

UN EXEMPLE DE CORRÉLATION DE RANG EN GÉOCHIMIE : LES ALTÉRATIONS DU SOCLE BIRRIMIEN EN ZONE TROPICALE SÈCHE (SÉNÉGAL ORIENTAL ET HAUTE-VOLTA)

A. BLOT, J.-C. PION, J.-M. WACKERMANN

*Laboratoire de Géologie
du Centre ORSTOM de DAKAR (Sénégal)*

RÉSUMÉ

Le test des corrélations de rang permet de déterminer les profondeurs minimales d'obtention d'images significatives, au sein des manteaux d'altération et des sols, de la répartition des teneurs des éléments majeurs et traces du substratum. Les méthodes de prospection géochimique de surface, en zone tropicale sèche, se trouvent justifiées pour la majeure partie des éléments traces analysés, à l'exception du chrome, du lithium et du zinc.

Ce test fournit en outre des données sur la mobilité relative des différents éléments : sodium et lithium se révèlent les plus mobiles, fer, titane, potassium, nickel et cobalt les plus stables. Il permet également d'étudier le comportement des éléments dans les paléoprofils et de montrer que la part du colluvionnement est réduite ou locale dans la pédogenèse de cette zone.

ABSTRACT

Rank correlation coefficients, applied to spectrochemical data of weathering mantles and soils, may test validity of surface geochemical prospection methods. Sampling for prospection of Cr, Li and Zn must attain, at least, 50 cm, in arid tropical zone.

Values of coefficients reveal, besides, the tendencies of mobility : Na and Li are more moving elements, Fe, Ti, K, Ni and Co, less. Colluvial materials have little importance in this climatic area.

ZUSAMMENFASSUNG

Rangkorrelationskoeffiziente bestehen ein Test für geochemische Forschungsmethoden. Unter trockenem Tropikalklima geben Verwitterungsstoffe und Boden ein bedeutsames Bild der Verteilung der Inhalte meisten Elementen in der Untergesteine. Cr, Li und Zn erfordern jedoch eine Sortierung mit einer Minimaltiefe von 50 cm.

Die Korrelationskoeffiziente drücken weiter auch die Beweglichkeit der Elementen aus : Na und Li sind sehr beweglich, Fe, Ti, K, Ni und Co zeigen grosse Stabilität während der Verwitterung. Kolluviontransporte haben eine geringe Einwirkung in der Bodenbildung dieses Bereiches.

РЕЗЮМЕ

Критерий корреляции рангов позволяет определить минимальные глубины для получения показательных картин распределения, внутри покровов выветривания и почв, содержания главных элементов и микроэлементов субстрата. Геохимические поверхностные поисковые методы, в тропической засушливой зоне, оправдываются для большей части проанализированных микроэлементов, за исключением хрома, лития и цинка.

При помощи этого критерия можно кроме того получить данные о сравнительной подвижности различных элементов: натрий и литий оказываются самыми подвижными, а железо, титан, калий,

никель и кобальт — самыми стабильными. Критерий этот позволяет также выяснить поведение элементов в палеофиллах и показать ограниченный или местный характер роли коллювия в почвообразовании этой зоны.

Les études d'altérations météoriques menées par la section de Géologie de Dakar sur les roches cristallines du socle birrimien en Haute-Volta et au Sénégal Oriental ont été entreprises à l'aide de puits creusés manuellement.

Quatre années de mission dans les différentes zones climatiques de ces régions, depuis la zone sahélienne

(pluviosité : 300 mm/an) jusqu'à la zone soudano-guinéenne (1 400 mm/an) ont porté sur 150 puits environ représentant un éventail pétrographique allant des granites alcalins aux roches ultrabasiqes.

Chaque puits a été échantillonné tous les 50 cm, de la surface à la roche dure, et certains de ces niveaux ont été analysés.

(1°) Analyse des éléments majeurs par quantométrie*.

