

L'échantillonnage du sol dans une parcelle expérimentale d'un verger d'agrumes.

X. PERRIER, J. GODEFROY et M. SZWARC*

L'ECHANTILLONNAGE DU SOL
DANS UNE PARCELLE EXPERIMENTALE D'UN VERGER
D'AGRUMES

X. PERRIER, J. GODEFROY et M. SZWARC

Fruits, Juin 1985, vol. 40, n° 6, p. 417-430.

RESUME - L'étude pédologique approfondie d'un verger d'agrumes permet de formuler quelques recommandations pour l'échantillonnage d'une parcelle expérimentale. Le plan d'échantillonnage systématique est préférable ; des abaques permettent d'établir pour chaque élément la relation entre la précision et le nombre de prélèvements. Lorsque plusieurs déterminations sont souhaitées, un compromis qui dépend des objectifs de l'étude doit être fixé. La faiblesse des erreurs laboratoires par rapport aux variations terrain autorise à mélanger les prélèvements élémentaires et à n'effectuer les déterminations que sur ce mélange. Toute extrapolation de ces résultats à d'autres environnements pédologiques doit être faite avec beaucoup de précautions.

Le préalable à toute étude agropédologique dans un essai agronomique est la constitution d'un échantillon de terre représentatif de la parcelle élémentaire utile. Suivant les plantes cultivées, les dimensions des parcelles varient entre des limites assez larges (1 à 30), ce qui pose à l'agropédologue un problème d'échantillonnage. A titre d'exemple, les ordres de grandeur des superficies des parcelles dans les essais «fertilisation», lesquels font le plus fréquemment l'objet d'un «suivi agropédologique», sont souvent les suivantes :

Plantes	Superficie des parcelles élémentaires utiles (en m ²)
riz, mil, sorgho, maïs,	
ananas	30
canne à sucre	70
cacaoyer, caféier	150
bananier	200
palmier à huile	1 000

Pour les agrumes, à la Station de Recherche agronomique (SRA) de l'INRA de San Giuliano (Corse), où a été réalisée cette étude d'échantillonnage, les dimensions des parcelles élémentaires utiles varient de 96 m² (4 arbres) à 288 m² (12 arbres). Ces différences dans les dimensions des parcelles sont fonction des objectifs des essais.

Avant d'entreprendre un suivi agropédologique dans les

* - X. PERRIER et J. GODEFROY - CIRAD - Département fruitier -
B.P. 5035 - 34032 MONTPELLIER CEDEX
M. SZWARC - CIRAD - Laboratoire Sols et Eaux - B.P. 5035 -
34032 MONTPELLIER CEDEX

essais au champ de la SRA, il nous a semblé indispensable de réaliser une étude de l'échantillonnage. Précisons que dans cet article, nous emploierons le terme «parcelle» dans le sens de «parcelle élémentaire utile».

OBJECTIFS DE L'ETUDE

La question «comment échantillonner» qui est posée à l'agropédologue en comporte plusieurs :

1. Combien faut-il effectuer de prélèvements élémentaires (PE) par parcelle ?
2. Quel plan d'échantillonnage adopter (systématique ou aléatoire) ?
3. Faut-il analyser séparément chaque PE ou peut-on faire des mélanges constitués de plusieurs PE, ce qui permet de réduire le nombre d'échantillons, donc le coût des analyses ?
4. Où prélever par rapport à l'arbre (ligne, interligne, distance de l'arbre) ?
5. A quelle (s) profondeur (s) ?
6. A quelles saison et fréquence ?

Les réponses aux questions 4, 5 et 6 sont surtout fonction des buts de l'étude agropédologique. Il n'y a pas de méthode «standard» ; chaque cas ou groupe de cas doit être traité spécifiquement. A titre d'exemple, la fréquence des échantillonnages sera différente suivant que l'objectif est le suivi de l'évolution à long terme d'un sol cultivé ou celui de l'évolution d'un engrais au cours d'une saison ou d'une année.

Nous nous intéressons principalement aux questions 1, 2 et 3. Elles ont une réponse d'ordre statistique : il est en effet possible, sous certaines hypothèses et pour une probabilité fixée à priori, de déterminer le nombre de répétitions nécessaires pour obtenir une précision donnée sur la variable étudiée. Ce nombre est directement proportionnel à la variabilité du caractère analysé, exprimée statistiquement en terme de variance.

Le choix de l'emplacement et du nombre de prélèvements à effectuer implique donc une connaissance des sources de variabilité.

Variabilité liée aux techniques d'analyse.

L'échantillon issu d'un PE, après homogénéisation, a une valeur certaine et unique, mais si l'on analyse plusieurs fois le même échantillon, on obtient des résultats fluctuants autour de cette valeur certaine ; l'examen de ces fluctuations permet d'estimer l'ordre de grandeur de cette variabilité.

Variabilité liée à l'hétérogénéité du terrain.

Un sol parfaitement homogène n'existe pas ; à des PE même très proches correspondent des valeurs différentes. Deux niveaux d'hétérogénéité peuvent être distingués car ils ont des répercussions différentes sur la stratégie d'échantillonnage (BEAUX et PLET, 1980 a).

- Les macro-hétérogénéités : Elles correspondent à des variations de grandes ampleurs géographiques ; elles ont en général une structure (gradients, plages, ...) liée à une pente, à un changement géologique, à l'action de l'homme, etc.

- Les micro-hétérogénéités se manifestent à des échelles beaucoup plus faibles et surtout paraissent à notre niveau de perception non structurée et aléatoire (figure 1).

Les macro-hétérogénéités, si elles sont importantes, empêchent toute stratégie d'échantillonnage préalable. Il convient d'avoir une connaissance, à priori, de leur structure et d'en déduire un plan d'échantillonnage. Le problème est plus «où prélever» que «combien prélever», le plan d'échantillonnage étant alors primordial.

Nous serons par contre dans un cas beaucoup plus favorable, si ces macro-hétérogénéités sont très faibles par rapport aux micro-hétérogénéités. Ceci peut se rencontrer sur de grandes surfaces où le sol est très homogène ou sur des sols

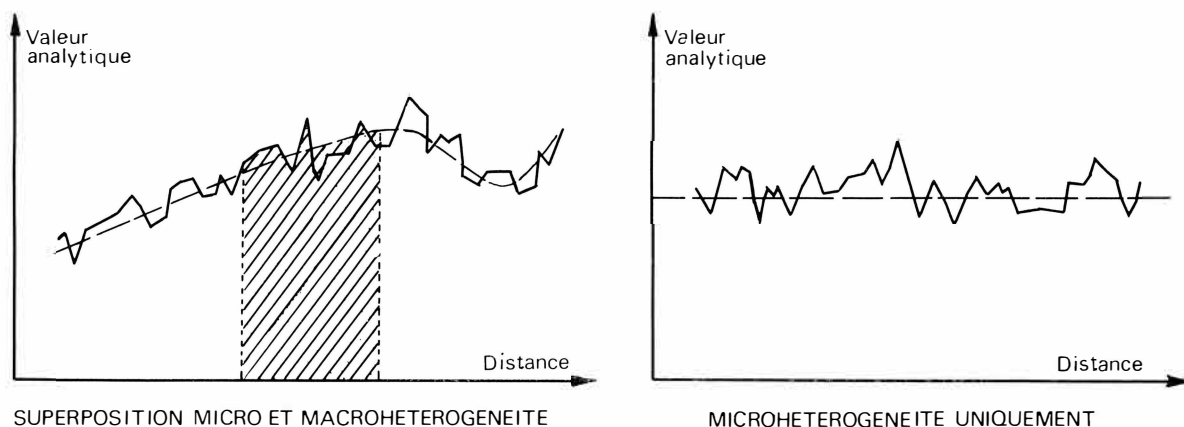


Figure 1 • EVOLUTIONS POSSIBLES DES MESURES LE LONG D'UNE LIGNE.

de moins bonne homogénéité lorsque l'on étudie des petites surfaces ; les micro-hétérogénéités sont, alors, beaucoup plus importantes que les macro-hétérogénéités (zone hachurée sur la figure 1). C'est le cas le plus fréquent lorsque l'on s'intéresse à des parcelles expérimentales.

