

Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale

K. Djili, Y. Daoud et N. Ayache

I.N.A., département de science des sols, 16200 El Harrach, Alger

RÉSUMÉ

Une banque informatisée des données pédologiques a été réalisée utilisant le logiciel STIPA. Elle est constituée de 1 116 profils types répartis sur l'ensemble du Nord de l'Algérie. Les calculs montrent que 70 à 80 % des sols sont moyennement à faiblement pourvus en calcaire. Les horizons de profondeur sont plus calcaires que les horizons de sub-surface ou de surface. La spatialisation de 5 classes de calcaire a été réalisée par le logiciel Arc/info. Il en ressort que les faibles teneurs en calcaire sont principalement identifiées dans la frange nord du pays et dans les horizons de surface, et que les teneurs les plus élevées concernent surtout l'intérieur du pays et les horizons de profondeur. Les teneurs moyennes semblent se distribuer indifféremment sur l'ensemble du Nord de l'Algérie et dans le profil. Les calculs statistiques confirment que les teneurs en calcaire sont fortement corrélées avec la latitude; par contre, la longitude n'a aucun effet sur leur distribution. La distribution verticale et spatiale des teneurs et des formes d'accumulation du calcaire est liée à la répartition des pluies.

Mots clés

Calcaire, banque de données, spatialisation, pluies, latitude, longitude

SUMMARY

VERTICAL AND SPATIAL DISTRIBUTION OF CALCIUM CARBONATE IN THE SOILS OF NORTHERN ALGERIA

A whole bank of computerized pedological data has been compiled through the STIPA software. It is made up of 1 116 typical profiles spread over the whole of northern Algeria. The calculations show that from a general point of view, the soils of the north of Algeria have a low to moderate calcareous content. The deeper horizons are more calcareous than those of sub-surface or surface. The spatialization in five calcareous classes was carried out by the Arc/info software. The results show that the soils with low calcareous contents are localized preferentially in the northern fringe of the country and in the surface horizons. On the other hand, the highest contents occur above all in the interior of the country as well as in deeper horizons. The average content seems to be spread indifferently over the whole of northern Algeria and in the whole profile. The statistical calculations confirm that latitude is strongly correlated with calcareous content. However longitude has no effect on the distribution of calcareous rates. The vertical and spatial distribution of the calcareous indicates that the calcareous rates and forms is highly linked to the amount of rainfall.

Key-words

Calcareous, soil data bank, spatialization, pluviometry, latitude, longitude.

RESUMEN

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN VERTICAL Y ESPACIAL DEL CALCARIO EN LOS SUELOS DEL ARGELIA SEPTENTRIONAL

Un banco informático de datos pedológicos fue realizado por medio del programa STIPA. Está formado de 1 116 perfiles típicos que se reparten sobre la totalidad del Norte de Argelia. los cálculos muestran que de 70 a 80 % de los suelos están de mediana a ligeramente provistos en elementos calcáreos. Los horizontes de profundidad son más calcáreos que los horizontes de sub-superficie o de superficie. La espacialización de 5 clases de calcáreos fue realizada por el programa Arc/info. Se muestra que los contenidos ligeros en calcáreos se identifican principalmente en la franja norte del país y en los horizontes de superficie, y que los contenidos más elevados conciernen sobre todo al interior del país y los horizontes de profundidad. Los contenidos medios parecen distribuirse en la totalidad del norte de Argelia y en el perfil. Los cálculos estadísticos confirman que los contenidos en calcáreos están fuertemente correlacionados con la latitud; por el contrario, la longitud no tiene ningún efecto sobre su distribución. La distribución vertical y espacial de los contenidos y de las formas de acumulación del calcáreo muestra una relación con la repartición de las lluvias.

Palabras claves

Calcáreo, bancos de datos, espacialización, lluvias, latitud, longitud.

Le carbonate de calcium, cristallisé sous forme de calcite à symétrie rhomboédrique, est le constituant essentiel des calcaires (De Os Horta, 1979). Le calcaire est une roche sédimentaire principalement organogène qui peut être d'origine détritique ou chimique (Vatan, 1967; Lozet et Mathieu., 1990). Dans le sol, il peut provenir de l'altération de la roche mère (Ruellan, 1976) ou de la précipitation de carbonate de calcium secondaire (Ruellan, 1971; Duchaufour et Souchier, 1977).

Par ailleurs, de nombreux auteurs se sont intéressés aux processus de formation de ces accumulations calcaires dans les sols (Boulaine, 1961; Durand, 1963; Briot, 1976; Millot et al., 1977; Noureddine, 1979; Ruellan, 1980; Pouget, 1980a; Vogt, 1984; Halitim, 1988; Benmati, 1993). Ainsi, deux hypothèses génétiques sont avancées pour expliquer les accumulations calcaires dans les sols : la genèse pédologique (Boulaine, 1961; Ruellan, 1971; Pouget, 1980b; Halitim, 1988), ou la genèse sédimentaire (Gaucher, 1948; Vogt, 1984).

Les formes d'accumulations calcaires dans les sols ont fait l'objet de nombreux travaux (Durand, 1959; Belouam, 1976; Vogt, 1984; Mathieu et al., 1976). Ainsi, le calcaire dans le sol peut se trouver sous trois formes principales : diffuses, en concentrations discontinues (pseudomycelium, amas friables, nodules) ou en concentrations continues (croûtes, dalles, pellicules rubanées) en fonction des facteurs du milieu. D'après Ruellan (1971, 1976) et De Os Horta (1979), les formes d'accumulations calcaires dans le sol se distribuent similairement du bas vers le haut du profil et de l'aval vers l'amont du paysage. Le passage progressif s'opère des distributions diffuses vers les distributions discontinues et ensuite aux distributions continues; le même phénomène s'observe également à l'échelle du Quaternaire en fonction de l'âge de la surface sur laquelle le sol se développe.

En ce qui concerne les sols calcaires en Algérie, bien que de nombreuses études aient été réalisées (Aubert, 1947; Gaucher, 1948; Durand, 1953, 1956, 1959; Boulaine, 1957, 1961; Thibout, 1974; Charles, 1976; Ballais et Vogt, 1979; Tihay et Vogt, 1979; Vogt, 1979; Pouget, 1980a; Djili, 1983; Bock, 1984; FAO, 1988; Halitim, 1988; Ayache, 1996), leur distribution spatiale et la répartition du calcaire dans le profil sont encore peu connues.

L'objectif du présent travail est de valoriser les études pédologiques disponibles sur les sols du Nord de l'Algérie à partir d'une banque informatisée des données pédologiques et en utilisant un système d'informations géographiques (Girard et al., 1989; Schwartz et al., 1997; Walter et al., 1997).

A partir de l'exploitation de la banque de données, et selon une approche statistique simple (structure des classes de taux de calcaire par horizon) et une visualisation cartographique (cartogrammes thématiques des différentes classes des taux de calcaire dans les différents horizons du sol), ce travail tente-

ra de caractériser la variabilité verticale et spatiale des teneurs et des formes en calcaires des sols à l'échelle du Nord de l'Algérie. Par la suite, l'influence de la répartition des pluies sur la distribution du calcaire dans les sols sera étudiée pour évaluer l'éventuelle dynamique actuelle de ce sel dans les sols.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le matériel d'étude

Le choix de la variable calcaire total se justifie par le fait que :

- Sa détermination au laboratoire à l'aide de la méthode volumétrique au calcimètre est très simple et la donnée est fiable à l'exception des faibles teneurs.