(2°) Analyse des éléments traces par spectrographie d'émission**.

La composition moyenne des roches dures des 134 puits utilisés pour cette étude est donnée dans le tableau ci-dessous :

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Valeur minima	36,78	1,61	1,23	0,01	0,13	0,09	Tr.	0,02	Tr.
Valeur maxima	80,65	20,10	29,82	0,59	34,69	14,70	5,02	4,97	2,08
Moyenne	57,76	13,90	9,33	0,13	5,08	5,60	2,65	1,28	0,80

Le total des valeurs moyennes est 96,53 ; il s'agit donc d'une composition de roche déjà altérée et non d'une composition de roche saine.

Dans un premier temps, nous avons essayé de rechercher s'il existait une corrélation effective entre la roche dure parfois profonde et les horizons superficiels, pour tous les éléments analysés.

En fait il s'agissait de vérifier si la prospection géochimique de surface habituellement utilisée (prélèvement à 30 cm) donnait une image fidèle de la roche sous-jacente et sinon à quel niveau elle était significative.

Chacun des puits possède sa propre individualité se traduisant par des paramètres différents : nature et épaisseur des différents niveaux d'altération - roche saine atteinte ou non - niveau hydrostatique présent ou non - position variable dans la topographie - présence de recouvrements visibles ou non, etc.

Il était donc très difficile de comparer entre eux tous ces puits par une méthode statistique simple.

Le calcul du coefficient de corrélation ordinairement utilisé (coefficient de corrélation de Pearson) ne pouvait s'appliquer dans ce cas. En effet :

— il n'y a pas de distribution continue des variables, donc pas de distribution « normale » ;

— les valeurs données pour les traces sont semi-quantitatives. Beaucoup de valeurs correspondent aux limites de sensibilité de l'émission d'arc

(Ex. : Mo < 10).

Dans ces conditions il fallait utiliser un test convenant à des variables aléatoires n'ayant pas une distribution normale. Nous avons choisi le coefficient de rang de Spearman.

I. — COEFFICIENT DE CORRÉLATION DE RANG DE SPEARMAN

Coefficient de rang (r_s)

On remplace les valeurs de X et Y par leur rang dans le classement obtenu en ordonnant les valeurs dans le sens décroissant

(*) Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Nancy-Vandœuvre.

(**) Laboratoire de Spectrographie des Services Scientifiques Centraux (ORSTOM), Bondy.

— la formule générale du coefficient de corrélation

$$r = \frac{\Sigma xy}{\sqrt{\Sigma x^2 \Sigma y^2}} \quad (\text{KENDALL, 1948}) \quad (1)$$

devient alors :

$$r_s = 1 - \frac{6 \Sigma (DR)^2}{N(N^2 - 1)} \quad (\text{FLANAGAN, 1957}) \quad (2)$$

où DR est la différence entre les deux rangs des X et des Y ,

N est le nombre de valeurs classées dans chaque classement.

Dans le cas où il existe beaucoup de valeurs semblables, donnant des rangs identiques, nous devons appliquer une correction à la formule (2) qui devient :

$$r_s = \frac{\Sigma x^2 + \Sigma y^2 - \Sigma d^2}{2 \sqrt{\Sigma x^2 \Sigma y^2}} \quad (\text{SIEGEL, 1956}) \quad (3)$$

ou $\Sigma x^2 = \frac{N^3 - N}{12} - \Sigma D_x$

$$\Sigma y^2 = \frac{N^3 - N}{12} - \Sigma D_y.$$

La somme des D est calculée à partir des rangs identiques $D = \frac{d^3 - d}{12}$. Si nous avons par exemple

