

Evaluation des méthodes de détermination du besoin en chaux en relation avec les propriétés physiques et chimiques des sols acides

T.S. TRAN et W. VAN LIEROP

Service de Recherches en Sols
Contribution n° 298 du ministère de l'Agriculture,
des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
2700 Einstein, Sainte-Foy, Québec
Canada, G1P 3W8

SOMMAIRE

Cette étude a deux objectifs principaux : le premier est d'évaluer les relations entre certaines propriétés du sol et différentes formes d'acidité et le besoin en chaux de 58 sols minéraux acides du Québec. Le deuxième but est de comparer la précision et l'exactitude de cinq méthodes de détermination du besoin en chaux au moyen des méthodes de régression et de corrélation.

INTRODUCTION.

Le besoin en chaux d'une culture donnée peut être défini comme la quantité d'amendement calcaire requise pour obtenir une productivité optimale. Le chaulage n'affecte pas seulement le pH du sol, mais aussi la disponibilité des éléments nutritifs et toxiques aux plantes (JACKSON, 1967 ; VAN LIEROP **et al.**, 1979). L'intégration des effets du chaulage sur le pH, l'Al et le Mn du sol en relation avec le rendement est suggérée par HOYT et WEBBER (1974) et WEBBER **et al.** (1977) afin d'obtenir un meilleur indicateur du besoin en chaux. Toutefois, la recommandation courante du besoin en chaux n'est que la quantité d'amendement calcaire nécessaire pour atteindre un pH désiré du sol. A pH 6,5 (H₂O), les effets néfastes associés aux faibles rendements

des sols acides sont éliminés. Conséquemment, la détermination de la quantité d'amenagement calcaire requise pour atteindre ce pH fait l'objet de plusieurs méthodes pH tampons (WOODRUFF, 1948 ; McLEAN *et al.*, 1978).

L'utilisation du pH comme seul critère pour estimer le besoin en chaux des sols acides est considérée inadéquate par PIERRE et SCARSETH (1931) et MEHLICH (1942). La raison est que le pH indique seulement l'intensité de l'acidité active du sol et non son acidité potentielle. L'acidité du sol provient de deux sources principales : les sites d'échange permanents et les sites dépendants du pH. Les sites permanents sont produits par substitution isomorphe d'un ion par un autre de valence inférieure dans les cristaux argileux. Les ions hydrogène et les cations échangeables sont liés électrostatiquement sur ces sites ; l'acidité déplacée de ces sites par un sel neutre, tel que le KCl 1N, est généralement désignée comme acidité échangeable. Par contre, les sites dépendants du pH proviennent principalement de l'ionisation des groupements carboxyliques et phénoliques de la MO, de la dissociation des ions OH des surfaces latérales des feuillettes d'argile et de l'hydrolyse des oxydes et hydroxydes d'Al et de Fe. Les sites d'échange dépendants du pH, auxquels les ions hydrogènes sont retenus par liaison covalente, sont responsables du pouvoir tampon du sol. L'argile et la matière organique sont les principaux facteurs contribuant au pouvoir tampon du sol (KEENEY et COREY, 1963 ; PIONKE et COREY, 1967 ; PIONKE *et al.*, 1968). Pour cette raison, KEENEY et COREY ont trouvé une relation étroite entre le besoin en chaux et la teneur en matière organique du sol et ont proposé une fonction basée sur le pH et la matière organique pour estimer le besoin en chaux. Plus récemment, en s'inspirant des travaux de JORET *et al.* (1934), REMY et MARIN-LAFLECHE (1974) suggèrent une expression qui tient compte à la fois du pH, de la teneur en matière organique et en argile pour calculer le besoin en chaux du sol. En outre, plusieurs méthodes utilisant des solutions tampons sont préconisées pour déterminer le besoin en chaux des sols acides (WOODRUFF, 1948 ; McLEAN *et al.*, 1978). Ces tampons réagissent avec l'acidité du sol et le pH du mélange sol-tampon est calibré en besoin en chaux.

Cette étude a deux objectifs principaux. Le premier est d'examiner les relations entre le besoin en chaux et diverses propriétés chimiques et physiques des sols. Le deuxième est de comparer l'exactitude de différentes méthodes de détermination du besoin en chaux. Cette comparaison permettra de choisir la méthode la plus appropriée pour les analyses de routine en laboratoire.

MATERIAUX ET METHODES.

Les relations entre le besoin en chaux et la teneur en argile, la matière organique, la capacité d'échange cationique, l'aluminium et l'acidité du sol sont évaluées au moyen des méthodes de régressions et de corrélations simples et multiples. Cinquante-huit sols du Québec (sols podzolisés, brunifiés ou hydromorphes) sont utilisés dans cette expérience.

Les quantités de pierre à chaux (CaCO_3) indiquées par la méthode d'incubation sont employées comme valeurs de référence du besoin en chaux des sols. Cette méthode consiste à incuber les sols avec des quantités croissantes de CaCO_3 pendant 2 mois. Durant cette période, les sols sont maintenus à la température ambiante du laboratoire (environ 22 °C) et à l'humidité de la capacité au champ. Toutefois, un mois après le début de l'expérience, les sols ont été séchés à l'air durant trois jours pour ensuite les remouiller jusqu'à la fin de l'expérience. Après cette période de temps, les sols sont séchés à l'air, broyés et tamisés à 2 mm. Les quantités de CaCO_3 requises pour obtenir un pH de 6,5 (H_2O) sont déterminées graphiquement à partir de la relation obtenue entre le pH et les quantités croissantes de CaCO_3 ajoutées au sol.

BESOIN EN CHAUX DES SOLS ACIDES

Le CaCO_3 utilisé pour déterminer le besoin en chaux des sols de cette expérience est un produit chimiquement pur, broyé et passé au tamis de $38 \mu\text{m}$ (400 mailles/pouce). Cinq autres méthodes de détermination du besoin en chaux sont vérifiées : la méthode de titration avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de DUNN (1943) ; les méthodes préconisées par KEENEY et COREY (1963) ; REMY et MARIN-LAFLECHE (1974) ; la méthode des équations de régression ; et la méthode pH-tampon de SHOEMAKER et al. (1961). Dans cette étude, les besoins en chaux sont exprimés en milliéquivalents (meq) de $\text{CaCO}_3/100 \text{ g}$ de sol ; pour convertir ces quantités en tonnes de CaCO_3/ha , par exemple pour une couche arable de 18 cm de profondeur, il faudrait multiplier ces valeurs par 1,14.

