<sub>2</sub> montre l'homéostasie des sols qui explique pourquoi il faut des années avant que les plantes réagissent à une sur- ou sous-fertilisation en P. Les concentrations en K dans les extraits séquentiels ne baissent que graduellement. Ainsi, la méthode CO<sub>2</sub> fournit une bonne approximation des quantités de P et de K facilement disponibles pour les plantes. Les résultats des extractions séquentielles avec l'acétate d'ammonium + EDTA («AAE10») sont certes reproductibles mais tellement différents d'un sol à l'autre que, du point de vue analytique, aucune inférence directe ne peut en être tirée sur la disponibilité pour les plantes.

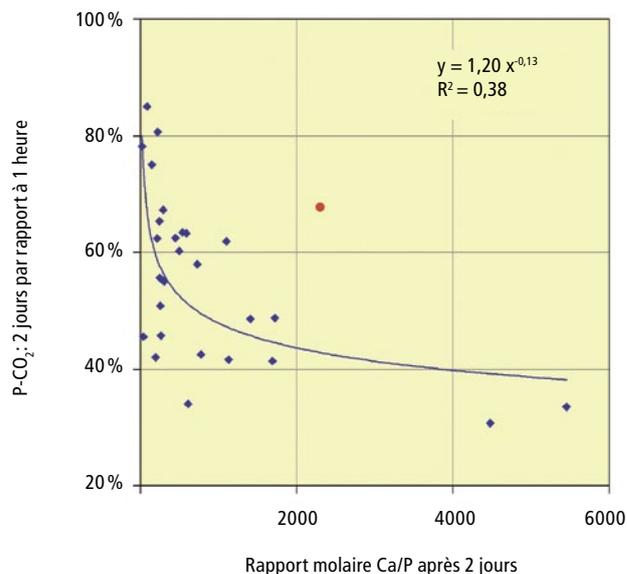


**Figure 1** | Augmentation du Ca-CO<sub>2</sub> en fonction de la teneur en chaux en prolongeant le temps d'extraction à deux jours.

être solubilisée. Un tel ajout de chaux avant l'extraction réduit le P-CO<sub>2</sub> d'un sol sans chaux à moins de la moitié. La solubilité des phosphates de calcium est diminuée parce que la dissolution de la chaux non seulement libère du Ca<sup>2+</sup> mais fait augmenter le pH d'environ 0,5 unité. Des ajouts de chaux plus importants n'accroissent guère cet effet (Stünzi 2006a).

La vitesse de solubilisation dépend de l'excédent de chaux: si l'on remplace l'échantillon de terre par 300 mg de pure chaux moulue, la saturation est atteinte après une heure. Si l'on ne met que 60 mg de chaux, seuls 60 % se solubilisent pendant la durée normale de l'extraction et 90 % après deux jours. Si de vrais échantillons de terre subissent une extraction prolongée (2 jours), une plus grande quantité de Ca est libérée (16 ± 8 %, n = 32). Cet effet est plus modeste dans les sols contenant beaucoup de chaux (fig. 1) car la saturation est quasiment atteinte pendant le temps normal d'extraction. D'autres réactions de solubilisation lentes provoquent aussi une augmentation du Ca-CO<sub>2</sub> après une extraction prolongée. Après une extraction réduite à une demi-heure, le P-CO<sub>2</sub> est au même niveau qu'après une heure, mais après 2 jours d'extraction, il est à un niveau bien inférieur (54 ± 14 %, n = 36). Ceci démontre qu'une partie du P se dissout rapidement puis, sous l'effet de l'augmentation lente de la concentration en Ca, il précipite sous forme de phosphate de calcium.

La précipitation de quantités supplémentaires de phosphate de calcium à cause d'une élévation du pH pendant la filtration diminue la valeur du P-CO<sub>2</sub>, surtout en présence d'un fort excédent de Ca<sup>2+</sup> par rapport au



**Figure 2** | P-CO<sub>2</sub> après 2 jours comparé à une heure d'extraction en fonction du rapport des concentrations molaires Ca/P (100 % = aucune relation avec la durée d'extraction).