- C'est l'une des variables les mieux renseignées de la banque (81 % pour les horizons de surface et de sub-surface et 70,8 % pour les horizons de profondeur) (Djili et Keslani, 1995).

- Les différents systèmes de classification des sols (U.S.D.A., 1992; C.P.C.S., 1967; A.F.E.S., 1995) lui accordent une place de choix pour caractériser les horizons ou les types de sols. Son taux et sa forme dans le sol constituent des critères privilégiés de cartographie.

La banque de données est créée moyennant l'utilisation du logiciel STIPA (Bertrand et al., 1985; Bonneric et al., 1985). Elle est constituée de 1116 profils types décrits et analysés. Ces profils, représentatifs d'unités de sols, ont été extraits à partir de plus de 60 études cartographiques réalisées au Nord de l'Algérie durant les 25 dernières années. Les échelles des études s'inscrivent entre le 1/20 000 et le 1/50 000 pour la majorité d'entre elles. Bien que toutes les régions du Nord de l'Algérie soient représentées, la distribution des profils y est irrégulière (figure 1). Nous sommes donc en présence d'un échantillonnage aléatoire simple qui "permet d'effectuer une estimation non biaisée de la composition taxonomique ainsi que d'établir un intervalle de confiance pour l'estimation des paramètres des données pédologiques de type quantitatif" (Nolin et Caillier, 1992). Forbes et al. cités par Nolin et Caillier (1992) le recommandent pour quantifier la fiabilité des cartes pédologiques.

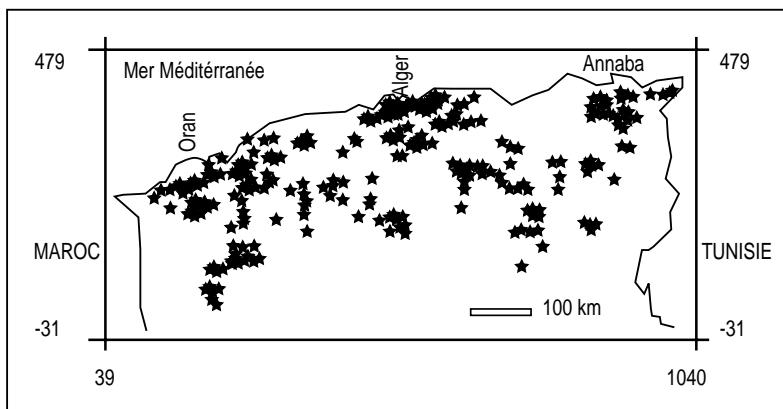
Démarche méthodologique

La démarche méthodologique se focalise sur deux objectifs principaux :

- ζ Faire ressortir la structure des taux de calcaire dans les sols. Cette étape a consisté à scinder le fichier mère en plusieurs sous-fichiers représentant chacun un type d'horizon du profil (horizons de surface H1, de sub-surface H2, et de profondeur Hp). Les calculs statistiques réalisés ont pour objectifs essentiels de faire ressortir la structure du taux de calcaire en fonction de la

Figure 1 - Carte de localisation des profils étudiés

Figure 1 - Map of profiles studied



position de l'horizon dans le profil et de montrer dans quelle mesure il est corrélé avec la latitude, la longitude, et les hauteurs des précipitations. Les tests de signification sont calculés pour une probabilité de 95 %.

ζ Spatialiser les données pédologiques à travers le Nord de l'Algérie en utilisant le logiciel ARC/info sous PC. Les requêtes et la composition des cartes ont été réalisées :

- pour les teneurs en calcaire sur la base de 5 classes de teneurs, sans préjuger des formes d'accumulations calcaires (Lozet et Mathieu, 1990) : C1 : • 2% (trace), C2 : 2 à 10 % (faible), C3 : 10 à 25 % (moyenne), C4 : 25 à 50 % (forte) et C5 : supérieure à 50 % (très forte).

- pour les formes d'accumulations calcaires, sur la base de 3 formes (Ruellan, 1976) : diffuses, discontinues, continues.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La structure des teneurs en calcaire

Cette étude a porté sur 3132 horizons calcaires dont 914 de surface, 905 de sub-surface et 1313 de profondeur. Les résultats obtenus révèlent que, quelle que soit la position de l'horizon dans le profil, les teneurs en calcaire total sont très variables. En effet, le calcaire peut se trouver à l'état de traces (0,1 %), comme il

Tableau 1 - Structure des taux de calcaire dans les horizons

Table 1 - Structure of calcareous rates in horizons

Centiles	surface	sub-surface	profondeur
75 % tile	24,3	27,0	31,0
50 % tile	15,5	17,0	20,5
25 % tile	6,4	7,1	11,0
moyenne %	17,0	19,4	22,9

peut constituer l'essentiel de la matrice de l'horizon (> 90% de calcaire).

Le calcul des centiles (tableau 1) montre que 70 à 80 % des sols du Nord de l'Algérie sont moyennement à faiblement pourvus en calcaire. En effet, 75 % des horizons de surface (H1) ont des teneurs en calcaire inférieures à 24,3 %, 50 % ont des teneurs inférieures à 15,5 % et 25 % ont des teneurs inférieures à 6,4 %. Ces résultats sont respectivement de 27, 17 et 7,1 % pour les horizons de sub-surface (H2) et de 31, 20,5 et 11 % pour les horizons de profondeurs (Hp). Ils montrent que les accumulations calcaires deviennent de plus en plus importantes en fonction de la profondeur. Ceci est confirmé par le calcul de la moyenne qui passe de 17 % de calcaire dans les horizons de surface à 19,4 % dans les horizons de sub-surface et à 22,9 % dans les horizons de profondeur.

Les différences des moyennes entre les horizons pris deux à deux sont toutes significatives (tableau 2). Les taux de calcaire sont donc statistiquement différents selon leur localisation dans le profil.

Spatialisation des teneurs en calcaire

Distribution latérale et verticale des teneurs en calcaire

L'un des principaux objectifs de cette étude est de réaliser à l'aide d'un SIG (Arc/info) des cartogrammes thématiques pour chaque classe de calcaire et pour chaque catégorie d'horizons. Les taux de calcaire ayant été divisés en 5 classes, et le nombre d'horizons étant de trois (H1, H2 et

Tableau 2 - Comparaison des moyennes des taux de calcaire des horizons étudiés

Table 2 - Mean comparison of the calcareous rates in the studied horizons

t-test	H1 et H2	H1 et Hp	H2 et Hp
t	3,46	8,67	4,86
p	0,0005	0,0001	0,0001
signification	*	*	*

* : corrélation significative ; ns : corrélation non significative

Hp), en croisant 5 classes et 3 horizons, nous avons obtenu 15 cartogrammes thématiques (figure 2). L'observation de cette figure permet de faire les constats suivants :

- Les teneurs très faibles (C1) se localisent préférentiellement dans la frange littorale du pays, particulièrement dans la région algéroise. Le nombre d'horizons très faiblement calcaires décroît du haut vers le bas du profil.

- Les teneurs faibles (C2) se distribuent de la même façon que les teneurs très faibles. Cependant, elles concernent une frange du territoire plus large que celle des teneurs très faibles.