Lors de la mise en place d'un essai agronomique, on s'efforce, en effet, de choisir des parcelles élémentaires où ces macro-hétérogénéités seront faibles.

CONDUITE DE L'ESSAI

Le site choisi est un verger de clémentiniers de 4 ans conduit selon les techniques culturales pratiquées sur la Station (travail superficiel du sol, fertilisation, irrigation, distance de plantation : 6 x 4 m, etc.). Ce site est considéré par les agronomes comme bien représentatif de l'ensemble du verger de San Giuliano. Nous préciserons que, d'après l'étude réalisée à la création de la Station, les sols de la SRA sont pédologiquement homogènes. Dans la classification française, ils se classent dans les sols fersiallitiques rouges lessivés, développés sur des alluvions anciennes (WURMIEN). D'après J. CASSIN et G. VULLIN (communication orale) le principal facteur d'hétérogénéité, à l'échelle de la Station, est l'importance des charges graveleuses et caillouteuses ; la structure de cette hétérogénéité est variable : gradients et plages.

Pour différentes raisons d'ordre agronomique, il a été décidé d'effectuer les prélèvements dans l'interligne à la limite de la frondaison des arbres, d'un côté et (ou) de l'autre. Dans la partie échantillonnée, le sol est travaillé superficiellement, avec un pulvérisateur à disques, au printemps et en été ; en automne et en hiver il est cultivé en engrais vert qui est enfoui au printemps.

Trente-six PE ont été faits à la limite de frondaison de 24 arbres ; sur 12 arbres il en a été effectué de part et d'autre de l'arbre (cf. figure 2). Les prélèvements (500 à 600 g de terre) sont faits avec une tarière HELIX de 60 mm de diamètre, entre 0-25 et 25-50 cm de profondeur. Chaque PE constitue un échantillon (dans ce cas particulier, l'échantillon n'est pas le mélange de plusieurs prélèvements), soit au total 36 x 2 = 72 échantillons. La superficie de la parcelle échantillonnée est de 1 152 m² (24 x 48 m : parcelle A).

Au laboratoire, les caractéristiques physico-chimiques ont été analysées sur divers types d'échantillons :

a) sur les 36 échantillons (PE) de chaque horizon, afin d'apprécier la variabilité totale : variation spatiale plus variation laboratoire.

b) Les 36 échantillons de l'horizon supérieur (0-25 cm) ont été analysés une deuxième fois 6 mois plus tard, dans le but de comparer les résultats entre les deux séries d'analyses.

c) Un même échantillon, mélangé avec soin, a été analysé 12 fois simultanément pour estimer l'erreur laboratoire dans une même série d'analyses.

d) Enfin, 3 échantillons ont été constitués par le mélange de 50 g de terre prélevés dans 12 échantillons :

- échantillon 12 bis : mélange des échantillons 1 à 12
- échantillon 24 bis : mélange des échantillons 13 à 24
- échantillon 36 bis : mélange des échantillons 25 à 36

Les analyses de ces 3 mélanges et des échantillons 1 à 36 (même série analytique) permettent de comparer les résultats analytiques des mélanges (échantillons 12, 24 et 36 bis) avec les moyennes calculées de chacune des séries de 12 échantillons.

e) Nous utiliserons, également, les résultats d'un échantillonnage d'une grande parcelle (684x54 m → 3,7 ha : parc. B) avec un maillage de 18 x 12 m (171 prélèvements) réalisé par J. CASSIN dans la même partie de la Station que l'étude actuelle. Ces résultats ne seront utilisés qu'à titre comparatif, les analyses ayant été faites dans un laboratoire différent et sur une profondeur légèrement différente (0-20 cm).

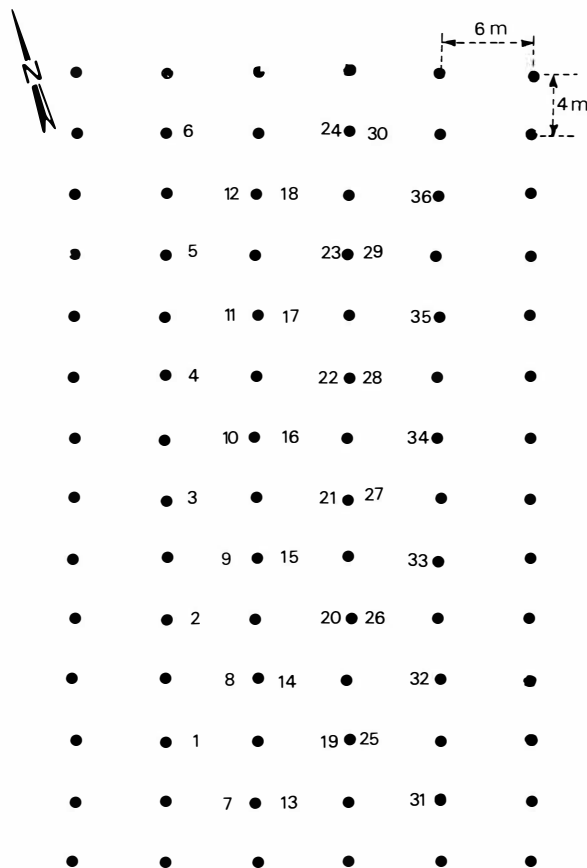


Fig. 2
DISPOSITION DES POINTS DE PRELEVEMENT.

RESULTATS

Données expérimentales.

Les histogrammes de distribution des 16 variables étudiées montrent des courbes d'allure normale pour l'horizon 0-25 cm mais beaucoup plus informes pour l'horizon 25-50 cm. Il est cependant difficile sur 36 valeurs de juger de la normalité réelle d'une distribution.

Les moyennes et les paramètres de distribution sont donnés sur le tableau 1. On remarque des variations élevées dans les teneurs des éléments chimiques, par contre les caractères physiques, ainsi que le pH et la capacité d'échange cationique sont beaucoup plus stables. Pour tous les caractères, les variations sont moins élevées dans l'horizon supérieur.

Nous nous sommes principalement consacré à l'étude de cet horizon (0-25 cm) qui est le plus modifié par la culture et les techniques culturales (GODEFROY, 1982). D'autre part, le type de distribution observé dans l'horizon 25-50 cm rend les conclusions peu fiables. Malgré ces réserves, il sera possible de tirer quelques conseils pratiques pour l'échantillonnage de cet horizon.

Variabilité spatiale et plan d'échantillonnage.

Les amplitudes de variation que l'on observe, doivent être interprétées en tenant compte de la dimension de la maille d'échantillonnage et des éventuelles variations spatiales (macro-hétérogénéité).

La zone étudiée couvre 1 152 m², avec en moyenne un prélèvement pour 32 m². Nous avons comparé ces résultats aux données de l'étude de la grande parcelle (3,7 ha) avec un prélèvement pour 216 m². Les résultats sont résumés sur le tableau 2. Pour des ordres de grandeur comparable des moyennes, les coefficients de variation ne sont que légèrement plus élevés dans la grande parcelle ; les variations sont, pratiquement, aussi grandes sur 1/10 d'hectare que sur 3,7 ha.

Le phénomène de variabilité spatiale peut être représenté par les variations le long de la plus grande dimension de la parcelle (figure 3). Certaines variables comme : phospho-

TABLEAU 2 - Moyennes et paramètres de distribution des variables observées sur 171 prélèvements (3,7 ha). Parcelle B. Horizon 0-20 cm.