Le pH du sol est mesuré à l'aide de l'électrode de verre en agitant une suspension de 10 g de sol et 10 ml d'eau. L'acidité échangeable du sol est déterminée en dosant les ions hydrogène et aluminium extraits avec le KCl 1N. Les concentrations de ces éléments sont obtenus par titration (McLEAN, 1965). L'acidité totale du sol est estimée par la méthode de triéthanolamine et de BaCl_2 à pH 8,0 (PEECH, 1965). L'acidité dépendante du pH est obtenue par la différence entre l'acidité totale et l'acidité échangeable ($\text{Al} + \text{H}$). La capacité d'échange cationique (CEC) est déterminée avec l'acétate d'ammonium à pH 7,0. L'ammonium retenu sur les sites d'échange du sol est déplacé par le NaCl et dosé par distillation. Le pourcentage de saturation en bases est obtenu à partir des concentrations de Ca et Mg déplacées par la solution de NH_4OAc et calculé de la façon suivante : $(\text{meq Ca} + \text{Mg}) 100/\text{CEC}$.

La matière organique (MO) du sol est déterminée par la méthode de WALKLEY-BLACK. Dans cette méthode, le carbone dans la MO est oxydé par une solution de bichromate de potassium ; la proportion de carbone organique dans le sol est ensuite multipliée par 1,72 pour obtenir le pourcentage de la MO. La teneur en argile du sol est déterminée en utilisant l'hydromètre Boyoucos après avoir détruit la MO du sol avec H_2O_2 .

RESULTATS ET DISCUSSION.

1. CARACTERISTIQUES DES SOLS.

Les sols utilisés dans cette expérience sont divisés en deux groupes : ceux ayant un pH (H_2O) inférieur ou égal à 5,0 ($\leq 5,0$) ou supérieur à 5,0 ($> 5,0$; tableaux 1 a et 1 b). Le premier groupe de sols ($\text{pH} \leq 5,0$) comprend surtout des sols très podzolisés riches en aluminium et hydrogène échangeables. Le rapport de l'hydrogène échangeable (extrait au KCl 1N) sur l'aluminium est en moyenne de 0,12. En général, les ions Al sur les sites d'échange permanents des sols acides prédominent sur les ions H. Dans cette étude, la proportion des ions H échangeables atteint 30 % de l'acidité échangeable dans quelques sols. ESPIAU et PEYRONNEL (1977) ont trouvé des proportions semblables, mais, selon McLEAN (1965), cette proportion peut atteindre 40 %. La quantité d'acidité totale déterminée à la triéthanolamine à pH 8,0 dans ces sols varie de 3,7 à 43,8 meq H/100 g de sol et est particulièrement élevée en sols argileux acides. La saturation en base et le besoin en chaux de ces sols s'étendent respectivement de 6,1 à 46,2 % (18,50 % de moyenne) et 1,6 à 40 meq $\text{CaCO}_3/100 \text{ g}$ (13,5 meq de moyenne).

Dans les sols du deuxième groupe ($\text{pH} > 5,0$), les concentrations d'Al et de H échangeables sont en moyenne de 0,58 meq Al et de 0,1 meq H/100 g. Ces concentrations sont respectivement 17 et 25 % de celles trouvées dans le groupe de sols ayant un $\text{pH} \leq 5,0$. Toutefois la concentration de ces éléments devient négligeable quand le pH du sol dépasse 5,4. Dans le deuxième groupe de sols, la saturation en bases s'étend de 11,2 à 48 %, la quantité d'acidité totale de 5,2 à 26,7 meq H/100 g et le besoin en chaux de 1,4 à 15 meq $\text{CaCO}_3/100 \text{ g}$.

TABLEAU 1 a — Résultats des analyses chimiques et physiques des sols ayant un pH (H₂O) inférieur ou égal à 5,0.Chemical and physical properties of soils with a pH (H₂O) of less or equal to 5.0.

Sols	pH (H ₂ O)	M.O.	Argile	Saturation en bases	CEC	Al éch.	H éch.	Acidité totale	Besoin en chaux (Incubation)
1	3,6	6,0	13,0	13,1	18,2	2,71	1,11	12,0	10,0
2	3,8	14,6	5,0	8,1	33,3	5,53	0,78	29,5	24,8
3	4,1	7,3	16,0	8,1	32,9	3,88	0,57	21,4	20,0
4	4,2	5,0	44,0	8,1	37,0	14,30	1,10	28,0	25,6
5	4,4	13,4	42,0	6,4	53,3	8,04	0,84	43,8	40,0
6	4,4	10,3	8,0	6,1	43,3	6,27	0,55	36,0	32,0
7	4,5	3,4	30,0	9,7	29,5	9,79	1,14	20,7	21,2
8	4,6	4,5	6,5	11,8	19,9	3,12	0,25	22,3	14,0
9	4,6	5,8	21,0	17,2	20,3	2,51	0,33	15,0	12,0
10	4,6	3,0	10,0	19,3	20,8	2,01	0,35	14,9	9,5
11	4,6	9,5	12,0	16,5	21,8	0,90	0,35	18,0	10,0
12	4,6	3,5	11,0	14,3	16,3	2,13	0,24	15,0	8,0
13	4,6	0,7	14,0	22,3	12,7	5,43	0,59	11,0	6,6
14	4,6	5,8	15,0	10,6	22,0	1,95	0,12	17,7	8,0
15	4,6	0,6	1,0	28,0	3,0	0,70	0,20	3,7	1,6
16	4,7	4,1	12,0	11,5	20,4	1,91	0,10	18,4	8,8
17	4,7	0,9	3,5	45,9	5,1	0,90	0,10	7,2	2,0
18	4,8	7,9	18,0	8,4	31,7	2,00	0,30	27,1	17,0
19	4,8	3,8	38,5	23,3	26,6	3,66	0,29	15,0	12,4
20	4,8	6,3	8,0	15,6	20,5	0,40	0,10	11,5	8,0
21	5,0	4,8	7,0	14,6	24,0	1,17	0,04	27,7	12,0
22	5,0	8,1	12,0	14,8	27,1	1,01	0,25	18,5	12,4
23	5,0	4,0	14,0	12,6	22,4	1,41	0,20	18,5	10,6
24	5,0	5,2	9,0	19,5	18,7	0,84	0,16	14,5	10,4
25	5,0	1,5	3,5	46,2	6,4	1,11	0,04	4,7	2,0

BESOIN EN CHAUX DES SOLS ACIDES

TABLEAU 1 b. — Résultats des analyses chimiques et physiques des sols ayant un pH (H₂O) supérieur à 5,0.