- Les teneurs moyennes (C3) semblent être uniformément réparties sur l'ensemble du Nord de l'Algérie. La densité des points montre clairement que sa distribution est homogène dans le profil.

- Les teneurs fortes (C4) se localisent davantage dans les zones intérieures du pays, c'est à dire dans les régions du centre et du sud de l'Algérie septentrionale. Elles ont tendance à affecter les horizons de profondeur.

- Les très fortes teneurs (C5) se situent essentiellement dans les zones intérieures et concernent surtout les horizons de profondeur.

L'ensemble de ces observations montre que les faibles teneurs en calcaire (C1 et C2) concernent surtout les horizons de surface et ensuite les horizons de sub-surface. Par contre, les taux moyens de calcaire (C3) sont les plus fréquents et sont uniformément répartis dans l'ensemble du profil. La classe des très fortes teneurs (C5) est la moins bien représentée, elle se localise particulièrement dans les horizons de profondeur des profils situés dans les zones intérieures du pays. Cependant, le nombre des horizons n'étant pas le même en surface, en sub-surface et en profondeur, l'interprétation visuelle (verticale) risque d'être biaisée. De même, l'échelle de ces cartogrammes étant trop petite par rapport aux échelles de départ, plusieurs profils paraissent confondus et donc non décelables sur le présent document. Pour résoudre ce problème, nous avons réalisé des histogrammes de fréquence (figures 3 et 4) qui permettent une comparaison plus aisée entre les différents cartogrammes en mettant en évidence les faits suivants :

- Pour les teneurs très faibles (C1) et faibles (C2) en calcaire, nous constatons une diminution des fréquences des horizons du haut vers le bas du profil

- Les teneurs moyennes (C3) sont réparties d'une façon homogène dans le profil.

- Les fortes (C4) et très fortes teneurs (C5) en calcaire sont inversement distribuées par rapport aux teneurs faibles. En effet, nous remarquons qu'elles ont tendance à se localiser préférentiellement dans les horizons de profondeur.

Ces observations mettent clairement en évidence que les horizons de surface sont généralement moins calcaires que les horizons de sub-surface et de profondeur.

Les résultats obtenus montrent également qu'environ 40 % des horizons étudiés sont moyennement pourvus en calcaire (C3). Cette classe est de loin la plus répandue dans les sols du Nord de l'Algérie. A l'inverse, les horizons très fortement calcaires (C5) sont les moins représentés. En effet, par rapport à l'ensemble des horizons étudiés, cette classe ne concerne que 2 % des horizons de surface, 5 % des horizons de sub-surface, et 8 % des horizons de profondeur. Les horizons dont les teneurs en calcaire sont faibles (C2) à très faibles (C1) concernent 35 % des horizons de surface, 31 % des horizons de sub-surface et 23 % des horizons de profondeur. Les teneurs fortes (C4) intéressent entre 19 et 23 % des horizons selon leurs positions dans le profil. La figure 4 montre que la structure des fréquences des différentes classes de calcaire est, au détail près, identique entre les horizons de sub-surface et de profondeur avec par ordre décroissant : $C3 > C4 > C2 > C1 > C5$.

Au niveau des horizons de surface, nous enregistrons une seule différence par rapport au classement précédent. En effet, le classement obtenu est le suivant : $C3 > C2 > C4 > C1 > C5$.

Recherche des facteurs de distributions des teneurs en calcaire

Il s'agit d'évaluer à l'aide de calculs statistiques simples la distribution des teneurs en calcaire en fonction de la latitude, de la longitude, et de la répartition des hauteurs des pluies. Le but de cette évaluation est de tenter de mettre en évidence dans quelle mesure le profil calcaire serait lié au climat actuel.

Distribution selon la latitude

Les résultats obtenus montrent une grande similitude entre la variance de la latitude avec celle de la teneur en calcaire pour les trois types d'horizons. Les données statistiques (tableau 3) suggèrent que la latitude a une influence significative sur la distribution des teneurs des sols en calcaire.

Distribution selon la longitude

Les droites de régression linéaire présentent des pentes et des coefficients de corrélation très faibles (tableau 4) qui laissent penser que la longitude n'a pratiquement aucun effet sur les variations globales des teneurs en calcaire des sols du Nord de l'Algérie.

Cependant, la recherche d'un meilleur ajustement curvilinéaire fait ressortir une liaison plus intense entre la longitude et les taux de calcaire avec des valeurs de coefficients de corrélation r compris entre 0,187 et 0,254; ce qui permet de supposer que le calcaire ne se distribue pas de la même façon d'Ouest en Est.

L'ensemble de ces résultats permet d'avancer que la répartition des horizons pour chacune des classes de calcaire semble être homogène d'Est en Ouest. Par contre, l'accumulation calcaire est bien corrélée avec la latitude et semble être liée au climat.

Figure 2 - Spatialisation latérale et verticale des taux de calcaire
Figure 2 - Lateral and vertical spatialization of calcareous rates