2 doublets et 1 triplet, nous obtenons :

$$\Sigma D_x = \frac{2^3 - 2}{12} + \frac{2^3 - 2}{12} + \frac{3^3 - 3}{12}.$$

Test de signification du r_s

En fait on teste l'hypothèse nulle, c'est-à-dire l'absence de corrélation. Ce test est obtenu par la formule :

$$t = r_s \sqrt{\frac{N-2}{1-r_s^2}} \quad (\text{KENDALL, 1948}) \quad (4)$$

et en remplaçant r_s par sa valeur dans la formule (2) nous obtenons :

$$\Sigma (DR)^2 = \frac{N^3 - N}{6} \left(1 \pm \sqrt{\frac{t^2}{N-2+t^2}} \right) \quad (5)$$

$t =$ le t de Student est donné dans des tables de valeurs ; par exemple pour une probabilité de 0,01 et pour un degré de liberté ($df = N-2$) de 30 :

$$t = 2,750.$$

La formule (5) donne les limites inférieures et supérieures de la somme des carrés des différences de rang.

Si la somme de $(DR)^2$ observée est comprise entre les deux limites calculées, il n'y a pas de corrélation entre les deux distributions des variables X et Y .

Les valeurs supérieures à la limite maxima donnent les corrélations négatives.

TABLEAU 1

N	Probabilité	
	0,05	0,01
5	0 - 40	
6	4 - 66	0 - 70
7	12 - 100	4 - 108
8	22 - 146	10 - 158
9	40 - 200	24 - 216
10	61 - 269	39 - 291
11	88 - 352	58 - 382
12	121 - 451	84 - 488
13	163 - 565	115 - 613
14	213 - 697	154 - 756
15	272 - 848	201 - 919
16	342 - 1 018	257 - 1 103
17	423 - 1 209	322 - 1 310
18	515 - 1 423	398 - 1 540
19	621 - 1 659	484 - 1 796
20	740 - 1 920	583 - 2 077
21	873 - 2 207	695 - 2 385
22	1 022 - 2 520	820 - 2 722
23	1 187 - 2 861	960 - 3 088
24	1 370 - 3 230	1 115 - 3 485
25	1 570 - 3 630	1 287 - 3 913
26	1 789 - 4 061	1 475 - 4 375
27	2 028 - 4 524	1 681 - 4 871
28	2 287 - 5 021	1 906 - 5 402
29	2 569 - 5 551	2 149 - 5 971
30	2 873 - 6 117	2 414 - 6 576
31	3 199 - 6 721	2 700 - 7 220
32	3 550 - 7 362	3 008 - 7 904
33	3 926 - 8 042	3 338 - 8 630
34	4 328 - 8 762	3 693 - 9 397
35	4 757 - 9 523	4 073 - 10 207
36	5 213 - 10 327	4 476 - 11 064
37	5 698 - 11 174	4 908 - 11 964
38	6 213 - 12 065	5 366 - 12 912
39	6 758 - 13 002	5 853 - 13 907
40	7 334 - 13 986	6 367 - 14 953

Table des calculs limites de $\Sigma (DR)^2$ d'après LITCHFIELD et WILCOXON (1955).

Les valeurs inférieures à la limite minima donnent les corrélations positives.

Il existe une table des valeurs limites de $\Sigma(DR)^2$ pour N de 5 à 40 (LITCHFIELD et WILCOXON, 1955), et nous pouvons très facilement calculer ces valeurs pour N supérieur à l'aide des formules (5) et (2).

Résumé de la procédure employée et discussion

1° Ecrire les N variables de X et dessous les N variables de Y correspondantes.

2° Ranger les X de 1 à N par ordre décroissant, sous chaque valeur de x ; écrire le rang correspondant. De même pour les Y .

3° Calculer DR pour chaque sujet en soustrayant son rang dans les Y de son rang dans les X . Porter cette différence au carré = $(DR)^2$.

La somme des $(DR)^2$ pour les N cas = $\Sigma(DR)^2$.

4° Dans le cas où il existe beaucoup de rangs identiques pour les variables X utiliser la formule (3). Sinon utiliser la formule (2) pour le calcul du r_s observé.