	\bar{X}	extrêmes	σ	CV %
Ca	6.33	4.30 - 9.90	1.03	16
Mg	1.57	1.05 - 2.30	0.25	16
K	0.65	0.20 - 1.38	0.15	23
CEC	11.37	8.20 - 14.8	1.29	11
pH	6.09	5.70 - 6.60	0.20	3
P *	10.9	4.4 - 3.06	4.5	42
C	17.4	1.7 - 26.0	3.03	17
N	1.17	.90 - 1.52	0.17	14
A	20.8	16.0 - 24.5	1.66	8
Lf	21.7	16.2 - 32.2	2.45	11
Lg	15.3	12.5 - 17.9	1.10	7
Sf	24.1	18.0 - 30.8	2.55	11
Sg	13.0	8.8 - 19.2	2.11	16

* - Phosphore total

TABLEAU 1 - Moyennes et paramètres de distribution des variables observées. Parcelle A. (36 prélèvements élémentaires).

	HORIZON 0-25 cm				HORIZON 25-50 cm			
	\bar{X}	extrêmes	σ	CV %	\bar{X}	extrêmes	σ	CV %
Ca	5.85	4.43 - 8.84	0.93	16	5.23	3.21 - 12.57	1.51	29
Mg	1.71	1.37 - 2.37	0.24	14	2.01	1.56 - 3.13	0.41	20
K	0.43	.23 - .58	0.08	19	0.32	.15 - .52	0.09	30
Na	0.10	0.1 - 0.2	0.025	25	0.12	0.08 - 0.17	0.02	16
CEC	12.2	10.9 - 14.8	0.68	6	11.7	10.3 - 13.3	0.70	6
pH	6.36	5.85 - 7.05	0.27	4	6.21	5.73 - 7.35	0.36	6
P *	9.69	4 - 20	3.74	39	6.19	1 - 20	4.85	78
C	11.30	8.1 - 14.3	1.33	12	9.51	6.1 - 13.8	2.16	23
N	.975	.80 - 1.1	0.060	6	.839	.60 - 1.1	0.132	16
A	23.4	21 - 26	1.20	5	25.1	22.3 - 30.7	2.34	9
Lf	16.8	15 - 19	0.91	5	16.6	13.1 - 19.8	1.57	9
Lg	17.3	14 - 22	2.06	12	17.3	12.1 - 29.6	3.15	18
Sf	29.8	26 - 35	2.21	7	28.7	21.1 - 33.6	2.77	10
Sg	12.8	11 - 16	1.59	12	12.6	9.0 - 17.6	1.77	14
PF 2,5	23.54	22 - 25	0.78	3	23.81	20.8 - 27.0	1.18	5
PF 4,2	8.99	8.1 - 9.5	0.37	4	9.32	8.4 - 11.3	0.70	8

* - P assimilable

Remarque : Les méthodes d'analyses utilisées et le mode d'expression des résultats sont indiqués en annexe.

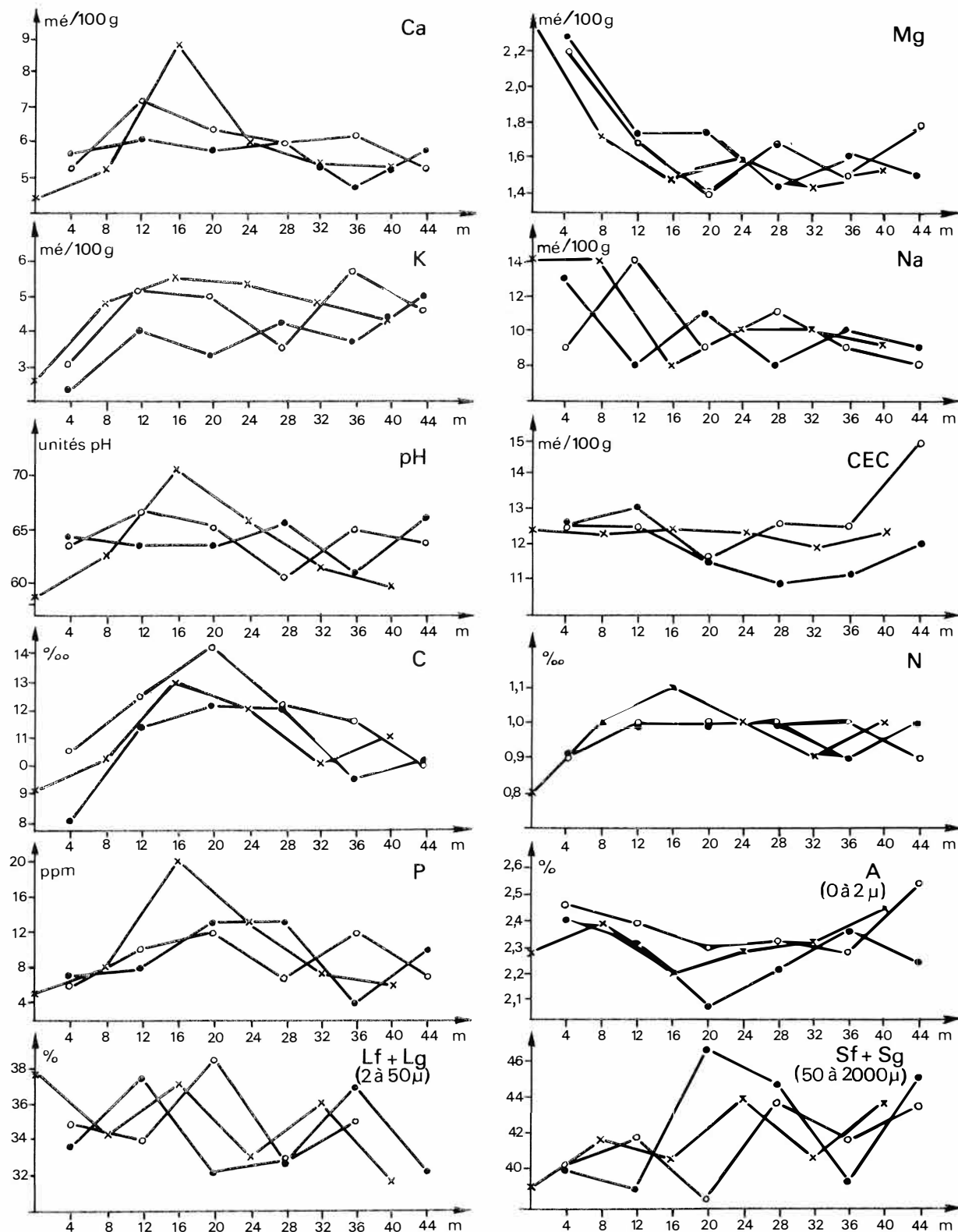


Figure 3 • VARIATIONS SPATIALES SUIVANT LA PLUS GRANDE DIMENSION DE LA PARCELLE A (44m) Horizon 0-25.