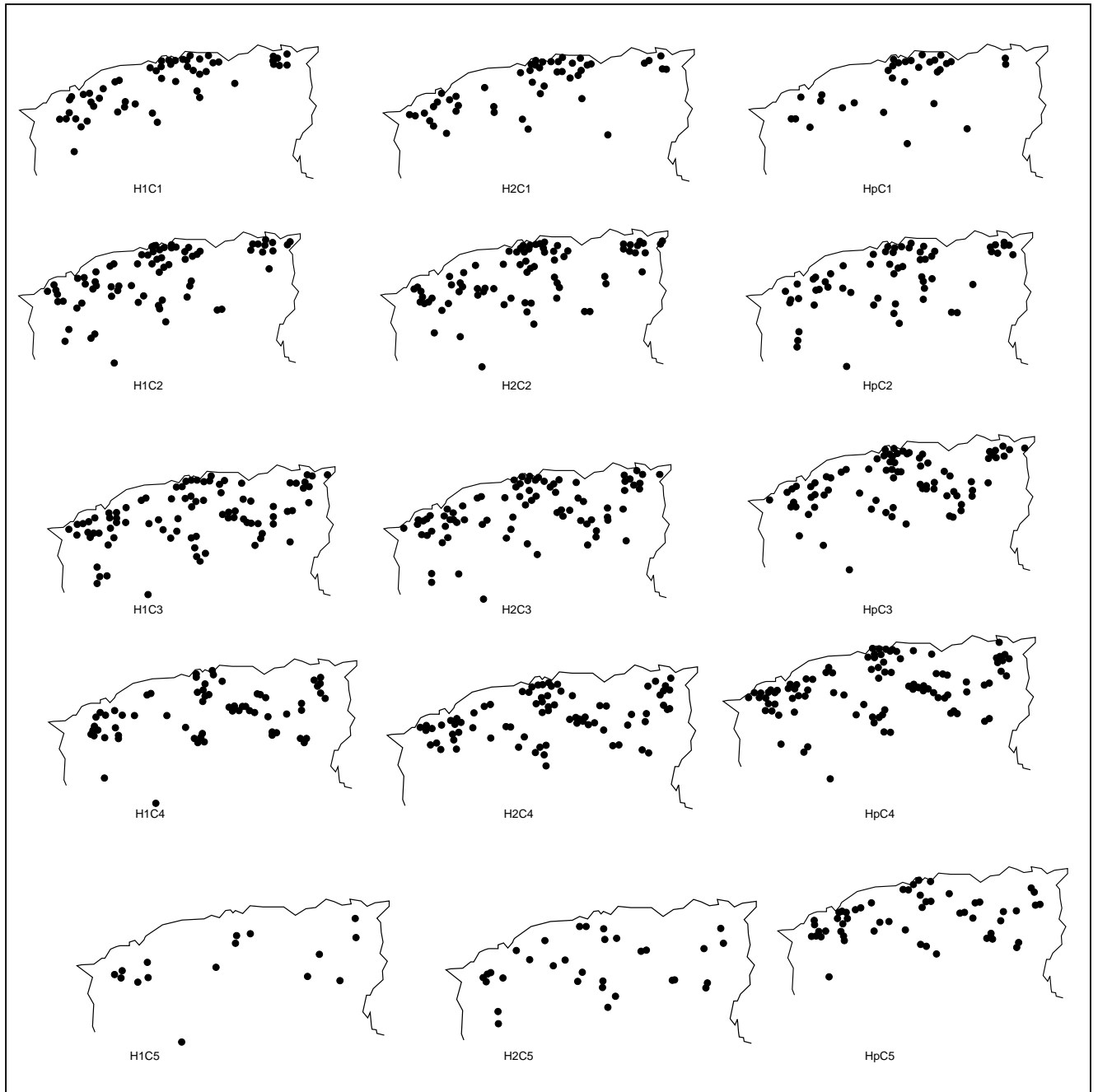


Figure 3 - Fréquence des horizons en fonction des classes de taux de calcaire

Figure 3 - Horizons frequency in fonction of calcareous rate classes

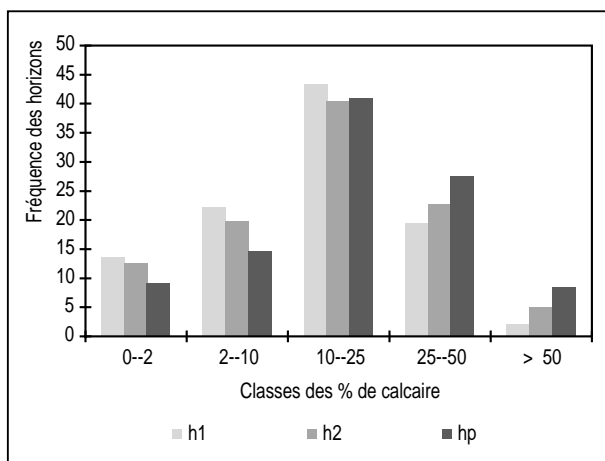


Figure 4 - Fréquence des classes de taux de calcaire par catégorie d'horizon

Figure 4 - Frequency calcareous rate classes by horizon category

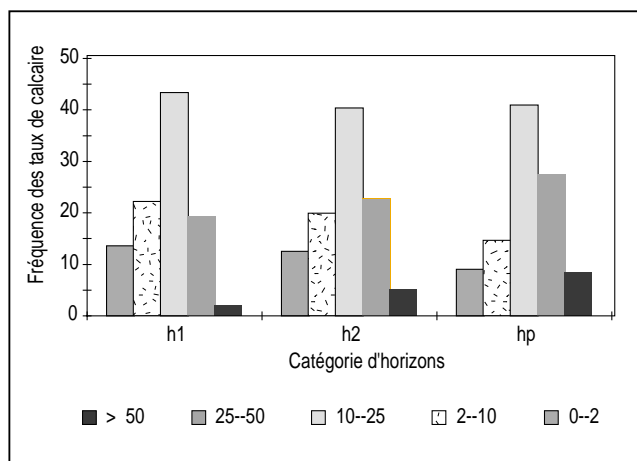


Tableau 3 - Résultats statistiques de la relation des taux de calcaire en fonction de la latitude

Table 3 - Statistical results of calcareous rates and latitude relation

Horizons de	surface		sub-surface		profondeur	
	linéaire	curvilinéaire	linéaire	curvilinéaire	linéaire	curvilinéaire
nombre	914	914	905	905	1313	1313
b	-0,036		-0,044		-0,028	
r	0,242	0,335	0,255	0,370	0,159	0,391
signification	*	*	*	*	*	*

Tableau 4 - Résultats statistiques de la relation des taux de calcaire avec la longitude

Table 4 - Statistical results of calcareous rates and longitude relation

Horizons de	surface		sub-surface		profondeur	
	linéaire	curvilinéaire	linéaire	curvilinéaire	linéaire	curvilinéaire
nombre	914	914	905	905	1313	1313
b	0,0020		0,0009		-0,0043	
r	0,049	0,254	0,013	0,173	0,056	0,187
signification	ns	*	ns	*	ns	*

En effet, les travaux de Gaussen et Bagnouls (1948) et Gaussen et Vernet (1948) montrent que les hauteurs des pluies diminuent fortement du Nord vers le Sud de l'Algérie et que le Nord-Est du pays est plus pluvieux que le Nord-Ouest.

Distribution selon les hauteurs des pluies

Nous avons, dans une première phase, tenté de montrer l'influence des hauteurs des pluies sur le taux de calcaire dans les 3 types d'horizons à l'échelle de tout le Nord de l'Algérie.

Par la suite, nous avons comparé les différents teneurs de calcaire dans 3 zones pluviométriques différentes. Les résultats de la relation calcaire - pluie sont mentionnés dans le tableau 5.

Pour tous les horizons, cette relation est significative. Les coefficients de régression y sont pratiquement identiques (-0,02). De même, les coefficients de corrélation linéaire sont très proches les uns des autres (-0,312 pour H1; -0,320 pour H2 et -0,285 pour

Tableau 5 - Résultats statistiques des taux de calcaire en fonction de la hauteur des pluies

Table 5 - Statistical results of calcareous rates and rain quantity relation

Horizons de	surface		sub-surface		profondeur	
	linéaire	curvilinéaire	linéaire	curvilinéaire	linéaire	curvilinéaire
régression						
nombre	914	914	905	905	1313	1313
b	-0,020		-0,023		-0,022	
r	-0,312	-0,360	-0,320	-0,360	-0,285	-0,367
signification	*	*	*	*	*	*

Hp). Ce résultat montre que les hauteurs des pluies affectent les 3 catégories d'horizons avec la même intensité.

L'observation des nuages de points ainsi que l'allure des courbes de régression curvilinéaire (figures 5a, 5b et 5c) montrent trois zones distinctes en fonction des hauteurs de pluie. En effet, nous constatons que les plus fortes teneurs en calcaire se situent dans la gamme des pluies comprises entre 270 mm et 500 mm. Dans cette zone, la pente de la courbe est pratiquement nulle et les variations des hauteurs de pluie semblent n'avoir aucun effet sur les variations des taux de calcaire. De part et d'autre de cette frange, les teneurs extrêmes en calcaire semblent être moins importantes, mais avec une influence de la pluie nettement plus significative. Cependant, si pour les pluies les plus importantes, les faibles taux de calcaire sont expliqués par la lixiviation des carbonates de calcium, pour les faibles pluies, ce serait plutôt la faible altération chi-

mique (dissolution) des roches qui en serait à l'origine (Pouget, 1980b). Pour une meilleure compréhension du phénomène, nous tenterons de comparer les moyennes du taux de calcaire dans 3 zones pluviométriques différentes. Sur la base des résultats précédents, nous avons choisi 3 tranches pluviométriques :

- pluies < 300 mm,
- pluies comprises entre 350 et 450 mm,
- pluies > 600 mm.