Chemical and physical properties of soils with a pH (H₂O) of more than 5.0

Sols	pH (H ₂ O)	M.O.	Argile	Saturation en bases	CEC	Al éch.	H éch.	Acidité totale	Besoin en chaux (Incubation)
26	5,1	8,6	18,0	12,8	30,0	0,64	0,06	24,5	17,0
27	5,1	6,4	10,5	13,3	30,0	0,84	0,12	26,7	10,2
28	5,1	10,0	7,7	17,0	21,1	0,90	0,04	16,2	10,8
29	5,1	1,0	14,0	31,2	9,0	1,01	0,16	7,6	2,8
30	5,1	2,1	22,0	32,3	20,4	1,31	0,20	9,0	4,0
31	5,2	8,5	14,5	16,0	29,5	0,86	0,24	22,1	13,6
32	5,2	5,9	15,5	23,9	20,2	0,90	0,10	13,0	8,0
33	5,2	6,4	14,0	21,5	25,9	0,20	0,04	15,5	9,0
34	5,2	6,7	14,0	23,2	21,7	0,36	0,08	11,2	9,5
35	5,2	7,4	15,0	26,4	16,9	0,20	0,06	9,7	4,0
36	5,2	1,0	8,0	45,3	6,2	0,54	0,06	6,2	2,0
37	5,3	5,0	14,5	11,2	27,9	1,31	0,14	22,2	9,5
38	5,3	4,3	8,0	17,2	20,2	0,80	0,10	17,4	11,0
39	5,3	9,5	13,5	22,5	29,6	0,12	0,02	14,8	11,4
40	5,3	3,4	20,5	13,5	25,8	1,00	0,10	19,5	6,8
41	5,3	5,5	24,5	26,4	25,1	0,08	0,02	15,2	6,8
42	5,3	3,0	22,0	24,3	18,9	0,66	0,04	13,5	6,4
43	5,3	1,9	2,0	26,9	10,5	0,60	0,14	8,0	4,0
44	5,4	5,8	4,0	13,1	26,5	1,55	0,20	24,0	13,4
45	5,4	7,7	8,5	19,6	26,2	0,66	0,14	19,7	15,0
46	5,4	2,8	15,5	13,9	24,8	0,56	0,10	15,5	6,0
47	5,4	3,0	7,5	27,3	14,5	0,74	0,18	15,0	6,6
48	5,4	1,9	10,0	24,6	12,9	0,64	0,06	11,0	4,5
49	5,4	6,3	15,5	16,6	23,2	0,90	0,10	17,5	6,0
50	5,5	12,1	14,0	18,3	30,0	0,10	0,02	23,2	12,0
51	5,5	6,1	23,5	31,8	36,2	0,10	0,02	12,7	7,6
52	5,5	4,0	10,0	23,9	20,2	0,30	0,04	13,8	4,4
53	5,5	7,8	16,0	22,4	30,4	0,10	0,02	14,7	10,0
54	5,5	3,8	6,5	26,5	14,8	0,30	0	11,8	3,0
55	5,5	0,9	8,0	48,0	7,2	0,28	0,06	5,2	1,6
56	5,6	1,0	5,5	40,0	8,0	0,20	0	7,5	1,5
57	5,8	5,0	18,0	32,0	26,3	0,08	0	7,2	2,0
58	5,9	5,0	35,5	42,4	23,0	0,06	0	7,6	1,4

Pour le premier et le deuxième groupes de sols, la moyenne du contenu en MO est respectivement de 5,6 et 5,1 %, l'argile de 15,0 et 13,8 % et la CEC de 23,5 et 21,5 meq/100 g. Ces analyses indiquent que les sols des deux groupes sont assez semblables quant à ces propriétés.

2. RELATIONS ENTRE LA MATIERE ORGANIQUE, L'ARGILE ET LES PROPRIETES D'ECHANGE DU SOL.

De très bonnes corrélations sont observées entre la capacité d'échange cationique [CEC] et la teneur en matière organique [MO] ou en argile pour les sols ayant un $\text{pH} \leq 5,0$ et $> 5,0$ (tableau 2). Toutefois, le coefficient de corrélation obtenu entre la CEC et l'argile est diminué pour les sols du deuxième groupe. La raison probable de cette diminution est une réduction de la contribution de l'argile à la CEC de ces sols, puisque HELLING *et al.* (1964) ont démontré que l'argile contribue relativement moins à la C.E.C. que la MO quand le pH du sol augmente. De plus, RUSSEL (1961) est d'avis que la formation des complexes argilo-humiques serait favorisée en sols bien pourvus en Ca échangeable. Il est possible que ces complexes soient partiellement responsables de la plus faible contribution de l'argile à la CEC du sol. L'amélioration

TABLEAU 2. — *Corrélations entre la capacité d'échange cationique (CEC), l'acidité, l'Al et H échangeables et la matière organique (MO) ou l'argile du sol.*

Correlations between the cation exchange capacity (CEC), acidity, exchangeable Al and H and the soil organic matter and clay contents.