prélèvements { ● 1 à 6
x 13 à 18
○ 25 à 30

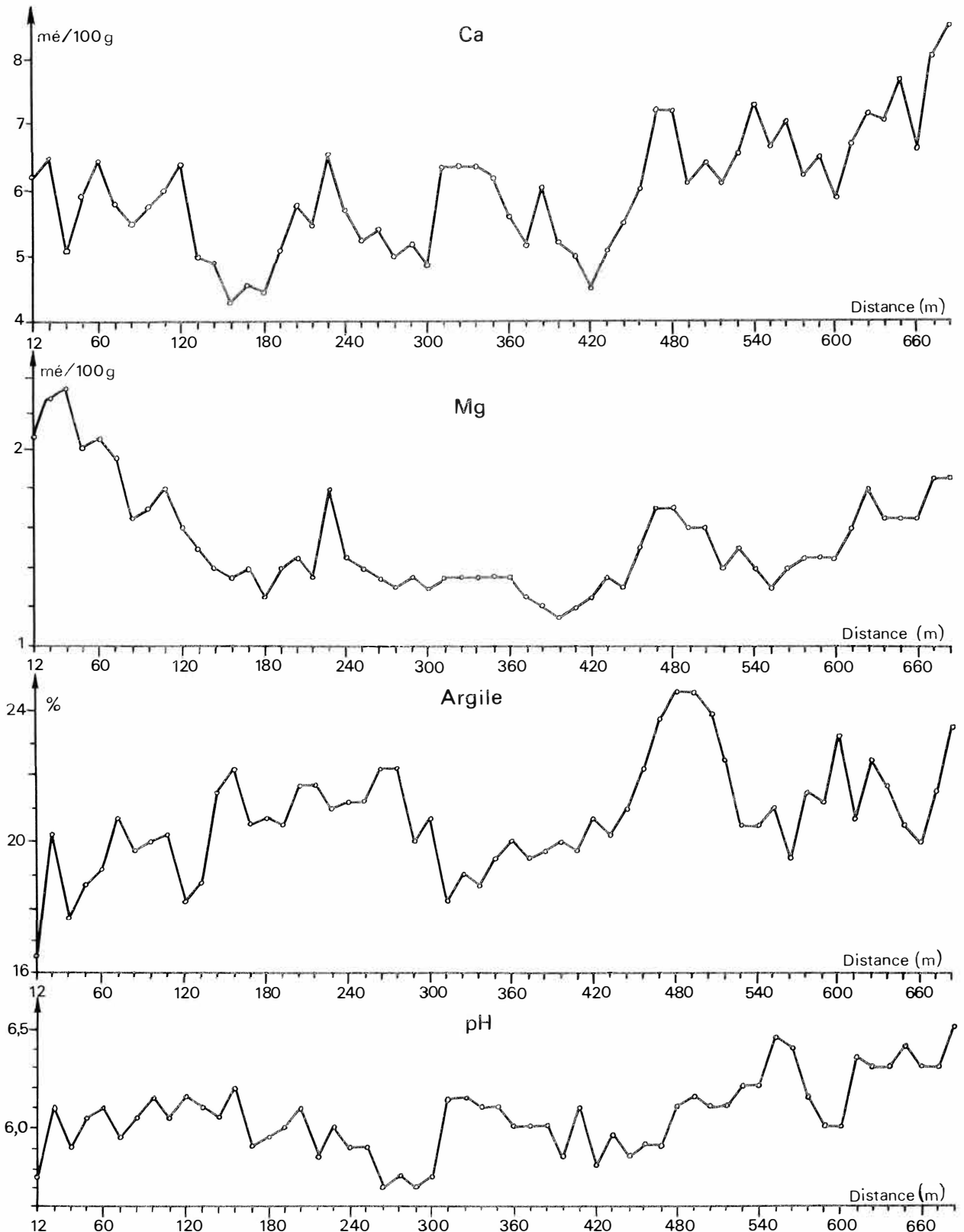


Figure 4 • VARIATIONS SPATIALES SUIVANT LA PLUS GRANDE DIMENSION DE LA PARCELLE B (684 m).

re, pH, fractions granulométriques, paraissent non structurées. Par contre, Mg, C, N présentent certains gradients en particulier dans les vingt premiers mètres à partir de la bordure sud de la parcelle. Cette même représentation pour quelques variables observées le long des 684 m de la parcelle de 3,7 ha (figure 4) montre des variations de beaucoup plus grande ampleur, schématisée pour la variable «argile» sur la figure 4.

En conséquence, il est possible pour certaines variables (ex pH), de ranger les variations observées dans la définition que nous avons donnée des micro-hétérogénéités. Ceci d'autant plus que les parcelles expérimentales sont, souvent, au moins quatre fois plus petites que la parcelle étudiée. On admet alors une répartition au hasard des hétérogénéités au sein de la parcelle ; l'échantillonnage peut être simple et complètement aléatoire.

Par contre, pour les autres variations (ex Mg), des gradients de type macro-hétérogénéité apparaissent encore à l'échelle de la parcelle de 1 152 m². Il convient pour que l'échantillon que l'on prélève soit représentatif, que toute la surface soit effectivement échantillonnée et avec une densité uniforme. Un échantillonnage complètement aléatoire, particulièrement lorsque le nombre de prélèvements est assez faible, peut ne pas répondre à ces conditions ; il nous semble donc préférable, malgré le biais mathématique que l'on peut introduire, d'adopter dans tous les cas un plan d'échantillonnage systématique.

Détermination du nombre de prélèvements.

Il est possible statistiquement, sous certaines hypothèses, et en connaissant la variabilité du caractère analysé, de déterminer le nombre de prélèvements nécessaires pour obtenir, avec une probabilité fixée a priori, un certain niveau de précision (DAGNELIE, 1970). Nous avons admis l'hypothèse de normalité des variables ; une estimation de la valeur de l'écart-type a été obtenue par les données expérimentales.

Les limites de l'intervalle de confiance de la moyenne sont :

$$\bar{X} \pm t_{1-\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \text{ ou}$$

\bar{X} et σ sont les estimations de la moyenne et de l'écart type obtenu sur l'échantillon de 36 prélèvements

n est le nombre de prélèvements

$t_{1-\alpha/2}$ est la valeur de la distribution de Student pour n - 1 degrés de liberté ; nous avons adopté la valeur 0,95 pour α , ce qui signifie que l'on peut espérer 95 fois sur cent trouver la vraie valeur de la moyenne dans les limites de l'intervalle de confiance.

Cet intervalle peut être exprimé en pourcentage de la

moyenne, on parlera alors de précision, notée : $\Delta\%$

$$\Delta\% = t_{1-\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} * \frac{100}{\bar{X}}$$

Le calcul pour chaque variable étudiée des valeurs de $\Delta\%$ en fonction de n, n variant de 2 à 40, permet de tracer les courbes de la figure 5 A. Ces courbes, d'allure comparable pour toutes les variables, peuvent être divisées schématiquement en trois parties :

1. Une décroissance très rapide pour les petits nombres de répétitions où toute augmentation de ce nombre provoque un gain en précision très important.
2. Une zone médiane où augmenter les répétitions procure un gain appréciable.
3. Une phase ralentie avec tendance vers une asymptote où l'augmentation du nombre de répétitions n'apporte plus de gain suffisant par rapport au surcroît de travail et de coût.

En pratique, le juste équilibre entre précision et coûts d'analyse se situe dans la zone de jonction entre les zones 2 et 3.

Ces courbes bien que d'allures identiques varient d'un élément à l'autre.

Pour le pH par exemple, on obtient avec 12 répétitions, une très bonne précision (3 p. 100) qu'il sera impossible d'améliorer en augmentant le nombre de prélèvements élémentaires (PE). Par contre, pour le phosphore la précision est très mauvaise, il faudrait 58 PE pour atteindre une précision de 10 p. 100 et 230 pour une précision de 5 p. 100, ce qui en pratique ne peut être qu'exceptionnellement réalisé. L'utilisation des courbes de la figure 5 comme abaque, permet de déterminer le nombre de PE nécessaires pour une précision donnée ou au contraire la précision obtenue avec un nombre de PE fixé (figure 6).