Les résultats de la comparaison des moyennes du taux de calcaire sont mentionnés dans les tableaux 6, 7 et 8.

Le tableau 6 suggère deux remarques :

- Dans les zones de faible pluviométrie ($p < 300$ mm), le calcaire a tendance à se localiser dans les horizons de sub-surface. Par contre, pour les autres tranches de pluie, le

Tableau 6 - Moyennes des taux de calcaire dans les 3 tranches pluviométriques définies

Table 6 - Mean of the calcareous rates in the 3 climatic defined zones

Horizons de	surface		sub-surface		profondeur	
	nombre	teneurs	nombre	teneurs	nombre	teneurs
	d'horizons	moyennes en calcaire %	d'horizons	moyennes en calcaire %	d'horizons	moyennes en calcaire %
p < 300 mm	141	24,82	141	27,51	285	25,94
350 < p < 450	219	20,93	215	24,09	290	29,42
p > 600 mm	314	11,87	317	13,33	412	15,23

Tableau 7 - Comparaisons des moyennes des taux de calcaire des horizons dans chaque tranche pluviométrique

Table 7 - Mean comparison of the calcareous rates within each climatic zone

Pluie (p)	p < 300 mm			350 mm < p < 450 mm			p > 600 mm		
	H1 et H2	H2 et Hp	H1 et Hp	H1 et H2	H2 et Hp	H1 et Hp	H1 et H2	H2 et Hp	H1 et Hp
t	1,48	-0,89	0,65	2,06	3,34	5,65	1,58	1,97	3,67
p	0,1300	0,3710	0,5100	0,0390	0,0008	0,0000	0,1100	0,0450	0,0002
signification	ns	ns	ns	*	*	*	ns	*	*

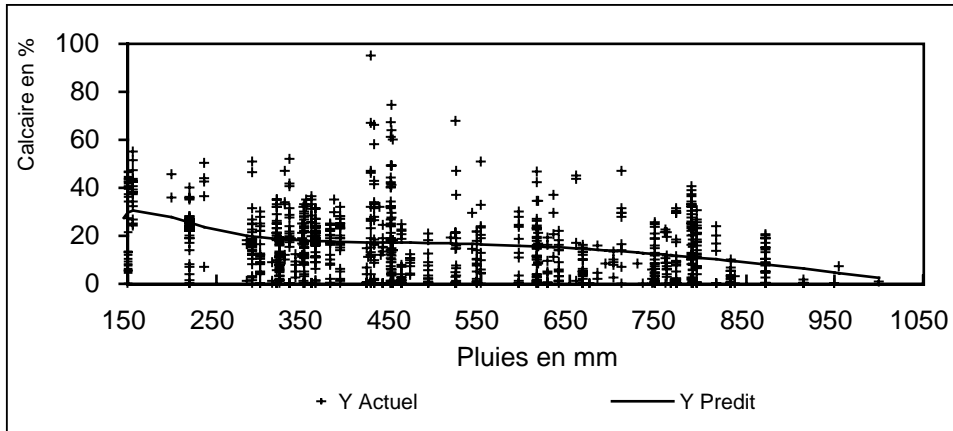


Figure 5a - Relation entre les taux de calcaire et la pluie dans les horizons de surface
Figure 5a - Calcareous rates and rain relation in the upper horizons

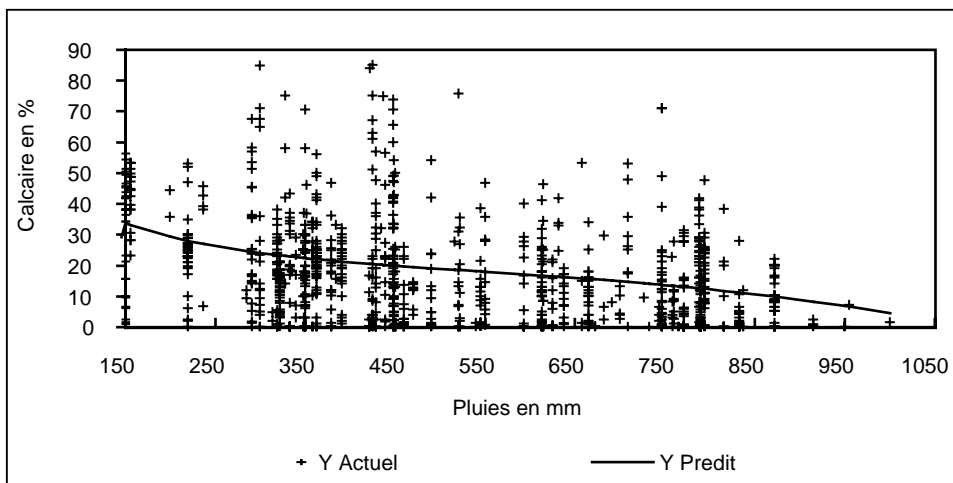


Figure 5b - Relation entre les taux de calcaire et la pluie dans les horizons de sub-surface
Figure 5b - Calcareous rates and rain relation in the sub-surface horizons

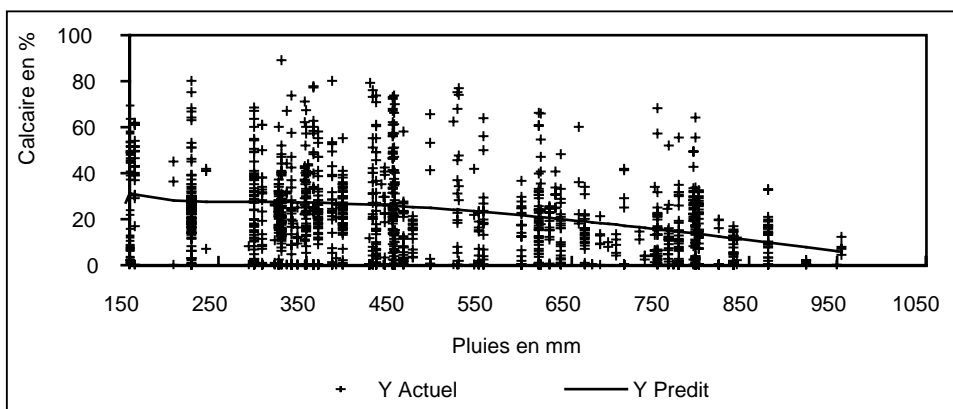


Figure 5c - Relation entre les taux de calcaire et la pluie dans les horizons de profondeur
Figure 5c - Calcareous rates and rain relation in the lower horizons

calcaire se concentre nettement plus dans les horizons de profondeur.

- Dans tous les cas, les teneurs moyennes du calcaire deviennent de plus en plus faibles au fur et à mesure que les hauteurs de pluie deviennent plus importantes, exception faite pour les horizons de profondeur où la moyenne de la teneur en calcaire de la tranche pluviométrique (350-450 mm) est plus

grande que celle où les pluies sont inférieures à 300 mm.

Les résultats de la comparaison des moyennes des taux de calcaire des différentes catégories d'horizons dans chaque tranche pluviométrique sont mentionnés dans le tableau 7.