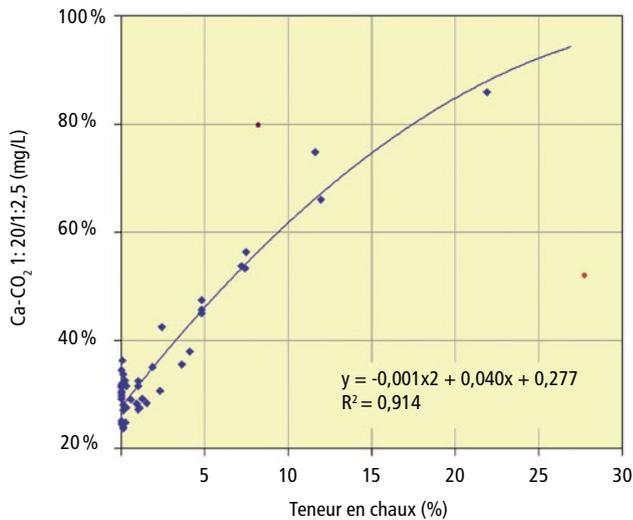
phosphate (fig. 2). Le cas particulier illustré dans la figure 2 présente une teneur inhabituellement élevée en Ca soluble (Ca-H<sub>2</sub>O<sub>10</sub> = 1150 mg/kg), caractérisant la présence d'agents complexants naturels de Ca qui empêchent la précipitation de phosphates de calcium. Un reste de CO<sub>2</sub> peut s'échapper du filtrat. La lente progression de la précipitation de phosphates de calcium fait que la teneur en P dans l'extrait n'est pas stable. Comme il n'y a pas de composés potassiques qui se dissolvent lentement, la prolongation de l'extraction CO<sub>2</sub> ne fait augmenter les teneurs que de 3 ± 4 % (n = 32).

### Formes de Ca et rapport d'extraction

Le calcium peut se trouver dans le sol sous forme soluble, adsorbé par des particules d'argile (échangeable) ou peu soluble sous forme de chaux ou de phosphate de calcium. Les différentes fractions peuvent être mises en évidence en comparant les extraits avec un rapport de 1:20 aux extraits avec le rapport usuel de 1:2,5.

Si le Ca n'est présent que sous une forme facilement soluble, la concentration en Ca dans l'extrait 1:20 doit tomber à 12,5 %. Si le Ca est en excès uniquement sous forme de chaux et si l'équilibre de solubilisation s'installe pendant le temps d'extraction, la concentration en Ca est indépendante du rapport d'extraction. Dans la réalité (fig. 3), la concentration en Ca dans l'extrait 1:20 d'un sol sans chaux tombe à 29 ± 4 % (n = 20), parce que le pH est plus bas à cause du plus fort excédent de CO<sub>2</sub>, ce qui peut libérer du Ca<sup>2+</sup>.

En sols riches en chaux, le cas limite «100 %», c'est-à-dire la même concentration en Ca dans l'extrait 1:2,5 que



**Figure 3 |** Concentration en Ca-CO<sub>2</sub> dans les extraits 1:20 comparée à celle des extraits 1:2,5 en fonction de la teneur en chaux (100 % = même concentration en Ca dans les deux extraits).

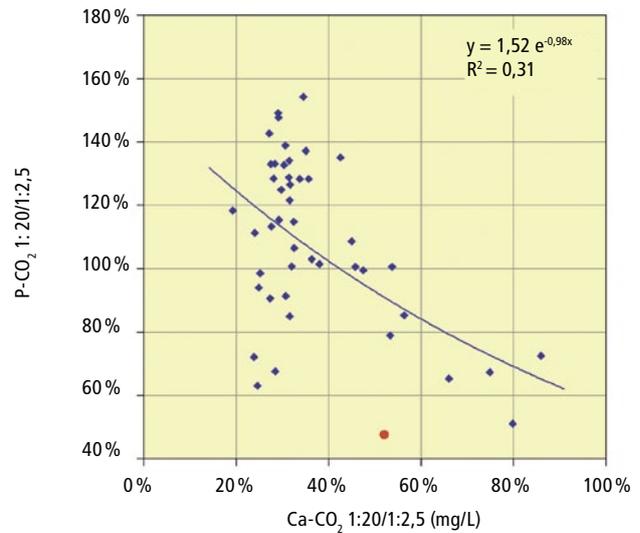
dans l'extrait 1:20, ne peut être qu'approché (fig. 3). Les cas particuliers peuvent être intéressants ici aussi: dans l'échantillon de droite, le Ca-CO<sub>2</sub> dans l'extrait 1:20 est plus bas que prévu parce que la forte proportion de Ca facilement soluble (Ca-H<sub>2</sub>O<sub>10</sub> = 740 mg/kg) est diluée. Pour cet échantillon qui se positionne au-dessus de la droite de régression, la forte teneur en P-CO<sub>2</sub> (indice 160) domine; comme la concentration en P diminue de moitié dans l'extrait 1:20, il peut rester plus de Ca en solution.