Le nombre de PE à effectuer doit donc être un compromis ; le tableau 3 donne pour chaque élément le nombre de prélèvements nécessaires pour obtenir une précision de 5, 10 ou 20 p. 100. Pour l'horizon 0-25 cm, il apparaît qu'un nombre de 12 PE pourrait être retenu ; la précision obtenue (tableau 3) ne sera supérieure à 10 p. 100 que pour K, Na et surtout P, elle sera inférieure à 5 p. 100 pour 8 caractères. Il est évident que si l'on s'intéressait, pour des raisons expérimentales, à un élément précis, il serait nécessaire d'adapter le nombre de PE à la précision souhaitée pour cet élément. On mentionnera que dans la majorité des essais de la SRA faisant l'objet d'un suivi agropédologique, les parcelles élémentaires comportent 12 arbres. Pour des raisons pratiques d'échantillonnage, il est commode de choisir un nombre de prélèvements qui soit un multiple du nombre d'arbres d'une parcelle.

L'horizon 25-50 cm étant plus hétérogène, un échantillon constitué de 12 prélèvements ne donnera qu'une pré-

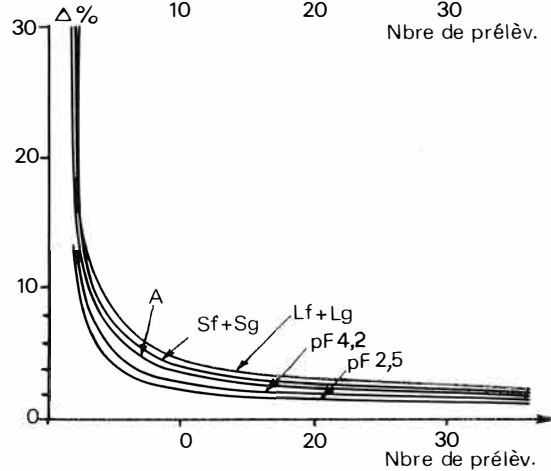
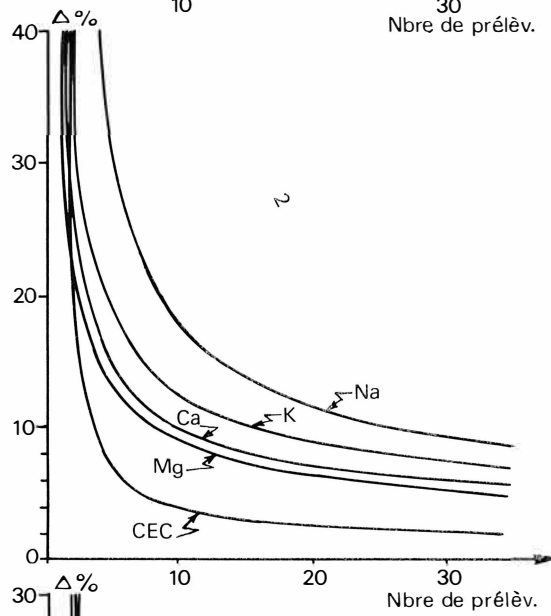
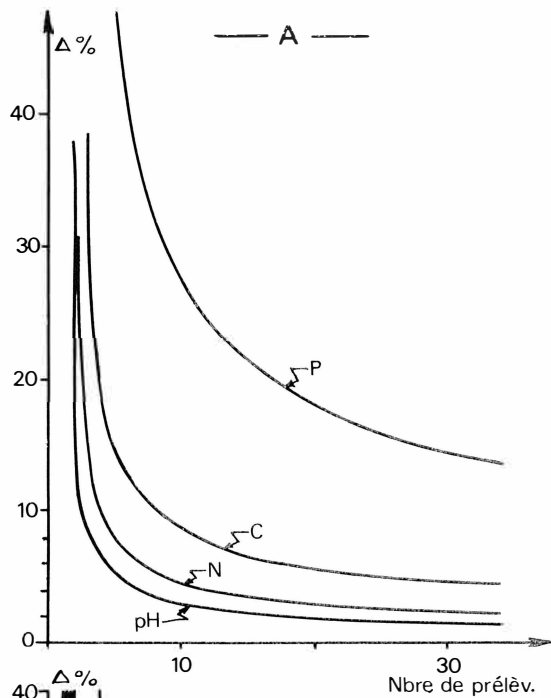


Fig. 5A • Précision calculée ($P = 0,95$) à partir de la variabilité observée sur les 36 prélèvements (horizon 0-25).

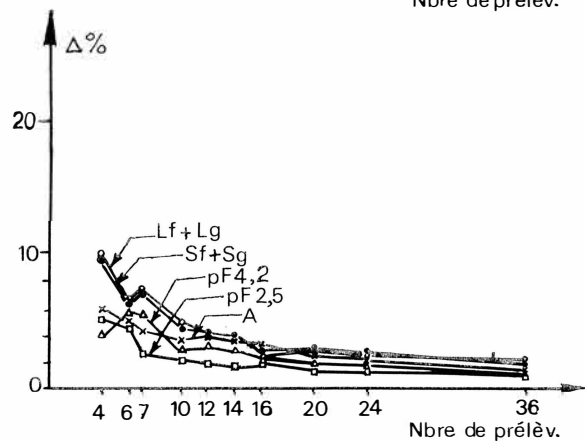
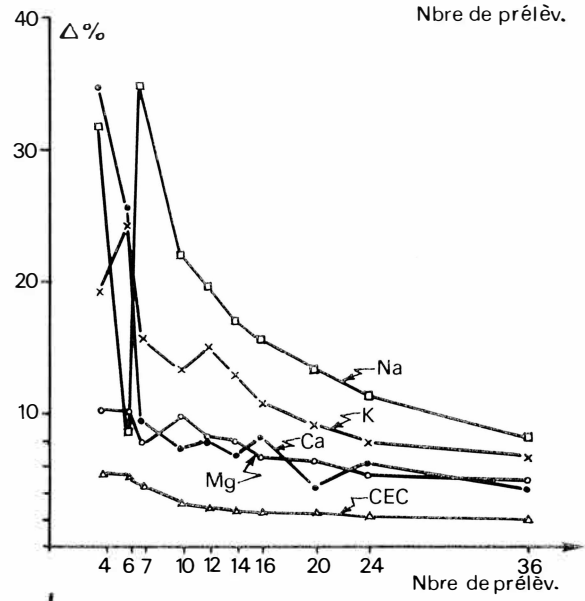
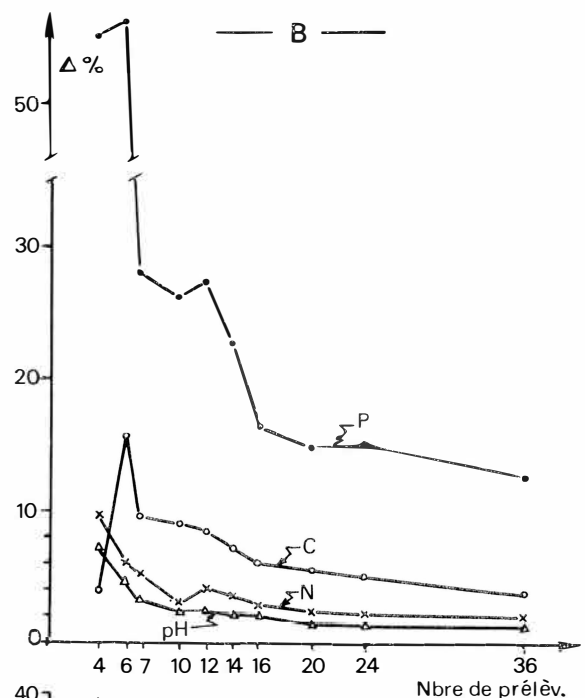


Fig. 5B • Intervalle de confiance exprimé en % de la moyenne de 4, 6, 7, ... 36 prélèvements (horizon 0-25).

TABLEAU 3 - Nombre de prélèvements nécessaires pour des précisions de 5, 10 et 20 p. 100
Précision obtenue pour 12 prélèvements (probabilité à 95 p. 100).