	<i>r</i>					
	Sols ayant $\text{pH} \leq 5$		Sols ayant $\text{pH} > 5$		Tous les sols	
	n = 25		n = 33		n = 58	
	Simple	partielle	simple	partielle	simple	partielle
CEC						
vs MO	0,782**	0,856**	0,736**	0,757**	0,762**	0,810**
vs Argile	0,618**	0,757**	0,439**	0,497**	0,557**	0,659**
Acidité totale						
vs MO	0,740**	0,751**	0,606**	0,622**	0,676**	0,663**
vs Argile	0,394*	0,396*	n.s.	n.s.	0,290*	n.s.
Acidité dép. du pH						
vs MO	0,753**	0,755**	0,636**	0,650**	0,701**	0,705**
vs Argile	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Al échangeable						
vs MO	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
vs Argile	0,722**	0,709**	n.s.	n.s.	0,514**	0,501**
H échangeable						
vs MO	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,254*	n.s.
vs Argile	0,564**	0,534*	n.s.	n.s.	0,403**	0,375*

** Significatif au niveau de 1%

* Significatif au niveau de 5%

n.s. non significatif

des coefficients de corrélation partielle comparativement aux corrélations simples obtenues entre la teneur en MO ou en argile du sol et la CEC indique aussi que ces deux facteurs contribuent mutuellement à la CEC du sol.

La quantité d'acidité totale des sols étudiés augmente proportionnellement avec leur teneur en MO. La contribution de l'argile dans l'acidité totale est relativement moins importante que celle de la MO, et cette contribution devient négligeable quand le pH des sols devient plus élevé qu'environ 5,0. Etant donné qu'il n'y a pas de relation entre l'acidité dépendante du pH (acidité totale - acidité échangeable au KCl) et la teneur en argile du sol, mais qu'il y a une très bonne corrélation entre l'acidité dépendante du pH et la MO, on peut conclure que la plus grande partie de l'acidité dépendante du pH provient de la MO. Cette conclusion est confirmée par la similarité des coefficients de corrélation simple et partielle obtenus entre l'acidité dépendante du pH et la MO. L'apport moyen de la MO à l'acidité dépendante du pH est environ 274 et 273 meq/100 g de MO et représente respectivement 80 à 95 % de l'acidité totale des sols du premier et du deuxième groupes. Cette importance de la MO, comparativement à l'argile, dans l'acidité dépendante du pH est aussi indiquée par PRATT (1961) et HOYT (1977).

L'acidité échangeable (Al et H) extrait au KCl est significativement corrélée avec la teneur en argile, mais non celle de la MO, pour les sols ayant un $\text{pH} \leq 5,0$. D'après SCHNITZER et SKINNER (1964) et McLEAN *et al.* (1965), l'Al en solution peut former des complexes avec la MO du sol. L'Al retenu par ces complexes n'est plus extractable par le KCl; toutefois, cette forme pourrait être extraite avec l'acétate d'ammonium 1N pH 4,8 (PIONKE et COREY, 1967). Ceci expliquerait le manque de corrélation entre la MO et l'Al échangeable. Néanmoins, HOYT (1977) a trouvé une corrélation négative entre l'Al échangeable et la MO; toutefois, la teneur en MO des sols de son expérience variait entre 3,5 et 20,5 %, mais leur pH était effectivement semblable. Les résultats obtenus de notre expérience et de celle de HOYT confirment le modèle proposé par PIONKE et COREY qui indique qu'en sols ayant un pH constant et une concentration donnée d'Al en solution, une augmentation de la MO augmenterait la proportion d'Al complexé (probablement aux dépens de l'Al échangeable); alors qu'une hausse dans la teneur en argile accroîtrait la concentration de l'Al échangeable aux dépens de la proportion d'Al complexé. Aucune corrélation n'est trouvée entre l'argile ou la MO et l'acidité échangeable des sols ayant un $\text{pH} > 5,0$. A ces pH, l'acidité du sol provient principalement des sites d'échange dépendants du pH plutôt que des sites « permanents » (COLEMAN *et al.*, 1959; PRATT, 1961).

3. RELATIONS ENTRE LE BESOIN EN CHAUX ET QUELQUES PROPRIETES DU SOL.

Quoique le besoin en chaux, déterminé par incubation, soit négativement corrélé avec le pH du sol, ce dernier est le critère le moins bon pour prédire le besoin en chaux des sols acides (tableau 3). Ceci est attribuable au fait que le pH est seulement une mesure de l'intensité de l'acidité ionisée en solution tandis que le besoin en chaux correspond à l'acidité neutralisable jusqu'à pH 6,5 avec le CaCO_3 . L'utilisation du pH comme seul critère est généralement considérée inadéquate pour estimer quantitativement le besoin en chaux (PIERRE et SCARSETH, 1931; MEHLICH, 1942).

La concentration d'Al échangeable est reliée au besoin en chaux des sols ayant un $\text{pH} \leq 5,0$, mais non à ceux dont le pH est $> 5,0$. L'aluminium échangeable prédomine dans l'acidité d'échange, mais cette forme d'acidité existe principalement en sols ayant un $\text{pH} \leq 5,0$ et devient minime quand le pH du sol est supérieur à 5,0.

L'acidité totale est le meilleur indicateur du besoin en chaux des deux groupes de sols. Bien que l'acidité du sol déterminée par NH_4OAc (acidité pH 7,0) soit mieux corrélée avec le besoin en chaux des sols du premier groupe, cette mesure est un moins bon indice du besoin en chaux des sols du deuxième groupe. La raison probable est qu'au pH des sols du deuxième groupe, le NH_4OAc réagit moins exactement avec l'acidité du sol neutralisable par le CaCO_3 . Par contre, la relation entre l'acidité

TABLEAU 3. — *Corrélations entre le besoin en chaux et quelques propriétés du sol.*
Correlations between the lime requirement and some soil properties.

	<i>r</i>		
	Sols ayant pH ≤ 5,0 n = 25	Sols ayant pH > 5,0 n = 33	Tous les sols n = 58
pH(H ₂ O)	-0,411 *	-0,392 *	-0,550 **
Al échangeable	0,715 **	n.s.	0,710 **
Acidité totale	0,890 **	0,842 **	0,866 **
Acidité dép. du pH	0,685 **	0,844 **	0,676 **
Acidité pH 7,0	0,930 **	0,771 **	0,891 **
% MO	0,751 **	0,739 **	0,685 **
% Argile	0,576 **	n.s.	0,386 **
CEC	0,857 **	0,678 **	0,840 **

** Significatif au niveau de 1%

* Significatif au niveau de 5%

n.s. non significatif

dépendante du pH et le besoin en chaux est meilleure pour les sols du deuxième groupe que pour les sols plus acides.