Dans les extraits 1:20 au lieu de 1:2,5, la concentration en K-CO<sub>2</sub> tombe à 41 ± 9 % (n = 71; voir aussi Stünzi 2007). Dans les sols riches en K-CO<sub>2</sub>, la concentration en K baisse plus fortement parce qu'une plus grande part du potassium est facilement soluble, donc déjà dissous dans l'extrait 1:2,5, et l'extraction 1:20 ne fait que la diluer.

La concentration en P dans l'extrait CO<sub>2</sub> est de 7 ± 28 % supérieure (n = 47), en moyenne, si la prise d'échantillon est 8 fois moindre (converties en mg/kg de sol, les valeurs seraient 8,5 fois plus élevées dans l'extrait 1:20 que dans l'extrait 1:2,5!). Plus la concentration en Ca baisse par le fait d'un rapport d'extraction large, plus il peut rester de phosphate dans la solution (fig. 4).

### Solubilité du P total

Dans les conditions de l'extraction CO<sub>2</sub>, seule une part infime du P total (médiane 0,1 %) présent dans le sol est solubilisé. Il n'y a que dans les sols présentant un très faible excédent de Ca qu'une plus grande part du P total peut être solubilisé (fig. 5). Dans ces sols, la concentration en P baisse nettement lorsque le rapport d'extraction passe à 1:20, comme on peut s'y attendre avec un



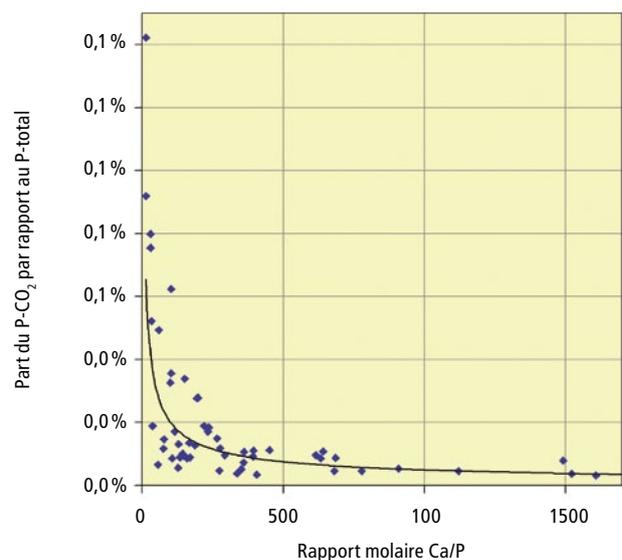
**Figure 4 |** Interdépendance des concentrations relatives en P et Ca dans les extraits 1:20 au lieu de 1:2,5.

processus de dissolution «normal».

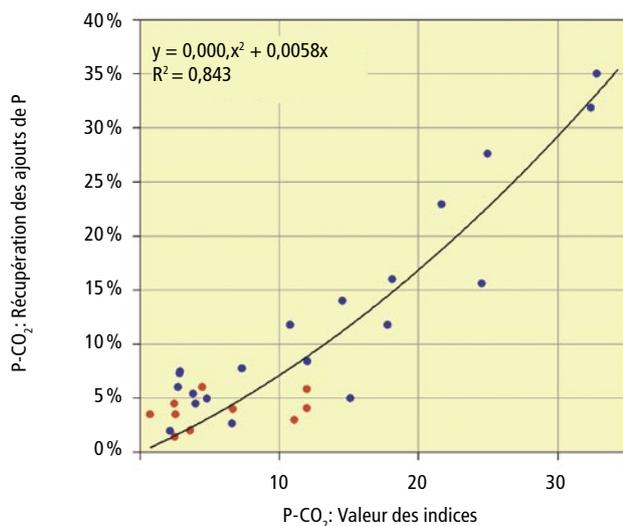
### Taux de récupération du phosphate

Lorsque l'on ajoute du phosphate à des échantillons de terre immédiatement avant l'extraction CO<sub>2</sub>, le taux de récupération du P ajouté dans les extraits est d'autant plus faible que l'indice P-CO<sub>2</sub> du sol est bas (fig. 6, voir aussi Stünzi 2006a).