Ce tableau montre clairement la différence de comportement de l'accumulation calcaire dans les 3 zones climatiques :

- Pour les faibles pluies ($p < 300$ mm), la comparaison des

Tableau 8 - Comparaisons des moyennes des taux de calcaire entre horizons de même catégorie dans les trois tranches pluviométriques (A : < 300 mm ; B : 350 à 450 mm ; C : > 600 mm)

Table 8 - Mean comparison of the calcareous rates between same category horizons in the three climatic zones (A : < 300 mm ; B : 350 to 450 mm ; C : > 600 mm)

Horizons tion	t	p	significa tion
H1 (A) x H1 (B)	2,45	0,014	*
H1 (A) x H1 (C)	10,70	< 0,0001	*
H1 (B) x H1 (C)	8,27	< 0,0001	*
H2 (A) x H2 (B)	1,89	0,058	ns
H2 (A) x H2 (C)	10,32	< 0,0001	*
H2 (B) x H2 (C)	8,42	< 0,0001	*
Hp (A) x Hp (B)	2,33	0,01	*
Hp (A) x Hp (C)	9,18	< 0,0001	*

moyennes des taux de calcaire donne des différences non significatives.

- Pour les pluies moyennes (350 mm < p < 450 mm), les différences des moyennes sont significatives entre les horizons.

- Pour les pluies fortes (p > 600 mm), la différence est non significative entre l'horizon de surface et de sub-surface, mais elle est significative entre les autres paires d'horizons.

Ces résultats suggèrent que le profil calcaire soit fonction de la pluviométrie. En effet, dans les zones arides (p < 300 mm), l'accumulation de calcaire semble être homogène dans tout le profil, mais avec un pourcentage de calcaire légèrement plus élevé dans les horizons de sub-surface. En revanche, dans les zones semi-arides (350 mm < p < 450 mm), le profil devient de plus en plus calcaire en profondeur. Dans ces zones, les teneurs en calcaire sont significativement différentes selon la position de l'horizon dans le profil. Enfin, pour les zones humides et sub-humides (p > 600 mm), le profil est relativement moins calcaire que ceux des autres zones climatiques. Dans ces zones, le calcaire est réparti d'une façon homogène dans les horizons de surface et de sub-surface. La différence de moyenne entre ces derniers et les horizons de profondeur est significative.

Les résultats de la comparaison des moyennes du taux de calcaire entre horizons de même catégorie situés dans les trois zones pluviométriques sont mentionnés dans le tableau 8.

Les résultats montrent que :

- Dans tous les cas, la comparaison des moyennes des horizons de même catégorie entre les tranches pluviomé-

triques donne des différences significatives à très hautement significatives, à l'exception des horizons de sub-surface des tranches arides et semi-arides (A et B).

- Plus les écarts des pluies sont grands et plus les moyennes des taux de calcaire sont statistiquement différentes entre horizons de même catégorie. Ces résultats confirment que l'accumulation du calcaire dans les sols du Nord de l'Algérie est globalement tributaire des hauteurs des précipitations.

Spatialisation des formes d'accumulations calcaires

Le calcaire se caractérise par sa teneur, mais également par sa forme dans le sol. Dans beaucoup de cas, c'est la forme qui est le trait essentiel du profil, surtout quand le calcaire s'individualise sous forme continue. C'est pourquoi nous avons considéré trois formes principales d'accumulations calcaires dans le sol : la forme diffuse, la forme discontinue et la forme continue. Le profil étant divisé en trois catégories d'horizons (de surface, de sub-surface et de profondeur), la spatialisation de la forme du calcaire dans le sol a été réalisée sur 9 cartogrammes thématiques (3 formes x 3 horizons) (figure 6). Ce traitement a été effectué sur 994 horizons dont 256 de surface, 271 de sub-surface et 467 de profondeur.

L'analyse de cette figure révèle que sur le plan spatial, les formes diffuses et discontinues se localisent aussi bien dans les régions Nord que dans les régions Sud de l'Algérie septentrionale. Ces deux formes sont les plus prédominantes et sont bien représentées dans l'ensemble du profil. Par contre, la forme continue se situe essentiellement au niveau des régions arides et semi-arides. Cette forme se rencontre très rarement en surface ; elle est relativement plus fréquente à la base du profil.

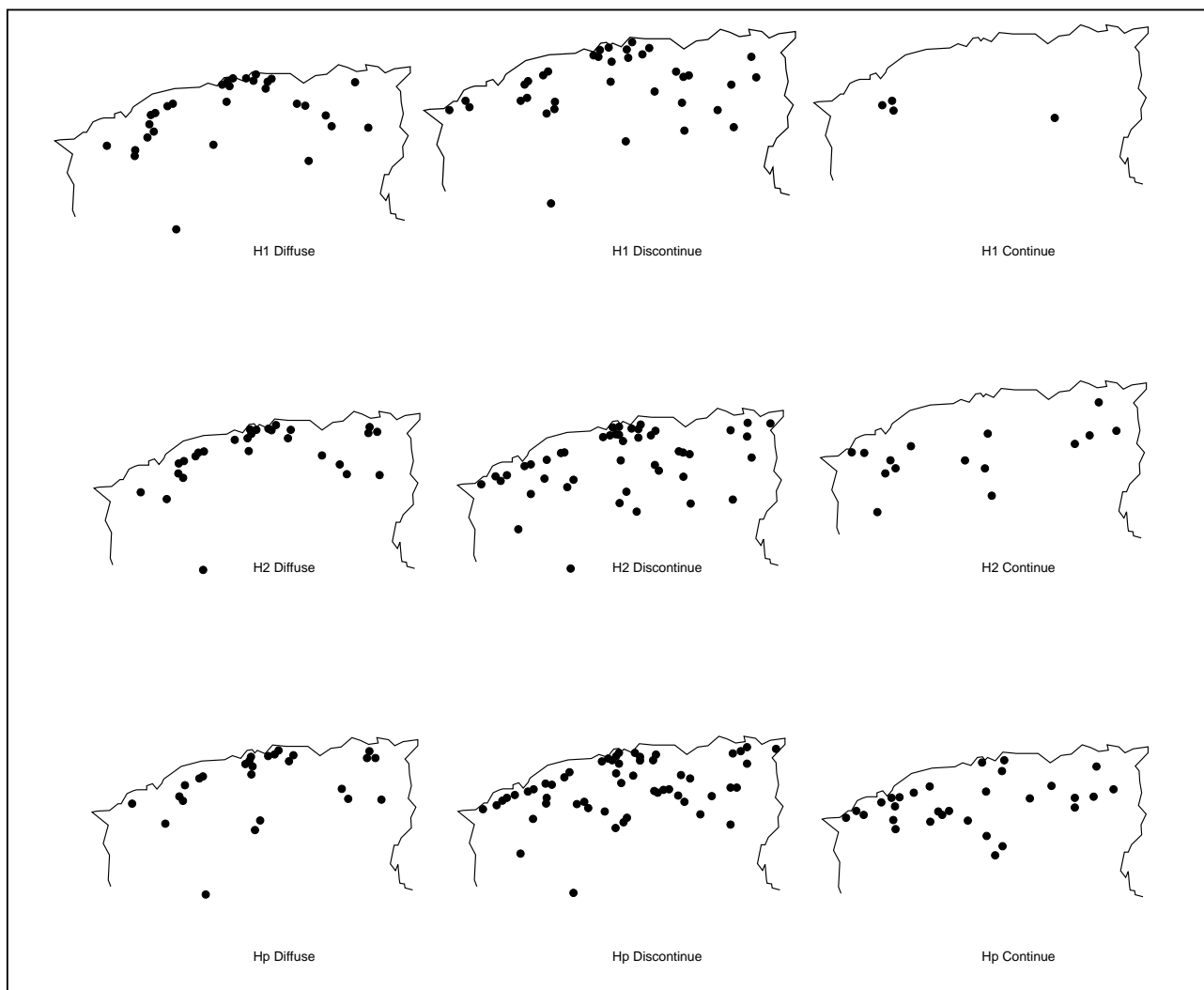
Les histogrammes de fréquences (figures 7 et 8) révèlent que la forme diffuse caractérise surtout les horizons de surface (62 %), ensuite les horizons de sub-surface (41 %) et enfin les horizons de profondeur (23 %). En revanche, cette tendance s'inverse pour les formes continues et discontinues qui affectent respectivement beaucoup plus les horizons de profondeur (59 % et 16 %), ensuite les horizons de sub-surface (53 % et 6 %), et enfin plus rarement les horizons de surface (36 % et 2 %).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les sols de l'Algérie du Nord sont moyennement à faiblement pourvus en calcaire. Le profil moyen de distribution des teneurs en calcaire est de type croissant en profondeur (17 % en H1, 19,4 % en H2 et 22,9 % en Hp). Les différences entre ces moyennes sont significatives. Les très fortes teneurs en calcaire (calcaire > 50 %) concernent uniquement 2 % des horizons de surface, 5 % des horizons de sub-surface et 8 % des horizons de profondeur.