L'acidité neutralisable par le CaCO₃ est liée principalement à la MO et l'argile du sol. Bien que ces deux facteurs contribuent au besoin en chaux des sols ayant un pH ≤ 5,0, seule la teneur en MO est reliée au besoin des sols moins acides. L'absence de relation entre la teneur en argile et le besoin en chaux des sols ayant le pH > 5,0 est due au fait que l'argile retient l'acidité principalement sur les sites « permanents », mais que ces sites sont généralement saturés par des bases quand le pH du sol est plus élevé que 5,0.

4. EVALUATION DES METHODES DE DETERMINATION DU BESOIN EN CHAUX.

a) Méthode d'incubation :

Les besoins en chaux déterminés par incubation sont employés comme valeurs étalon du besoin réel en CaCO₃ du sol pour obtenir un pH de 6,5. Les doses requises pour atteindre ce but sont en moyenne de 13,5 et 7,3 meq CaCO₃/100 g pour les sols du premier et du deuxième groupes respectivement, ou 10 meq pour toute la gamme de sols.

b) Méthode de DUNN :

La méthode de DUNN (1943) consiste à laisser réagir différentes quantités de Ca(OH)₂ avec le sol pendant 4 jours, pour ensuite déterminer le besoin en chaux graphiquement à partir de la relation entre le pH du sol et la quantité de base requise pour obtenir pH 6,5. Cette méthode mesure en moyenne 85 et 68 % du besoin

en chaux déterminé par incubation respectivement pour les sols du premier et du deuxième groupes (tableau 4). La quantité moyenne de calcaire estimée par cette méthode pour l'ensemble des sols étudiés est environ 83 % du besoin en chaux déterminé par incubation (figure 1). Les valeurs insuffisantes du besoin en chaux obtenues avec la méthode de DUNN sont attribuables à trois causes principales : une neutralisation incomplète de l'acidité du sol due à un temps de réaction relativement court, un effet de suspension dans la détermination du pH (VAN LIEROP et TRAN, 1979) et une carbonation rapide de l'hydroxyde ajouté au mélange sol-eau. De plus, l'acidité du sol devient graduellement plus difficile à neutraliser en augmentant le pH du sol, tel qu'indiqué par la plus petite proportion de l'acidité neutralisée par

TABLEAU 4. — Equations de régression pour ajuster les valeurs du besoin en chaux + obtenues selon les méthodes essayées (X) afin d'améliorer leur concordance avec les valeurs obtenues par incubation (Y)

Regression equations for improving the agreement between the lime requirement values obtained with the tested procedures and those indicated by incubation

Sols ayant pH ≤ 5,0		n = 25	
		r ^{††}	s _{y.x} ^{†††}
Dunn	$\hat{Y} = 1,06X + 1,33$	0,971 ^{**}	2,27
Keeney & Corey	$\hat{Y} = 0,49X + 4,81$	0,748 ^{**}	6,28
Rémy & Marin-Lafllèche	$\hat{Y} = 0,73X + 1,27$	0,870 ^{**}	4,66
Shoemaker & al.	$\hat{Y} = 1,12X - 2,42$	0,949 ^{**}	3,00
Sols ayant pH > 5,0		n = 33	
Dunn	$\hat{Y} = 1,18X + 1,36$	0,893 ^{**}	1,94
Keeney & Corey	$\hat{Y} = 0,63X + 1,46$	0,797 ^{**}	2,56
Rémy & Marin-Lafllèche	$\hat{Y} = 0,77X + 0,52$	0,720 ^{**}	2,96
Shoemaker & al.	$\hat{Y} = 1,05X - 1,30$	0,900 ^{**}	1,86
Tous les sols		n = 58	
Dunn	$\hat{Y} = 0,95X + 2,10$	0,957 ^{**}	2,18
Keeney & Corey	$\hat{Y} = 0,55X + 2,89$	0,794 ^{**}	4,59
Rémy & Marin Lafllèche	$\hat{Y} = 0,74X + 0,88$	0,870 ^{**}	3,72
Shoemaker & al.	$\hat{Y} = 1,08X - 1,74$	0,949 ^{**}	2,38

** Significatif au niveau de 1%

† En meq CaCO₃/100 g sol, pour obtenir les quantités en tonnes/ha, multiplier ces valeurs par 1,14