Ces ajouts de P correspondent à une fumure allant jusqu'à 100 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Cette forte quantité – supérieure à la norme pour beaucoup de cultures – est en grande partie fixée pendant le court laps de temps que dure l'extraction, en particulier lorsqu'il s'agit de sols considérés comme pauvres ou médiocres. En fait, ces sols



**Figure 5 |** Solubilité relative du P total en fonction du Ca excédentaire, exprimée en termes de rapport molaire Ca/P.



**Figure 6** | Récupération du phosphate, en %, en fonction des indices P. Points rouges: échantillons avec un rapport molaire Ca/P >300.

ne sont pas pauvres en phosphore, mais ils le fixent bien! Une explication réside de nouveau dans l'excédent de Ca par rapport au P. Pour les échantillons présentant un fort excédent de Ca (en rouge dans la figure 6), une grande partie du P ajouté précipite sous forme de phosphate de Ca insoluble, ce qui fait que les indices P sont bas.

#### Taux de récupération d'hyperphosphate

L'eau saturée en CO<sub>2</sub> dissout l'hyperphosphate lentement: des quantités correspondant à un indice d'environ 100 ne sont solubilisées qu'à 20% après une heure (durée normale) et 40% après 4 jours. Si l'on ajoute la même quantité à un échantillon de terre, le taux de récupération est nul, même avec des échantillons sans chaux, car les extraits CO<sub>2</sub> contiennent toujours du calcium qui fait baisser la solubilité du phosphate. La mauvaise solubilité de l'apatite montre que les effets du Ca<sup>2+</sup> mentionnés plus haut ne reposent pas sur des différences de solubilisation des phosphates de calcium mais sur leur précipitation.

Lors de l'extraction AAE10 de terres sans chaux, une partie de l'hyperphosphate se dissout lentement et cette fraction disparaît lorsque la teneur en chaux augmente.

**Tableau 1** | Comparaison des résultats des extractions séquentielles exprimés en pourcent de l'extraction précédente

	Extraction	Moyenne	Ecart-type	Maximum	Minimum	Nombre
P-CO <sub>2</sub>	2/1	76%	±18%	120%	32%	50
	3/2	93%	±7%	106%	78%	50
	4/3	96%	±5%	108%	86%	29
K-CO <sub>2</sub>	2/1	69%	±7%	82%	39%	47
	3/2	84%	±8%	95%	58%	47
	4/3	88%	±8%	99%	67%	29
Ca-CO <sub>2</sub>	2/1	65%	±17%	101%	45%	33
	3/2	86%	±11%	101%	69%	29
	4/3	86%	±9%	104%	70%	28
Mg-CO <sub>2</sub>	2/1	61%	±11%	82%	41%	33
	3/2	79%	±7%	90%	64%	29
	4/3	86%	±7%	108%	76%	28
P-AAE10	2/1	99%	±52%	306%	31%	38
	3/2	72%	±21%	116%	25%	38
K-AAE10	2/1	3%	±1%	6%	1%	38
Ca-AAE10	2/1	14%	±7%	35%	5%	36
	3/2	37%	±15%	84%	12%	36
Mg-AAE10	2/1	68%	±64%	214%	7%	36
	3/2	57%	±36%	175%	20%	36

### Extractions CO<sub>2</sub> séquentielles

L'homéostasie du phosphore a été étudiée en détail en pratiquant des extractions répétées sur des échantillons de terre. Après la filtration, on a laissé sécher les filtres pendant la nuit puis retiré l'échantillon pour le soumettre à une nouvelle extraction. Cette procédure a été répétée jusqu'à trois fois. Les résultats des extractions subséquentes ont été tout aussi reproductibles que ceux de la première extraction. Les modifications relatives (en %) des valeurs P-CO<sub>2</sub> des extractions séquentielles ont été stables dans le temps, bien que les valeurs des indices P-CO<sub>2</sub> normaux du lot d'échantillons testés aient augmenté de  $26 \pm 12$  % en moyenne après une année.