	HORIZON : 0-25 cm				HORIZON : 25-50 cm			
	Nombre de prélèvements nécessaires pour une précision de :			Précision obtenue pour 12 prélèvements	Nombre de prélèvements nécessaires pour une précision de :			Précision obtenue pour 12 prélèvements
	5 %	10 %	20 %		5 %	10 %	20 %	
Ca	40	12	3	10,0 %	128	32	8	18,3 %
Mg	32	10	2	8,9	63	16	4	13,0
K	61	18	3	12,6	135	34	9	17,9
Na	96	26	6	15,8	42	12	3	10,6
CEC	8	3	1	3,6	6	2	1	3,8
pH	5	3	1	2,7	6	2	1	3,7
P *	230	58	15	24,6	941	236	59	49,8
C	25	8	2	7,6	80	20	5	14,4
N	8	4	1	3,9	38	12	3	10,0
A	7	3	1	3,3	14	4	1	5,9
Lf + Lg	9	4	1	4,1	16	4	1	6,6
Sf + Sg	8	4	1	3,6	13	4	1	5,7
pF 2,5	3	2	1	2,1	4	1	1	3,1
pF 4,2	6	3	1	2,6	9	3	1	4,8

* P assimilable

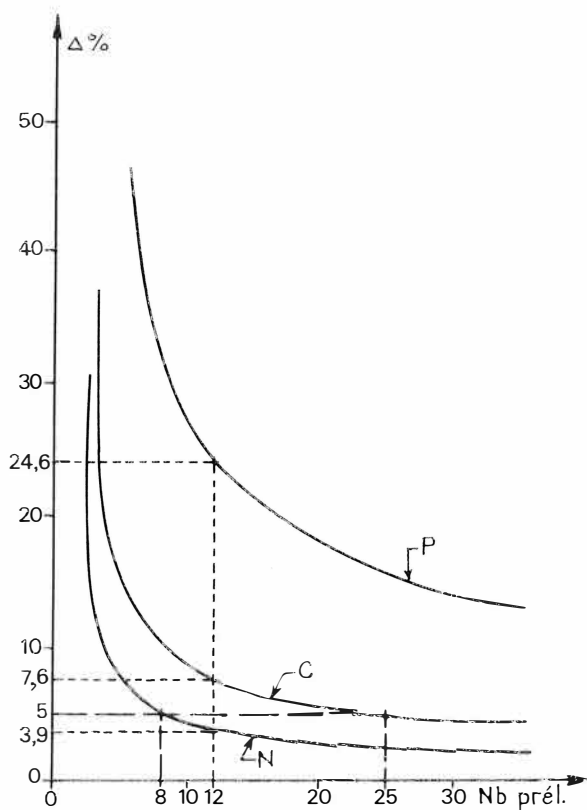


Fig. 6 • UTILISATION EN ABAQUE DES COURBES DE LA Figure 5.

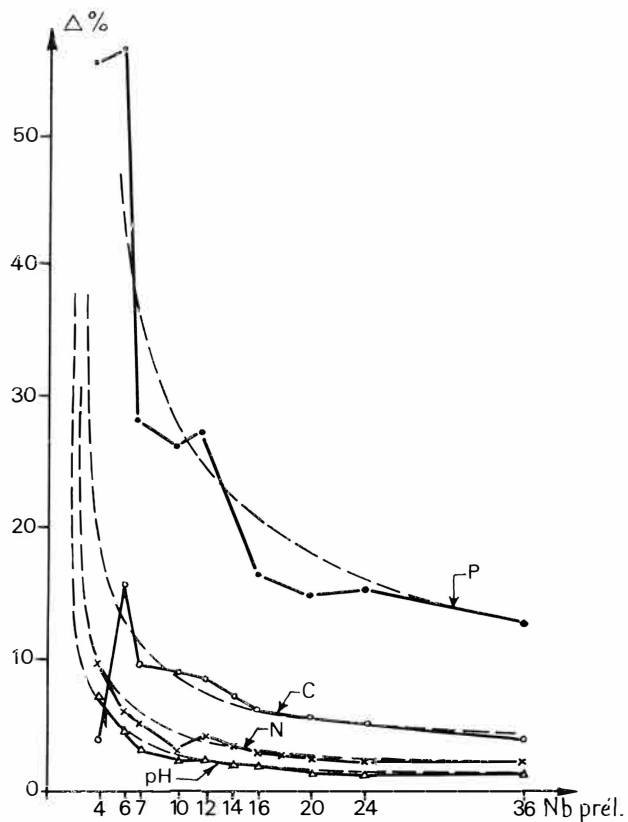


Fig. 7 • ADEQUATION DES PRECISIONS CALCULEES (ligne courbe) ET DES PRECISIONS OBSERVEES (ligne brisée).

TABLEAU 4 - Moyennes et paramètres de distribution des résultats obtenus par 12 analyses d'un même échantillon.

	Ca	Mg	K	somme des cations	CEC	coefficient de saturation	pH	P	C. org.	N total	$\frac{C.}{N}$
moyenne	4,60	1,60	0,36	6,56	11,0	60,2	6,53	4,83	10,9	1,13	9,66
Ecart-type	0,14	0,04	0,01	0,18	1,12	6,47	0,05	0,39	0,21	0,05	0,43
CV	3,1	2,5	2,2	2,7	10	11	0,7	8,1	1,9	4,3	4,5

TABLEAU 5 - Part des variations laboratoire et terrain dans la variation totale.

	VG		VL		VL/VG %	VT/VG %
C	.3.75	10-1	1.99	10-2	5,3	94,7
Mg	5.20	10-3	1.61	10-3	3,1	96,9
K	5.14	10-3	6.29	10-5	1,2	98,8
CEC	7.11	10-1	1.26		> 100	
pH	8.71	10-2	2.05	10-3	2,3	97,7
P	6.44		1.52	10-2	2,4	97,6
C	1.95		4.39	10-2	2,2	97,8
N	1.01	10-2	2.42	10-3	24	76

cision de 15 à 20 p. 100 pour les cations échangeables et de 10 à 15 p. 100 pour la matière organique (C et N). Comme pour l'horizon supérieur, la précision sera satisfaisante pour les caractéristiques physiques (3 à 7 p. 100) ainsi que pour le pH et la CEC (4 p. 100). En revanche, la précision sur P sera très mauvaise : 50 p. 100.

Nous avons calculé de plus, à partir de la parcelle échantillonnée, les intervalles de confiance à 5 p. 100 des moyennes de 4 prélèvements assurant une couverture optimale au terrain (points 9, 12, 19, 22) puis 6 (5, 7, 9, 22, 24, 32) puis 7, 12, 14, 16, 20, 24 et enfin des 36 prélèvements. Ces courbes expérimentales sont parfaitement ajustées par les courbes théoriques obtenues précédemment (figures 7 et 5 B). Cette adéquation permet de conclure à la validité du modèle théorique retenu.

ORIGINE DES VARIATIONS

Les résultats précédents concernent la variabilité totale des caractères analysés. Il peut être intéressant de connaître la part de variation induite par les erreurs d'analyse.

Variations à l'intérieur d'une série.

Cette variation est estimée par l'analyse répétée dans une même série du même échantillon (tableau 4).

Il paraît admissible, dans la fourchette de variation observée, de faire l'hypothèse simplificatrice d'indépendance entre les erreurs laboratoire et les erreurs terrain (BEAUX

et PLET, 1980 b). On peut alors écrire que la variance globale (VG) est la somme de la variance laboratoire (VL) et de la variance terrain vraie (VT).

$$VG = VL + VT$$

ou $100 = \frac{VL}{VG} + \frac{VT}{VG}$ si les rapports sont exprimés en pourcentage.

VL est estimé par les 12 répétitions d'un même échantillon et VG par l'analyse, dans la même série, des 36 prélèvements élémentaires.