†† Coefficient de corrélation simple

††† Ecart-type résiduelle

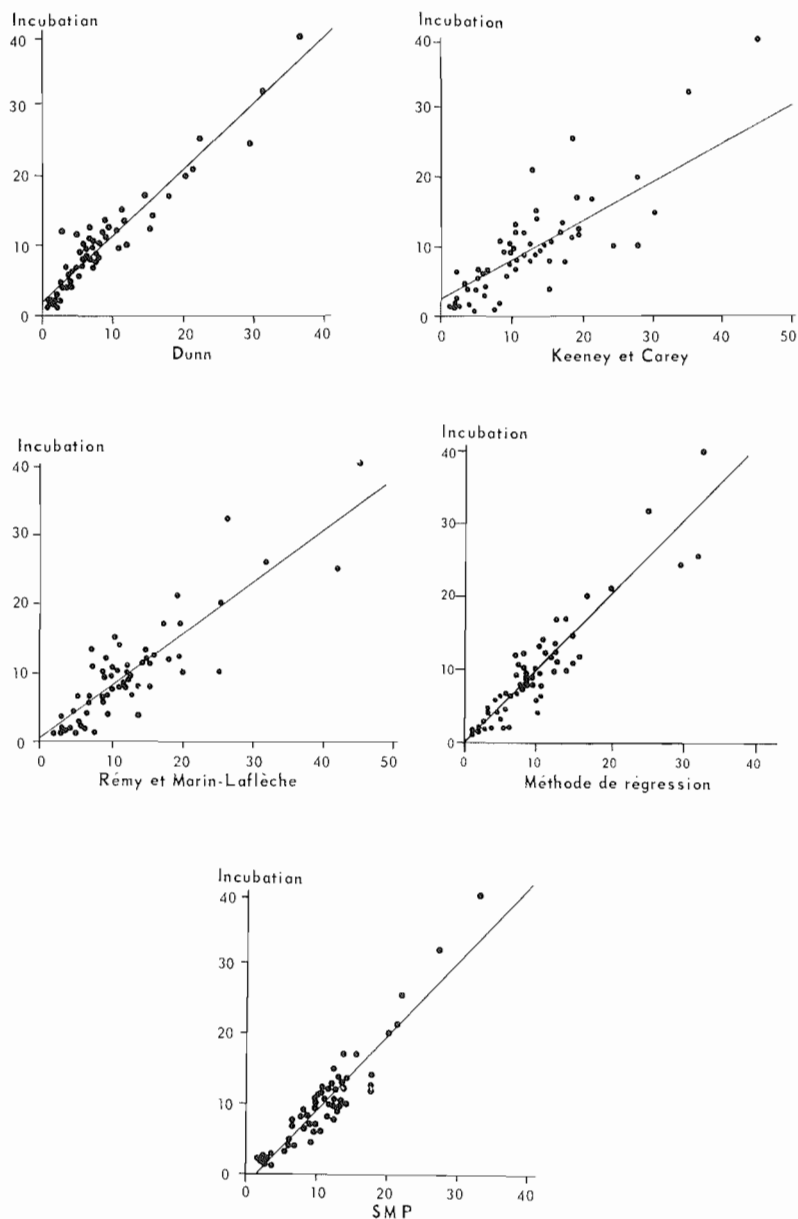


FIGURE I. — La relation entre le besoin en chaux déterminé par incubation et par diverses méthodes essayées, pour l'ensemble des sols en meq $\text{CaCO}_3/100$ g. The relationships between the incubation lime requirements (meq $\text{CaCO}_3/100$ g soil) and those measured with the various procedures tested for the combined soils of this study.

l'hydroxyde de calcium dans les sols du deuxième groupe comparativement au premier. Cependant, grâce aux bonnes corrélations obtenues entre la méthode de DUNN et celle de l'incubation, l'exactitude de la méthode de DUNN peut être améliorée en utilisant des équations de régression appropriées.

c) Méthode de KEENEY et COREY :

La méthode de KEENEY et COREY (1963) consiste à employer la fonction suivante pour déterminer le besoin en chaux des sols acides : $1,6 (\text{pH } 6,5 - \text{pH du sol}) \times (\% \text{ MO})$. Selon ces auteurs, leurs sols contenaient trop peu d'Al (acidité échangeable) pour contribuer significativement au besoin en chaux, en conséquence, cette fonction était la plus simple et la plus précise pour obtenir le besoin en chaux de ce type de sol. Dans notre expérience, les corrélations obtenues entre le besoin en chaux déterminé par incubation et par la méthode de KEENEY et COREY sont pratiquement semblables pour les deux groupes de sols. Toutefois, les sols du premier groupe contiennent une quantité appréciable d'acidité échangeable qui est ignorée par cette méthode. En incluant la teneur en argile du sol ou en Al échangeable dans une fonction pour déterminer le besoin en chaux, la précision devrait s'améliorer pour ce groupe de sols, telle qu'observée avec l'équation préconisée par REMY et MARIN-LAFLECHE ou la méthode de régression multiple.

La quantité de chaux estimée par la méthode de KEENEY et COREY est en moyenne d'environ 130 % de celle déterminée par incubation. Les quantités excessives de CaCO_3 recommandées par cette méthode pourraient être occasionnées par l'utilisation de la chaux dolomitique (moins soluble) par ces auteurs pour la calibration de leur méthode et possiblement par une réactivité différente de la matière organique des sols du Wisconsin comparativement à ceux du Québec. Quoique la méthode de KEENEY et COREY soit moins précise que les autres méthodes essayées, telle qu'indiquée par l'erreur type résiduelle relativement grande, l'exactitude de cette méthode peut aussi être améliorée en utilisant l'équation de régression appropriée.

d) Méthode de REMY et MARIN-LAFLECHE :

La méthode de REMY et MARIN-LAFLECHE tient compte de l'accroissement du pH désiré et de l'importance du complexe adsorbant du sol. La matière organique et l'argile sont les plus importantes sources de l'acidité du sol ; conséquemment, ces auteurs ont inclus ces facteurs dans l'équation suivante pour calculer le besoin en chaux : $0,02 (\text{pH } 6,5 - \text{pH } (\text{H}_2\text{O}) \text{ du sol}) (\%_{\infty} \text{ argile} + 5\%_{\infty} \text{ MO})$. Comme celle de KEENEY et COREY, cette méthode surestime le besoin en chaux, soit approximativement 123 % de la valeur moyenne obtenue par la méthode d'incubation. La contribution relative de l'argile et de la matière organique dans l'acidité du sol n'est pas constante, telle que suggérée par l'équation de REMY et MARIN-LAFLECHE, mais dépend du pH du sol (PRATT, 1961 ; HELLING *et al.*, 1964). Par conséquent, les besoins en chaux déterminés par cette méthode ne sont qu'approximatifs lorsque l'équation est utilisée pour une grande gamme de sols.

Les méthodes de REMY et MARIN-LAFLECHE et de KEENEY et COREY ont une précision comparable pour prédire le besoin en chaux des sols du deuxième groupe ; toutefois, celle de REMY et MARIN-LAFLECHE est plus précise pour les sols plus acides. L'amélioration de la précision dans la méthode de REMY et MARIN-LAFLECHE est probablement due à la considération de l'argile (sur laquelle réside l'acidité échangeable) dans le besoin en chaux des sols du premier groupe. Les valeurs trop élevées des recommandations du besoin en chaux obtenues avec cette méthode peuvent être ajustées comme dans le cas des autres méthodes, en utilisant l'équation de régression appropriée.

e) Méthode de régression multiple :

Le besoin en chaux des sols acides peut aussi être estimé en employant la méthode de régression multiple. Ces équations servent à relier les plus importantes

sources d'acidité neutralisable par le CaCO_3 avec le besoin en chaux déterminé par incubation. Les équations de régression suivantes, dérivées de nos données, sont les plus simples et parmi les plus exactes pour déterminer le besoin en chaux en meq de $\text{CaCO}_3/100$ g de sol :