Le tableau 1 montre que beaucoup de P est encore extrait lors de la seconde extraction. Lors des extractions suivantes, pratiquées sur les mêmes échantillons, les valeurs P-CO<sub>2</sub> n'ont pas changé de manière significative, de même pour les échantillons dont le P-CO<sub>2</sub> de la seconde extraction était nettement plus bas que lors de la première. Dans ces cas, le Ca facilement soluble est retiré du système par la première extraction et ne peut plus influencer la solubilité du phosphate lors des extractions subséquentes. Aucun des échantillons n'a présenté de symptômes d'épuisement des réserves de phosphore.

La baisse du P-CO<sub>2</sub> à la seconde extraction n'est que faiblement corrélée avec celle qui est liée à une réduction du poids de l'échantillon ou à une prolongation de l'extraction ( $R^2 = 0,2$  dans les 2 cas). A la base, les réactions sont les mêmes mais, lors des extractions séquentielles, des formes solubles de P et de Ca<sup>2+</sup> sortent du système. La meilleure corrélation (fig. 7) est constatée à propos de l'excédent Ca/P lorsque l'on prend en considération les valeurs de la 2<sup>e</sup> extraction (lors de la 1<sup>re</sup> extraction, des complexants de Ca sont ponctuellement la cause de valeurs relativement élevées). Avec un fort excédent de Ca, des phosphates de calcium précipitent et ils ne peuvent pratiquement plus être dissous par l'extraction subséquente.

Le K-CO<sub>2</sub> baisse graduellement à chaque extraction séquentielle, ce qui correspond à un lessivage progressif du sol (tabl. 1). Ce phénomène est semblable dans tous les sols, quoique la tendance à la baisse, en valeurs relatives, soit d'autant plus forte que les valeurs de K-CO<sub>2</sub> sont plus élevées ( $R^2 = 0,44$  pour la 2<sup>e</sup> extraction). La corrélation de cette baisse avec celle du large rapport d'extraction ( $R^2 = 0,39$ ) confirme que les sols présentant des valeurs de K-CO<sub>2</sub> élevées renferment une forte proportion de K facilement soluble qui est extrait du système par les extractions séquentielles.