Figure 6 - Spatialisation des formes du calcaire dans l'espace et dans le sol

Figure 6 - Lateral and vertical spatialization of calcareous form



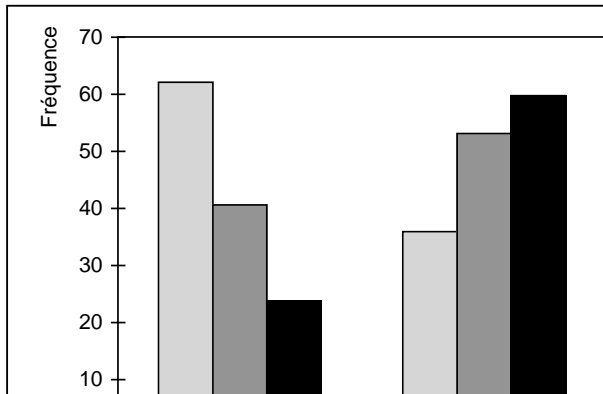
Les teneurs en calcaire se distribuent selon la latitude, avec une tendance négative du Sud vers le Nord. Par contre, la longitude n'affecterait pas la répartition du calcaire.

En conséquence, les faibles teneurs en calcaire se situent préférentiellement dans la frange Nord du pays. Par contre, les fortes teneurs en calcaire concernent surtout les zones intérieures. Ces distributions des taux de calcaire seraient liées au climat. En effet, les calculs statistiques ont fait ressortir une relation significative entre les teneurs en calcaire dans le sol et les hauteurs des pluies. Les plus fortes teneurs se situent dans la gamme pluviométrique comprise entre 270 et 500 mm. Dans cette gamme, le régime pluviométrique permet une dynamique du calcaire dans le sol (Pouget, 1980b; Halitim, 1988), mais reste insuffisant pour l'évacuer hors du

profil (Ruellan, 1976). En effet, dans les zones à faible pluviométrie ($p < 300$ mm) les teneurs en calcaire sont élevées et homogènes le long du profil, elles ne semblent pas affectées par le climat actuel et seraient le résultat de la conservation d'un héritage. Dans les zones à fortes pluies ($p > 600$ mm), les taux de calcaire sont faibles, surtout au niveau des horizons de surface et de sub-surface; dans ces zones le régime pluviométrique permettrait une lixiviation du calcaire qui provoque sa concentration relative à la base du profil. C'est dans les tranches pluviométriques intermédiaires ($350 \text{ mm} < p < 450$) que le calcaire se différencie le plus dans le profil. Ici, les teneurs sont assez élevées avec une nette accumulation en profondeur. Ces résultats suggèrent que la teneur en calcaire varie en fonction du climat actuel dans

Figure 7 - Fréquence des horizons en fonction des classes de forme du calcaire

Figure 7 - Horizon frequency in function of calcareous class forms



l'ensemble du profil dès que la pluviométrie dépasse 350 mm/an, contrairement aux résultats de Ruellan (1976) qui limitent cette influence à l'horizon de surface.

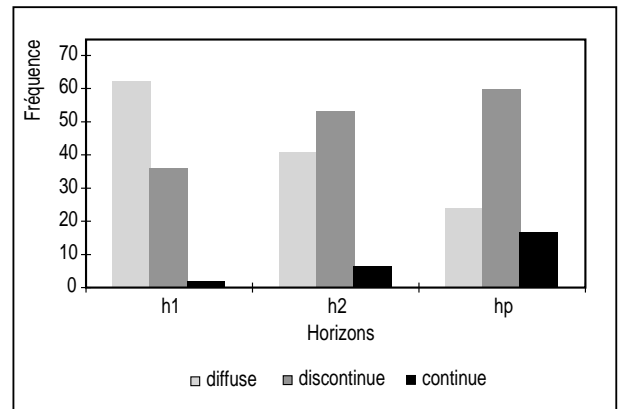
Dans les sols de l'Algérie du Nord, l'accumulation diffuse concerne surtout les horizons de surface, à un moindre degré les horizons de sub-surface, et très rarement les horizons de profondeur. Les accumulations discontinues sont très bien représentées et caractérisent plus de la moitié des horizons de sub-surface et de profondeur. Enfin, les accumulations continues sont relativement rares et affectent particulièrement les horizons de profondeur.

La distribution spatiale des formes d'accumulations calcaires peut être rapprochée de celle des teneurs en calcaire. En effet, les accumulations calcaires continues sont essentiellement localisées dans les zones à fortes teneurs en calcaire, à faible pluviométrie, et à la base du profil.

Ces résultats mettent en évidence que la distribution verticale et latérale des teneurs et des formes du calcaire dans les sols étudiés est en relation étroite avec le régime pluviométrique actuel à partir d'une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 350 mm. Pour les zones plus sèches dont la pluviométrie moyenne annuelle est inférieure à 350 mm, le climat actuel semble peu affecter la distribution des formes et des taux de calcaire dans les sols, c'est l'héritage des climats passés qui est conservé.

Ce travail est réalisé à petite échelle sans tenir compte de l'influence des facteurs locaux tels que la géomorphologie et la géologie.