Pour les sols ayant un $\text{pH} \leq 5,0$,

$$\hat{Y} = 1,59 \% \text{ MO} + 1,59 \text{ Al (meq/100 g)} - 0,74$$

$$R^2 = 87,2 \% \quad s_{y,x} = 3,45$$

pour les sols ayant un $\text{pH} > 5,0$,

$$\hat{Y} = 1,19 \% \text{ MO} + 4,18 \text{ Al (meq/100 g)} - 1,2$$

$$R^2 = 70,4 \% \quad s_{y,x} = 2,38$$

ou pour toute la gamme de sols,

$$\hat{Y} = 1,37 \% \text{ MO} + 1,8 \text{ Al (meq/100 g)} - 0,48$$

$$R^2 = 84,2 \% \quad s_{y,x} = 3,0.$$

La précision de ces équations, telle qu'indiquée par les coefficients de détermination (R^2) et les erreurs-types résiduelles ($s_{y,x}$) est supérieure à celle de KEENEY et COREY ou REMY et MARIN-LAFLECHE. L'introduction de l'Al dans ces équations au lieu de l'argile augmente leur précision pour prédire le besoin en chaux des sols. Ceci est attribuable au fait que l'Al échangeable contribue directement à l'acidité neutralisable par l'hydrolyse, tandis que la relation entre l'acidité échangeable et l'argile est moins directe. De plus, en incluant le pH ou le ΔpH comme facteurs contribuant dans le calcul du besoin en chaux, la précision de ces équations de régression n'est pas augmentée significativement.

f) Méthode tampon SMP :

La méthode de SMP consiste à utiliser le tampon préconisé par SHOEMAKER, McLEAN et PRATT (SMP, 1961) et à mesurer le pH du mélange sol-tampon après une courte période d'équilibration. Ces auteurs ont calibré le changement du pH de ce mélange en besoin en chaux. Cette méthode est la plus rapide et, exception faite de celle de DUNN, elle est la plus précise des méthodes essayées. La dose moyenne du besoin en chaux déterminée par la méthode SMP, pour toute la gamme de sols, est 109 % de la quantité de CaCO_3 indiquée par la méthode d'incubation pour obtenir pH 6,5. Les doses moyennes déterminées par la méthode SMP sont de 105 et 112 % des quantités de CaCO_3 requises par incubation respectivement pour les sols du premier et du deuxième groupes. Cette méthode a été comparée à cinq autres méthodes tampons et fut placée parmi les plus précises (TRAN et VAN LIEROP, 1981). Cependant, l'exactitude de cette méthode peut être améliorée en employant les équations de régression linéaire appropriées ou en employant l'équation curviligne suggérée par TRAN et VAN LIEROP (1981). Quand la calibration des méthodes tampons est rigoureuse, les besoins en chaux déterminés par ces méthodes tampons peuvent être plus exacts que si ces déterminations sont faites à partir des méthodes basées sur des relations indirectes entre le besoin en chaux et quelques propriétés du sol, tel que préconisé par KEENEY et COREY ou REMY et MARIN-LAFLECHE. L'exactitude accrue des meilleures méthodes tampons, comparativement aux méthodes indirectes, serait attribuable à la relation directe entre la proportion de l'acidité du sol estimée par ces méthodes et l'acidité neutralisable par le CaCO_3 .

CONCLUSION.

L'acidité échangeable contribue significativement au besoin en chaux des sols ayant un $\text{pH} < 5,0$, mais l'acidité dépendante du pH est principalement responsable de ce besoin des sols dont le pH est plus élevé. L'acidité échangeable est située prin-

cipalement sur l'argile tandis que l'acidité dépendante du pH est associée à la matière organique du sol.

La façon la plus exacte et rapide de déterminer le besoin en chaux des sols est d'employer une méthode de pH-tampon telle que suggérée par SHOEMAKER *et al.* (1961) et modifiée par TRAN et VAN LIEROP (1981). Cependant, si certaines analyses préalables du sol sont disponibles, le besoin en chaux peut être calculé par plusieurs méthodes indirectes. La précision des recommandations ainsi obtenues dépend de la relation utilisée; le choix de cette dernière serait influencé surtout par les analyses disponibles. Evidemment, la précision de ces recommandations va aussi dépendre de la parenté existant entre les caractéristiques du sol testé et celles de l'ensemble des sols utilisés dans cette étude.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur gratitude aux pédologues du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et à M. M. GAGNON pour avoir fourni respectivement un certain nombre de sols et d'analyses utilisés dans cette expérience. Nous remercions aussi M^{mes} A. SAINT-PIERRE et A. LIZOTTE pour leur contribution dans la réalisation de ce travail.

SUMMARY

LIME REQUIREMENT DETERMINATION METHODS AS RELATED TO CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF ACID MINERAL SOILS

This work had two main objectives. The first was to determine the relationships between some soil properties (pH, Al, OM, clay, CEC) with the different forms of soil acidity and lime requirement (LR) of 58 acid mineral soils from Quebec. The second goal was to ascertain the relative precision and accuracy of five LR determining methods using regression and correlation techniques. The amounts of CaCO₃ required by these soils to achieve pH 6.5, as indicated by the incubation method, were used as their actual lime requirements. The following LR tests were compared: the Ca(OH)₂ titration method of DUNN; the indirect methods of KEENEY and COREY, REMY and MARIN-LAFLECHE, and multiple linear regression; and the buffer-pH method of SHOEMAKER, McLEAN and PRATT (SMP). The titration and buffer-pH procedures strive to estimate the amount of neutralizable soil acidity with CaCO₃ to pH 6.5, while the other three methods rely upon the measurement of soil properties indirectly related to soil acidity.