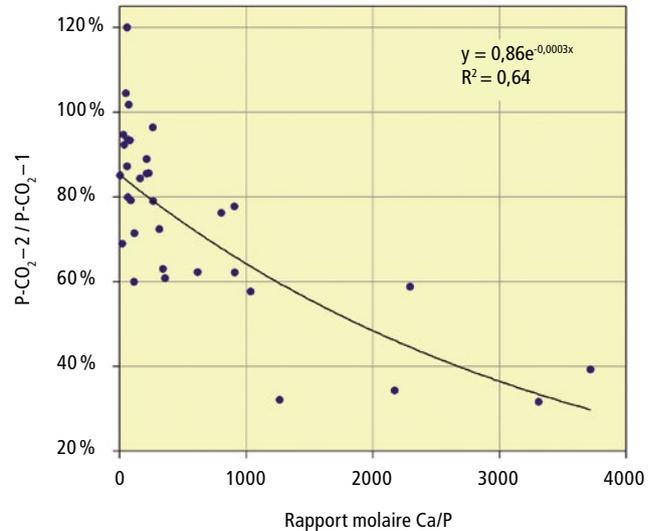


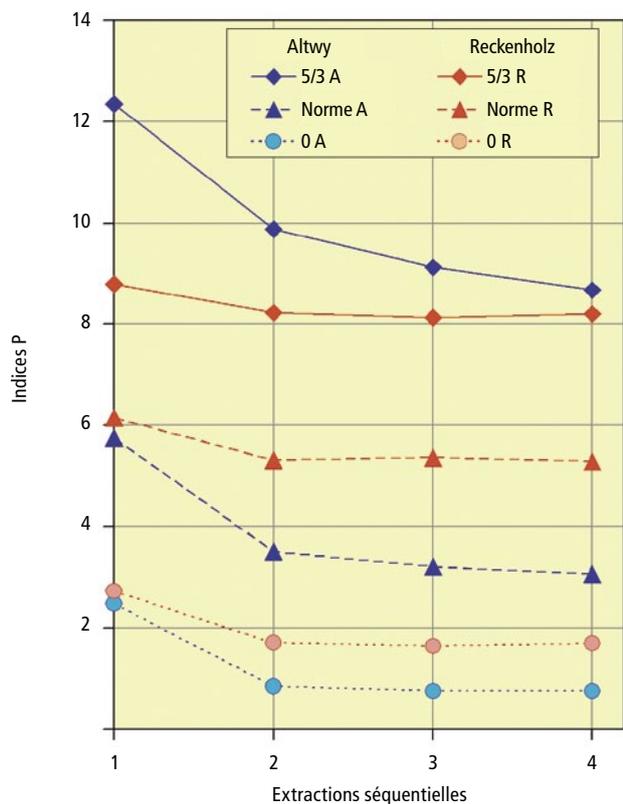
Figure 7 | Modification du P-CO<sub>2</sub> de la 1<sup>re</sup> à la 2<sup>e</sup> extraction exprimée en fonction du rapport molaire Ca/P dans le 2<sup>e</sup> extrait CO<sub>2</sub>.

Dans les sols sans chaux, le Ca est soluble, raison pour laquelle les valeurs de la 2<sup>e</sup> extraction sont nettement plus basses ( $53 \pm 4$  %). Quelques sols contenant de la chaux contiennent aussi du Ca<sup>2+</sup> facilement soluble qui est dissous par la première extraction. Dans tous les sols contenant >2,5 % de chaux, la teneur en Ca-CO<sub>2</sub> reste à peu près constante ( $567 \pm 67$  mg Ca/l, 10 échantillons de la 2<sup>e</sup> à la 4<sup>e</sup> extraction) car il n'y a plus que de la chaux qui puisse être dissoute quasiment jusqu'à saturation (800 mg Ca/kg). Pour le Mg-CO<sub>2</sub>, les modifications relatives au cours des extractions séquentielles sont semblables à celles du Ca-CO<sub>2</sub> ( $96 \pm 9$  %).

Les extractions séquentielles avec AAE10 fournissent bien des résultats reproductibles pour P mais, à la 2<sup>e</sup> extraction, on constate des modifications très variables selon les sols, allant de 31 à 306 %. Le Mg-AAE10 se comporte de manière irrégulière au cours des extractions séquentielles. Une grande partie du K extractible est dissous lors de la 1<sup>re</sup> extraction; la 2<sup>e</sup> extraction n'en retire presque plus. De manière analogue, AAE10 dissout une grande partie de la chaux (jusqu'à 25 %), si bien qu'il ne reste plus guère de Ca-AAE10 à la 2<sup>e</sup> extraction.

### Extractions séquentielles sur des essais de fumure

Une partie des échantillons examinés provient de deux essais de fumure P de longue durée dans la région de Zurich: «Altwy» sur un sol léger (20 % d'argile, 0,1 à 12 % de chaux) et «Reckenholz» sur un sol lourd (40 % d'argile,  $\leq 0,3$  % de chaux). Dans les deux essais, les indices P-CO<sub>2</sub>, les teneurs dans les plantes et les prélèvements de P correspondent à la fumure au superphosphate (Flisch 2010).



**Figure 8** | P-CO<sub>2</sub> dans les extraits séquentiels sur des échantillons provenant de deux essais de fumure P, Altwy (A) et Reckenholtz (R). 0 = sans engrais, norme = fumure P selon la norme, «5/3» = fumure P à 5/3 de la norme. P sous forme de superphosphate. 4 répétitions dans chaque essai.

Dans les extractions séquentielles, les valeurs P-CO<sub>2</sub> de l'essai «Altwy» baissent nettement plus que celles de «Reckenholtz». Au laboratoire, ce constat reflète l'expérience agronomique selon laquelle, à indice de fertilité égal, les sols légers ont besoin de plus d'engrais que les sols lourds pour satisfaire les besoins des plantes durant toute la période de végétation (cf. tabl. 11 dans Agroscope 2009).