Figure 8 - Fréquence des formes de calcaire dans les horizons



BIBLIOGRAPHIE

- A.F.E.S., 1995 - Référentiel pédologique, I.N.R.A. 332 p.
- Aubert G., 1947 - Les sols à croûtes calcaires. C.R. Conf. Méditer. Montpellier-Alger, Publ. Ass. Franc. Et. Sol, Paris, 330-337.
- Ayache N., 1996 - Contribution à la création d'une banque de données pédologiques des sols calcaires de l'Algérie du nord. Mem. Ingénieur, I.N.A. El Harrach, 70 p.
- Ballais J.L., Vogt T., 1979 - Croûtes calcaires quaternaires du piémont nord des Aures (Algérie). Rech. Géographiques de Strasbourg, n° 2, 23-34
- Belouam N., 1976 - Caractéristiques macromorphologiques et micromorphologiques de quelques sols à accumulation calcaire du Hodna. Ann. de l'I.N.A. El Harrach, Vol. VI, 1, 53-79.
- Benmati A., 1993 - Contribution à l'étude de l'altération des roches carbonatées tendres en milieu semi-aride de Souaghi (Béni-Slimane). Relation avec la pédogenèse fersiallitique et la formation des croûtes et encroûtements calcaires. Thèse de magister, I.N.A. El Harrach, 255 p.
- Bertrand R., Falipou P., Legros J. P., 1985 - Notice pour l'entrée des descriptions et analyses des sols en banque de données. ACCT, 136 p.
- Bock L., 1984 - L'intégration chronospaciale des accumulations calcaires. Approche morphopédologique et géochimique dans un paysage semi-aride de l'Atlas tellien (Algérie). Thèse doctorat, univ. Gembloux Belgique, 447 p.
- Bonneric P., Navarro R., Falipou P., 1985 - Notice pour la gestion informatique de la banque de données STIPA. ACCT, 126 p.
- Boulaine J., 1957 - Étude des sols des plaines du Chelif. Université d'Alger. Fac. Sciences. Thèse Doct. 582 p.
- Boulaine J., 1961 - Observations sur les carapaces du piémont saharien. Trav. Inst. Rech. Sahar., 20, 79-90.
- Briot P., 1976 - Introduction à l'étude des calcrètes. Rapport DEA. Pédologie et aménagement des sols. Paris, 25 p.
- Charles G., 1976 - Remarques sur la genèse et l'âge des "croûtes" carbonatées de la région méditerranéennes. Ann. de l'I.N.A. El Harrach. Vol. VI, n° 1, 159-162.
- CPCS, 1967 - Classification des sols. Laboratoire de géologie pédologie de l'E.N.S.A. Paris Grignon, 87 p.
- De Os Horta J.C., 1979 - Les encroûtements calcaires et les encroûtements gyp-

- seux en géotechnique routière. BET Labo mécanique des sols, 105 p.
- Djili K. et Keslani R., 1995 - Banque de données et contrôle de l'information pédologique. Un exemple d'application aux sols d'Algérie du Nord. *Ann. de l'I.N.A.*, vol. 16, n° 1 et 2, 97-112
- Djili K., 1983 - Cartographie des sols en milieu steppique calcaire. Thèse de magister, I.N.A. El Harrach, 195 p.
- Duchaufour P., Souchier B. - 1977 - Pédologie 1. Pédogenèse et classification. Masson Paris.
- Durand J.H., 1953 - Étude hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie. S.E.S. Alger, 209 p
- Durand J.H., 1956 - Les croûtes calcaires d'Afrique du nord étudiées à la lumière de la bio-rhexistase. S.E.S. Alger, 3-19.
- Durand J.H., 1959 - Les sols rouges et les croûtes en Algérie. *Serv. Etud. Sci. Pédol.* n°7, 188 p.
- Durand J.H., 1963 - Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie : formation et âge. *Bull. Soc. Géol. France*, 7, 5 ; 959-968.
- F.A.O., 1988 - Soils map of the world. revised legend World soil resources. Report N°6, F.A.O, Rome.
- Gaucher G., 1948 - Sur certains caractères des croûtes calcaires en rapport avec leur origine. C.R.A Sciences Paris, 154-156.
- Gaussen H., Bagnouls M. F., 1948 - Carte des précipitations. Algérie occidentale, Feuilles Nord et Sud au 1/500 000. IGN, Inspection générale de l'agriculture, Gouvernement général de l'Algérie.
- Gaussen H., Vernet A., 1948 - Carte des précipitations. Feuilles 1, Tunisie au 1/500 000. IGN, Ministère de l'agriculture, Gouvernement tunisien, protectorat français.
- Girard M.C., Arousseau P., King D., Legros J.P., 1989 - Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. *Sciences du sol*, Vol 27, 4, 335-350.
- Halitim A., 1988 - Sols des régions arides d'Algérie. O.P.U. Alger. 384 p.
- Lozet J., Mathieu C., 1990 - Dictionnaire de science du sol. Deuxième édition, Lavoisier, 266 p.
- Mathieu L., Thorez J., Ek C., 1976 - Place et signification des croûtes et encroûtements calcaires dans les profils de sols et dans les paysages d'Afrique du nord-ouest. *Ann. De l'I.N.A. El Harrach.* Vol. VI, n° 1, 81-138.
- Millot G., Nahon D., Paquet H., Ruellan A., Tardy Y., 1977 - L'épigénie calcaire des roches silicatées dans les encroûtements carbonatés en pays sub-aride. *AntiAtlas, Maroc, Sc. Géol. Bull, Strasbourg*, 30, 3, 129-152.
- Nolin M.C., Caillier M.J., 1992 - La variabilité des sols. III - Stratégie d'échantillonnage. *Agrosol*, 5, 2 69-76.
- Noureddine L., 1979 - Remarques sur les croûtes calcaires dans la Beqa'a méridionale (Liban). *Rech. Géographique* n° 12, 5-12.
- Pouget M., 1980a - Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. Thèse de doctorat d'état, Université d'Aix-Marseille III, 555 p.
- Pouget M., 1980b - Les sols à croûtes calcaires dans les steppes algériennes. Quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle. *Cah; ORSTOM Sec. Pedol.* 18, 3. 4, 235-236.
- Ruellan A., 1971 - Les sols à profils calcaires différenciés dans les plaines de la basse Moulouya (Maroc Oriental), *Cah. ORTOM* n° 54, 302 p.
- Ruellan A., 1976 - Morphologie et répartition des sols calcaires dans les régions méditerranéennes et désertiques. *Ann. Agr. (INA)* vol VI, n° 1, 11-39.
- Ruellan A., 1980 - L'accumulation du calcaire dans les sols. Cristallisation, déformation, dissolution des carbonates. *Université Bordeaux III*, 401-411.
- Schvartz C., Walter C., Claudot B., Boudéo T., Arousseau P., 1997- Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994. Constitution d'une banque de données cantonale. *Étude et gestion des sols* 4, 3, 191-203.
- Thibout F., 1974 - Interaction pédogenèse - morphogénèse. Exemple d'application dans la région de Bechloul - Algérie. *L'Agronomie Tropicale*, 2 et 3, série agronomie générale.
- Tihay J.P. et Vogt T., 1979 - Observation sur des croûtes calcaires dans le bassin de Bouira (Vallée de l'oued Soummam, Algérie). *Rech. Géog. à Strasbourg*, n° 2, 35-44.
- USDA, 1992 - Keys to soil Taxonomy, SMSS Technical Monograph n° 19, fifth edition, 541 p.
- Vatan A., 1967 - Manuel de sédimentologie. Ed. Tech. Paris, 327 p.
- Vogt T., 1979 - Microsilicification dans des croûtes calcaires de milieu aride. Quelques remarques. *Rech. Géogr. A Strasbourg*, n° 12, 81-86.
- Vogt T., 1984 - Croûte calcaire : type et genèse. Exemple d'Afrique du nord et de France méditerranéenne. Thèse de doctorat d'état, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 228 p.
- Walter C., Schvartz C., Claudot B., Boudéo T., Arousseau P., 1997- Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons

de surface des sols cultivés. Étude et gestion des sols 4, 3, 205-219.