*The exchangeable Al ($r = 0.722^{**}$) and H ($r = 0.564^{**}$), extracted with 1N KCl, were related to the proportion of clay in the group of soils having a pH of less or equal (\leq) to 5.0 but no such relation was found with the group of soils having a higher pH. Accordingly, the clay ($r = 0.576^{**}$) and exchangeable Al ($r = 0.715^{**}$) contents were related to the LR of the more acid but not with the less acid soil group. On the other hand, the pH dependent exchange acidity (total acidity at pH 8.0 - KCl exchangeable acidity) was not related to the clay but was with the organic matter content of soils having a pH \leq 5.0 ($r = 0.753^{**}$) and $>$ 5.0 ($r = 0.636^{**}$). Therefore, the pH dependent soil acidity was related to the LR of these groups of soils (pH \leq 5.0, $r = 0.685^{**}$; and pH $>$ 5.0, $r = 0.844^{**}$).*

*Lime requirements measured with the Ca(OH)₂ titration methods were related to the incubation requirements ($r = 0.957^{**}$), but on the average the values obtained with this method were only 83% of the quantities indicated by incubation. Although, the LR determined with the KEENEY and COREY ($r = 0.797^{**}$) related more precisely to the incubation requirements than the REMY and MARIN-LAFLECHE ($r = 0.720^{**}$) method for soils having a pH $>$ 5.0, including the clay content in the function relating the estimated to the incubation lime requirements made the REMY and MARIN-LAFLECHE ($r = 0.870^{**}$) method significantly more precise than the KEENEY and COREY ($r = 0.748^{**}$) for the more acid soils. Nevertheless, the most accurate indirect method for determining the LR was a multiple linear regression equation relating the soil organic matter content and exchangeable Al to the incubation LR. If appropriate analytical data is available, a good estimate of the LR may be obtained by using an indirect method. However, if the analytical data is not available, the LR of soils may be determined more rapidly and generally more accurately by using the SMP buffer-pH procedure. The correlation coefficient obtained between the LR values obtained with this method and the quantities indicated by incubation was 0.944^{**} . Several of the LR tests verified either under — or over — estimate the LR of soils, accordingly, regression equations are included in this paper to improve their accuracy.*

Bibliographie

- COLEMAN N.T., WEED S.B. et McCracken R.J. (1959). — Cation exchange capacity and exchangeable cations in piedmont soils of North Carolina. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 23 : 146-149.
- DUNN L.E. (1943). — Lime-requirement determination of soils by means of titration curves. *Soil Sci.* 56 : 341-351.
- ESPIAU P. et PEYRONEL A. (1977). — Acidité d'échange dans les sols. Application à une séquence altitudinale des sols du Massif du Mont Aigoual. *Science du Sol*, 1 : 25-44.
- HELLING C.S., CHESTERS G. et COREY R.B. (1964). — Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28 : 517-520.
- HOYT P.B. (1977). — Effects of organic matter content on exchangeable Al and pH-dependent acidity of very acid soils. *Can. J. Soil. Sci.* 57 : 221-222.
- HOYT P.B. et WEBBER M.D. (1974). — Rapid measurement of plant-available aluminium and manganese in acid Canadian soils. *Can. J. Soil Sci.* 54 : 53-61.
- JACKSON W.A. (1967). — Physiological effect of soil acidity. In R.W. PEARSON and F. ADAMS (ed.), *Soil acidity and liming*. *Agronomy* 12 : 43-124. Amer. Soc. of Agron. Madison, Wis.
- JORET G., MALTERRE H. et CAZABAN M. (1934). — L'appréciation des besoins en chaux des sols de limon d'après leur état de saturation en bases échangeables. *Ann. Agron.* 22 : 453-479.
- KEENEY D.R. et COREY R.B. (1963). — Factors affecting the lime requirements of Wisconsin soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27 : 277-280.
- McLEAN E.O. (1965). — Aluminium. In C.A. BLACK (ed.), *Methods of soil analysis*, Part II, *Agronomy* 9 : 985-994. Amer. Soc. of Agron. Madison, Wis.
- McLEAN E.O., REICOSKY D.C. et LAKSHMANAN C. (1965). — Aluminum in soils : VII. Interrelationships of organic matter, liming and extractable aluminum with « permanent charge » (KCl) and pH-dependent cation-exchange capacity of surface soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29 : 374-378.
- McLEAN E.O., ECKERT D.J., REDDY G.Y. et TRIEWELER J.F. (1978). — An improved SMP soil lime requirement method incorporating double buffer and quick test features. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42 : 311-316.
- MEHLICH A. (1942). — Base unsaturation and pH in relation to soil type. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 6 : 150-156.
- PEECH M. (1965). — Exchange acidity. In C.A. BLACK (ed.), *Methods of soil analysis*, Part II, *Agronomy* 9 : 910-913. Amer. Soc. of Agron. Madison, Wis.
- PIERRE W.H. et SCARSETH G.D. (1931). — Determination of the percentage base saturation of soils and its value in different soils at definite pH values. *Soil Sci.* 31 : 99-114.
- PIONKE H.B. et COREY R.B. (1967). — Relations between acidic aluminum and soil pH, clay and organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31 : 749-752.
- PIONKE H.B., COREY R.B. et SCHULTE E.E. (1968). — Contributions of soil factors to lime requirement tests. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32 : 113-117.
- PRATT P.F. (1961). — Effect of pH on the cation-exchange capacity of surface soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25 : 96-98.
- REMY J.C. et MARIN-LAFLECHE A. (1974). — L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Ann. Agron.* 25 (4) : 607-632.
- RUSSEL E.W. (1961). — Soil conditions and plant growth p. 282-290. 9th edition. Longmans, London.
- SCHNITZER M. et SKINNER S.I.M. (1964). — Organo metallic interactions in soils : 3. Properties of iron and aluminum organic matter complexes prepared in the laboratory and extracted from a soil. *Soil. Sci.* 98 : 197-204.
- SHOEMAKER H.E., McLEAN E.O. et PRATT P.F. (1961). — Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminum. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 25 : 274-277.
- TRAN T.S. et VAN LIEROP (1981). — Evaluation and improvement of buffer-pH lime requirement methods. *Soil. Sci.* 131 (3) : 178-188.
- VAN LIEROP W. et TRAN T.S. (1979). — L'acidité du sol et le besoin en chaux des sols acides. I. - Mesures du pH du sol. *Agriculture* 36 : 9-12.
- VAN LIEROP W., TRAN T.S. et GENDRON D. (1979). — L'acidité du sol et le besoin en chaux des sols acides. II. Le rôle de l'hydrogène, de l'aluminium, du manganèse et du calcium. *Agriculture* 36 : 12-15.
- WEBBER M.D., HOYT P.B., NYBORG M. et CORNEAU D. (1977). — A comparison of lime requirement methods for acid Canadian soils. *Can. J. Soil Sci.* 57 : 361-370.
- WOODRUFF C.M. (1948). — Testing soils for lime requirement by means of a buffered solution and the glass electrode. *Soil Sci.* 66 : 53-63.