Les variations laboratoires s'avèrent très faibles, comparées aux variations terrain sauf pour la CEC et l'azote (tableau 5). Les valeurs obtenues pour la CEC sont manifestement aberrantes, puisque la variation laboratoire (CV = 10 p. 100) est supérieure à la variation totale (CV = 6 p. 100). Concernant l'azote, un CV de 4,3 p. 100 pour des analyses faites dans la même série est un peu élevé ; lors d'une étude identique réalisée sur un échantillon dont la teneur en N était du même ordre de grandeur, le CV n'était que de 0,9 p. 100 (GODEFROY, 1977). Précisons que cette étude a été faite en «analyses de routine», sans attention particulière.

Conséquences.

De cette faiblesse de l'erreur laboratoire, il est possible de conclure que les variations observées entre les 36 PE sont principalement à attribuer à des hétérogénéités de terrain.

TABLEAU 6 - Comparaison sur 3 séries d'échantillons des moyennes des analyses individuelles de chaque prélèvement et des analyses des mélanges de ces prélèvements.

Prélèvement 1 à 12	Ca	Mg	K	Somme des cations	CEC	Coeffic. de saturat.	pH	P	C. org.	N. total	$\frac{C}{N}$
Moyenne	4,39	1,62	0,35	6,37	11,5	55,2	6,51	6,33	10,3	0,93	11,0
Ecart-type	0,75	0,26	0,07	0,80	0,61	5,72	0,23	2,74	1,66	0,09	1,15
Intervalle de confiance											
1 %	3,72-5,06	1,39-1,85	0,29-0,41	5,65-7,09	11,0-12,1	50,1-60,3	6,30-6,72	3,87-8,79	8,77-11,8	0,85-1,01	9,9-12,0
5 %	3,92-4,86	1,46-1,78	0,31-0,39	5,86-6,88	11,1-11,9	51,6-58,8	6,36-6,66	4,59-8,07	9,20-11,3	0,87-0,99	10,2-11,7
mélange prélev. 1 à 12	4,34	1,55	0,38	6,27	11,5	53,6	6,60	5	10,3	1,0	10,3
Prélèvement 13 à 24											
Moyenne	4,50	1,63	0,36	6,49	12,5	52,0	6,40	6,67	11,4	0,93	12,4
Ecart-type	0,71	0,22	0,07	0,60	0,71	3,52	0,38	3,03	1,22	0,11	0,98
Intervalle de confiance											
1 %	3,87-5,13	1,43-1,83	0,29-0,43	5,95-7,03	11,9-13,1	48,9-55,2	6,06-6,74	3,96-9,38	10,4-12,5	0,84-1,02	11,5-13,3
5 %	4,05-4,95	1,49-1,77	0,31-0,41	6,11-6,87	12,0-12,9	49,8-54,3	6,16-6,64	4,75-8,59	10,7-12,2	0,86-1,00	11,8-13,1
mélange prélev. 13 à 24	4,38	1,59	0,38	6,35	12,2	52,0	6,60	5	10,8	1,2	9,0
Prélèvement 25 à 36											
Moyenne	4,52	1,61	0,37	6,50	12,6	51,7	6,38	5,33	11,3	0,93	12,4
Ecart-type	0,36	0,22	0,08	0,29	0,78	4,68	0,26	1,67	1,03	0,11	1,94
Intervalle de confiance											
1 %	4,20-4,84	1,41-1,81	0,30-0,44	6,24-6,76	11,9-13,3	47,5-55,9	6,15-6,61	3,83-6,83	10,4-12,2	0,88-1,03	10,6-14,1
5 %	4,29-4,75	1,47-1,75	0,32-0,42	6,31-6,69	12,1-13,1	48,7-54,7	6,22-6,54	4,27-6,39	10,6-11,9	0,86-1,00	11,1-13,6
mélange prélev. 25 à 36	4,24	1,55	0,37	6,16	11,6	53,1	6,55	4	8,3	1,2	6,9

TABLEAU 7 - Moyenne et dispersion des mêmes échantillons (36) analysées dans deux séries différentes.

	Ca	Mg	K	CEC	pH	P	C.org	N total
Première série								
moyenne	5,85	1,72	0,43	12,2	6,37	9,69	11,3	0,98
écart-type	0,93	0,24	0,09	0,69	0,27	3,75	1,36	0,06
CV (%)	16	14	20	5,6	4,2	39	12	6,2
minimum	4,43	1,37	0,23	10,9	5,85	4,0	8,1	0,80
maximum	8,84	2,37	0,58	14,8	7,05	20,0	14,3	1,10
Deuxième série								
moyenne	4,47	1,62	0,36	12,2	6,43	6,11	11,0	0,93
écart-type	0,61	0,23	0,07	0,84	0,30	2,54	1,40	0,10
CV (%)	14	14	20	6,9	4,6	42	13	11
minimum	3,33	1,31	0,22	10,6	5,95	2,0	6,8	0,60
maximum	6,47	2,28	0,51	14,1	7,30	13,0	13,4	1,10

TABLEAU 8 - Comparaison par couple des analyses de mêmes échantillons (36) réalisées dans deux séries (test t sur les différences entre la première et la deuxième série).

	Ca	Mg	K	CEC	pH	P	C	N
moyenne	1.38	.09	.07	.00	-.06	3.58	.30	.05
écart-type	0.35	.07	.03	.99	.23	1.46	.96	.08
t	3.86	1.29	2.03	0.01	0.27	2.45	1.78	0.61

t 0,975 = 2,03

t 0,995 = 3,34

Une autre conséquence importante sur le plan pratique est la possibilité de réunir les échantillons prélevés sur la parcelle et de ne faire qu'une détermination analytique sur le mélange. Analyser chaque échantillon, puis faire la moyenne des résultats obtenus permet de minimiser les variations laboratoires ; on admet, en effet, que ces erreurs sont aléatoires et qu'en répétant la mesure elles auront tendance à se compenser. On conçoit cependant que chercher à minimiser une erreur déjà très faible, n'a que peu d'intérêt en comparaison du surcroît de travail nécessaire et du coût des analyses.

En confirmation de ces propos, il a été réalisé 3 mélanges de 12 échantillons, (cf. paragraphe Conduite de l'étude) ces mélanges étant analysés dans la même série que l'ensemble des échantillons. (tableau 6).

Les seules variables où la mesure du mélange semble peu précise sont l'azote qui présentait une variation laboratoire importante (24 p. 100) et la CEC pour le troisième mélange mais nous avons déjà évoqué le problème de la validité des résultats de cette détermination.

Variations entre séries d'analyses.

Estimer l'ampleur de ces variations nécessiterait de répéter l'analyse du même échantillon dans un nombre

important de séries. Ce type de contrôle est effectué régulièrement par le laboratoire (échantillons de références laboratoire), mais les caractéristiques physico-chimiques de ces échantillons de référence sont trop différentes pour autoriser une comparaison avec nos résultats.

Comme mentionné ci-dessus, les 36 échantillons de l'horizon 0-25 cm ont été analysés dans 2 séries différentes, à 6 mois d'intervalle (tableau 7).

On peut tester l'égalité des moyens obtenus dans les deux séries (méthode de comparaison par couple ; tableau 8).

La valeur de t observé est supérieure à la valeur au seuil de 1 p. 100 pour Ca et 5 p. 100 pour K et P ; C et Mg ont également des valeurs assez élevées. Il apparaît donc que pour plusieurs caractères, la variation introduite par le changement de série est bien supérieure à la variation due à l'hétérogénéité du terrain. Il importe donc de réaliser les analyses des différentes parcelles d'un essai dans une même série analytique.