Les résultats des extractions séquentielles sont aussi conformes à l'interaction Ca/P qui a été décrite: dans l'essai «Reckenholtz», le peu de chaux présent est dissous lors de la 1<sup>re</sup> extraction, raison pour laquelle le Ca-CO<sub>2</sub> de la 2<sup>e</sup> extraction tombe à 56 %, avec pour conséquence une plus faible diminution du P-CO<sub>2</sub> qu'à «Altwy». Comme le Ca continue à baisser dans les extractions suivantes (à 36 %), le P reste constant. En revanche, les valeurs Ca-CO<sub>2</sub> de l'essai «Altwy» baissent peu à la 2<sup>e</sup> extraction (75 %) et restent ensuite constantes (fig. 8).

## Conclusions

Les investigations faites sur la méthode d'extraction CO<sub>2</sub> mettent en évidence le rôle important de l'équilibre PO<sub>4</sub>/Ca. En fait, les extraits sont saturés en PO<sub>4</sub> et ils

contiennent du phosphate de Ca en présence d'un excédent de Ca<sup>2+</sup>. Ces équilibres dans les solutions se retrouvent aussi au champ où ils influencent la disponibilité du P pour les plantes. Comme l'air dans le sol contient jusqu'à 5 % de CO<sub>2</sub>, l'extraction à l'eau saturée en CO<sub>2</sub> simule parfaitement l'effet de l'eau du sol et les processus chimiques qui s'y déroulent.

Lorsqu'un échantillon de terre est soumis à des extractions successives à l'eau saturée en CO<sub>2</sub>, l'extrait contient toujours des concentrations en P semblables. C'est le reflet de ce qui se passe au champ: un sol peut approvisionner les plantes en P pendant longtemps, même s'il y a des périodes de manque ou d'excès d'eau. L'homéostasie du sol qui a été mise en évidence pour la méthode CO<sub>2</sub> permet une bonne approche du P disponible pour les plantes puisque, dans des parcelles considérées comme normalement pourvues, il faut des années de sur- ou de sous-fertilisation pour voir un effet sur l'approvisionnement des plantes en P.

Dans l'eau du sol, l'excédent de Ca dans la terre limite la solubilité du phosphate, ce qui explique sa faible mobilité. Mais lorsque de la terre parvient dans des cours d'eau par ruissellement, la limite du rapport de solubilité n'est pas atteinte à cause de la forte dilution, ce qui libère du P.

Le K-CO<sub>2</sub> se comporte de manière très homogène par rapport à des modifications des conditions d'extraction; au cours d'extractions CO<sub>2</sub> séquentielles, les teneurs baissent graduellement. Du point de vue chimique, K-CO<sub>2</sub> et P-CO<sub>2</sub> fournissent une bonne évaluation du P et du K disponibles pour les plantes, ce qui constitue une bonne base pour l'adaptation de la fumure.

Cependant, les extractions séquentielles confirment que la méthode CO<sub>2</sub> ne peut rien révéler sur les réserves du sol en P et en K. A cause de l'excédent de Ca, la quantité de phosphate fixée dans le sol est beaucoup plus grande que la quantité extraite.

Les extractions séquentielles avec la méthode AAE10 confirment les résultats acquis jusqu'ici (Stünzi 2006b, 2007): du point de vue chimique, on ne peut en inférer aucune relation avec les disponibilités pour les plantes. Selon la teneur en chaux dans le sol, une réserve de P sous forme de phosphate brut n'est que partiellement révélée, voire pas du tout. De ce fait, la méthode AAE10 ne fournit pas d'informations fiables non plus sur les teneurs en P et K du sol (mg/kg ou kg/ha). ■

**Riassunto****Determinazione dei tenori dei concimi mediante il metodo CO<sub>2</sub> in test di laboratorio**

La cessione con acqua satura di CO<sub>2</sub> è uno dei metodi di riferimento svizzeri per la determinazione dei tenori in fosforo e potassio dei concimi. Esperimenti di laboratorio hanno evidenziato che l'interazione tra CO<sub>2</sub>, calcio, fosfato, fosfati di calcio difficilmente solubili e calce svolge un ruolo sostanziale. Considerato che pure l'aria tellurica presenta tenori elevati di CO<sub>2</sub>, l'equilibrio fra gli elementi influenza anche sul campo la disponibilità immediata di P per le piante.