CONCLUSION

Cette étude a permis de préciser les conditions pour réaliser un échantillonnage du sol satisfaisant dans des parcelles expérimentales d'un verger d'agrumes, afin de définir

les caractéristiques physico-chimiques du terrain ou bien faire un suivi agropédologique d'un essai. Il est évident que si la méthode d'étude décrite est généralisable, les conclusions ne doivent être extrapolées à d'autres sites qu'avec beaucoup de prudence. Dans le cas de la Station de Recherche de San Giuliano, les sols sont assez homogènes du point de vue pédologique, pour que l'on puisse adopter dans tous les essais un mode d'échantillonnage uniforme.

Un échantillonnage systématique sur toute la superficie de la parcelle est préférable à des prélèvements aléatoires. L'établissement d'un plan d'échantillonnage est facilité par la présence des arbres. Suivant leur nombre, on pourra par exemple faire un prélèvement élémentaire (PE) par arbre, ou bien 2, 3, 4, etc.

L'emplacement des prélèvements par rapport à l'arbre, ainsi que l'épaisseur de sol à échantillonner est un choix à faire par l'agronome, en fonction des objectifs de l'étude qu'il réalise. Dans ce choix, la profondeur d'exploitation du système racinaire est un facteur important à prendre en considération.

Le nombre de PE à effectuer est fonction de la précision que l'on souhaite avoir et des caractères analysés. En effet, pour un nombre de PE donné, la précision est très variable suivant qu'il s'agit de caractéristiques physiques ou chimiques et pour ces dernières suivant les éléments. Comme dans la majorité des cas, on effectue sur un échantillon de terre, un minimum de 10 déterminations, le choix du nombre de prélèvements élémentaires doit donc être un compromis. Nous avons adopté pour la SRA un nombre minimum de 12 PE.

Il faut préciser que dans le verger où a été réalisée cette étude, les engrais sont épandus sur toute la surface d'une façon très homogène (épandeur). Dans les vergers où les épandages sont réalisés manuellement, la répartition est plus hétérogène, aussi le nombre de PE doit être augmenté.

A l'échelle d'une parcelle élémentaire, l'hétérogénéité est due en grande partie à la micro-hétérogénéité ; en conséquence pour une précision donnée, le nombre de PE à effectuer est pratiquement indépendant de la superficie. Dans le cas de la SRA, il est nécessaire de faire un minimum de 12 PE que les parcelles soient de 288 m² (12 arbres) ou de 96 m² (4 arbres).

Il est possible de mélanger les PE de façon à constituer, un seul échantillon de terre par parcelle élémentaire, ce qui permet de réduire le nombre d'échantillons à analyser. Evidemment, un grand soin doit être apporté à l'homogénéisation du mélange. Les 5 à 6 kg de terre prélevés sont tamisés sur un tamis à mailles de 4 mm, puis mélangés dans un mélangeur mécanique pendant 10 minutes. Une aliquote de 3 à 600 g est prélevée avec soin (échantillonnage au plateau) pour expédition au laboratoire d'analyses.

Les erreurs «laboratoire» sont faibles (5 p. 100), par rapport aux variations «terrain» (95 p. 100), ce qui justifie d'apporter beaucoup de soins à l'échantillonnage au champ. Les erreurs «laboratoire» sont plus faibles dans une même série d'analyses qu'entre séries. Entre deux séries, et à fortiori entre des analyses faites par deux laboratoires, les erreurs sont, souvent, systématiques, d'où la nécessité d'analyser tous les échantillons d'un essai dans une même série.

Pour les études d'évolution des sols (ex. analyses annuelles), il est indispensable d'avoir un ou mieux plusieurs échantillons de référence, que l'on analysera avec chaque série. Ces échantillons doivent avoir des caractéristiques physico-chimiques identiques au sol de l'essai ; une méthode simple consiste à prendre, comme références, des échantillons du premier prélèvement (année 1).

Il est souhaitable de réaliser ce type d'étude d'échantillonnage chaque fois qu'un suivi agropédologique régulier est effectué dans des essais agronomiques. En absence de données sur l'hétérogénéité du sol, on s'assure d'une «marge de sécurité» en faisant 25 à 30 prélèvements. C'est également ce nombre que nous conseillons pour l'échantillonnage d'une parcelle (unité culturale) chez les agriculteurs. Le même ordre de grandeur (32) est recommandé par H.D. CHAPMAN (1960) pour les vergers d'agrumes.

Enfin, précisons que le mode d'échantillonnage décrit, dont le but est de constituer un échantillon moyen de terre de l'ensemble de la parcelle, n'est pas le seul utilisé en agropédologie. Pour certaines études particulières, il est préférable de prélever dans quelques profils caractéristiques plutôt que sur toute la superficie, méthode qui est aussi généralement utilisée dans les études pédologiques (cartographie par exemple).

METHODES D'ANALYSES UTILISEES AU LABORATOIRE CIRAD DE MONTPELLIER

GRANULOMETRIE.

Principe de la méthode pipette de ROBINSON automatisée (granulostat) ; dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium (méthode internationale). On détermine 5 fractions : argile (A) < 2 μ , limon fin (Lf) : 2 à 20 μ , limon grossier (Lg) : 20 à 50 μ , sable fin (Sf) : 50 à 200 μ , sable grossier (Sg) : 200 à 2 000 μ .

Prise d'essai : 10 g de terre. Résultats exprimés en p. 100.

CARBONE.

Dosage automatique au four HERMANN-MORITZ.

Principe : après combustion au four à induction, le CO₂ résultant est dosé par coulométrie à impulsion. Le CO₂ introduit dans la cellule cause une variation de pH et cette variation est annulée par des impulsions calibrées correspondant chacune à une quantité donnée de carbone.

Prise d'essai : 200 mg. Résultats exprimés en p. 1000.

AZOTE.

Méthode de minéralisation (KJELDAHL) ; dosage de NH₄ par colorimétrie automatique par la méthode de BERTHELOT modifiée.

Prise d'essai : 750 mg. Résultats exprimés en p. 1000.

CATIONS ECHANGEABLES.

Extraction à l'acétate d'ammonium N à pH 7 ; dosage des cations par spectrophotométrie d'absorption atomique (Ca, Mg) et d'émission de flamme (K, Na).

Prise d'essai : 10 g. Résultats exprimés en mé/100 g de terre.

CEC.

Déplacement de NH₄ de l'acétate d'ammonium par le chlorure de sodium ; dosage de NH₄ par colorimétrie automatique.

Prise d'essai : 10 g. Résultats exprimés en mé/100 g de terre.

pH.

Sur pâte saturée d'eau (pH mètre).

Prise d'essai 50 g.

P. TOTAL.

Attaque perchlorique ; dosage par colorimétrie automatique (bleu de molybdène).

Prise d'essai : 1 g. Résultats exprimés en ppm de P.

P. ASSIMILABLE.

Méthode DYER (acide citrique à 2 p. 100) ; dosage idem P total.

Prise d'essai : 10 g. Résultats exprimés en ppm de P.

BIBLIOGRAPHIE

- BEAUX (M.F.) et PLET (P.). 1980 a.
L'échantillonnage d'un sol en vue de son analyse chimique.
Doc. ITCF, mai 1980, 17 p.
- BEAUX (M.F.) et PLET (P.). 1980 b.
L'échantillonnage d'un sol.
Revue Perspectives agricoles, n° 43, p. 44-47.
- CHAPMAN (H.D.). 1960.
Leaf and soil analysis in Citrus orchards.
University of California - Division of Agricultural Sciences, Agricultural Publications, 207 University Hall - Berkeley 4, California.
- DAGNELIE (P.). 1970.
Théorie et méthodes statistiques (vol. 2).
Presses agronomiques de Gembloux, Ed. J. Duculot, Gembloux.
- GODEFROY (J.). 1977.
Précision des analyses pédologiques.
Fruits, 32 (1), p. 9-14.
- GODEFROY (J.). 1982.
Etude agropédologique de l'essai «techniques culturales».
Commentaire des résultats des analyses de terre.
Doc. IRFA, ref. Service Archives n° 1044.