Se un campione di suolo è sottoposto a più riprese a un test di cessione con acqua satura di CO<sub>2</sub>, l'estratto contiene sempre concentrazioni di P simili. Ciò rispecchia le condizioni sul terreno: un suolo è in grado di approvvigionare le piante con P per un periodo di tempo prolungato anche se a cadenza periodica secca completamente o è intriso d'acqua. L'omeostasi del suolo considerata per il metodo CO<sub>2</sub> spiega come mai una concimazione eccessiva o insufficiente ha ripercussioni sull'approvvigionamento in P delle piante soltanto dopo anni. Nelle estrazioni sequenziali anche il CO<sub>2</sub>-K diminuisce soltanto gradualmente. Il metodo CO<sub>2</sub> fornisce pertanto una buona approssimazione per quanto concerne il P e il K immediatamente disponibili per le piante. I risultati delle estrazioni sequenziali con acetato d'ammonio EDTA («AAE10») sono riproducibili, ma tuttavia così diversi da un campione all'altro che dal profilo chimico non è possibile individuare una correlazione diretta con la disponibilità per le piante.

**Bibliographie**

- Agroscope ACW & ART, 2009. DBF 2009, Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (1), 27.
- Agroscope ART & ACW, 2010. Schweizerische Referenzmethoden der landw. Forschungsanstalten, Band 1.
- Flisch R., 2010. Communication personnelle.
- Stünzi H., 2006a. Die P-Bodenextraktionsmethoden mit Wasser und CO<sub>2</sub>-Wasser. *Agrarforschung* 13 (7), 284–289
- Stünzi H., 2006b. Zur P-Bodenextraktion mit Ammoniumacetat-EDTA (AAE10). *Agrarforschung* 13 (11–12), 488–493.
- Stünzi H., 2006c. Testresultate von alternativen Filtern zur Bodenunter-

**Summary****Analytical Studies of the CO<sub>2</sub> Soil Test for P and K Fertilization**

Extraction of soils with CO<sub>2</sub>-saturated water is one of the Swiss reference methods for phosphorus and potassium fertilizer recommendations. Laboratory experiments show that a significant role is played by interactions between CO<sub>2</sub>, calcium, phosphate, the only slightly soluble calcium phosphates and lime. Since soil air exhibits increased CO<sub>2</sub> content, these solution equilibria also influence the immediate plant-availability of P in the field. If a soil sample is extracted repeatedly with CO<sub>2</sub> water, the extract will always contain similar P concentrations. This reflects the conditions in the field: a soil can supply plants with P over a fairly long period, even if it periodically dries out or becomes waterlogged. The homeostasis of soils as shown in the CO<sub>2</sub> method explains why it takes years of over- or underfertilization for the P supply of the plants to be affected. CO<sub>2</sub>-K also decreases only gradually during sequential extractions. Consequently, the CO<sub>2</sub> method yields a good approximation of the readily plant-available P and K. Although reproducible, the results of the sequential extractions with ammonium-acetate and EDTA («AAE10») are so different from soil to soil that no direct connection with plant availability can be deduced from a chemical perspective.

**Key words:** soil analysis, fertilizer recommendation, extraction, CO<sub>2</sub> saturated water, phosphate calcium equilibria.

- suchung, Newsletter 1/2006 der Arbeitsgruppe Boden-, Dünger- und Schadstoffanalytik (AG2) der Koordinationsgruppe Boden und Düngung (KBD), Agroscope ART-Reckenholz, 2–11.
- Stünzi H., 2007. Bodenuntersuchungsmethoden für K, Mg und Ca im Vergleich. *Agrarforschung* 14 (8), 358–363.
- Stünzi H., 2007a. H<sub>2</sub>O10 Methodenänderung: Testresultate 2007. Newsletter 1/2007 der Arbeitsgruppe BDS, Boden-, Dünger- und Schadstoffanalytik (AG2) der Koordinationsgruppe Boden und Düngung (KBD), 2–11. Accès: <http://www.agroscope.admin.ch/analytische-chemie/00668/>.