5° Dans le cas où N est compris entre 5 et 30 nous avons une table qui donne immédiatement les limites du r_s (OLDS, 1938).

Pour N supérieur à 30 nous devons calculer les limites à l'aide de la formule (5) et (2) pour un t donné, à une probabilité donnée.

6° *Discussion* : Les auteurs admettent une efficacité de la méthode de coefficient de rang de Spearman de 91 % par rapport au coefficient de corrélation de Pearson — c'est-à-dire que si nous avons une corrélation positive qui existe entre X et Y , le coefficient de corrélation de rang (r_s) nous donnera une corrélation positive dans 100 cas alors que, au même niveau de probabilité, le coefficient de Pearson (r) nous donnera une corrélation positive dans 91 cas seulement.

II. — RÉSULTATS

Les résultats sont exprimés dans deux tableaux généraux indiquant les coefficients de corrélation de rang r_s pour les majeurs et les traces.

Pour chaque puits la variable (Y) représente soit la roche dure si celle-ci a été atteinte dans le puits, soit le niveau le plus profond atteint au cours du

creusement, soit dans quelques rares cas un affleurement très proche du puits (quelques mètres à quelques dizaines de mètres, lorsque les caractères pétrographiques concordent).

Cette variable donnant l'image la plus proche possible de la roche non altérée a été comparée à chacun des différents niveaux analysés : de 0 à 5 m tous les 50 cm, de 5 à 10 m tous les mètres et pour finir à 12 m. Donc pour chaque élément silicium, aluminium, fer..., la valeur (y) qui représente le niveau le plus profond a été corrélée successivement aux 17 valeurs de (x) qui représentent les différents niveaux superficiels et d'altérations.

TABLEAU 2

Table des valeurs limites de r_s = coefficient de corrélation de rang de SPEARMAN - d'après OLDS (1938)

N	Niveau de probabilité	
	0,05	0,01
4	1,000	
5	0,900	1,000
6	0,829	0,943
7	0,714	0,893
8	0,643	0,833
9	0,600	0,783
10	0,564	0,746
12	0,506	0,712
14	0,456	0,645
16	0,425	0,601
18	0,399	0,564
20	0,377	0,534
22	0,359	0,508
24	0,343	0,485
26	0,329	0,465
28	0,317	0,448
30	0,306	0,432

Majeurs :

Les tableaux sont calculés pour une probabilité de 0,01 et les limites inférieures et supérieures de r_s sont données à droite du tableau, ainsi que N qui représente le nombre d'analyses (x) relatif à ce niveau.

Pour tous les éléments et à tous les niveaux, sauf quatre exceptions, il existe une *corrélation positive*. Cette corrélation est en général très significative, par exemple pour le niveau 150 cm, la limite r_s étant +0,283, les différents r_s calculés vont de 0,391 à 0,861.

CORRÉLATIONS DANS LES ALTÉRATIONS DE LA ZONE TROPICALE SÈCHE

TABLEAU 1
r_s : éléments majeurs

Profondeur (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	N	limites <i>r_s</i> à 0,01	limites <i>r_s</i> à 0,001
0-25	0,554	-0,151	0,723	0,484	0,603	0,545	0,481	0,740	0,692	59	±0,323	±0,416
50	0,635	0,061	0,711	0,483	0,482	0,489	<i>0,356</i>	0,753	0,638	75	0,289	0,375
100	0,522	0,151	0,667	0,461	0,605	0,553	<i>0,349</i>	0,709	0,742	81	0,278	0,363
150	0,762	0,391	0,780	0,531	0,622	0,597	0,572	0,723	0,861	78	0,283	0,370
200	0,790	<i>0,368</i>	0,901	0,676	0,695	0,535	0,552	0,857	0,780	67	0,304	0,395
250	0,886	0,518	0,940	0,721	0,748	0,671	0,611	0,863	0,838	72	0,294	0,382
300	0,816	0,512	0,888	0,832	0,799	0,660	0,736	0,842	0,866	67	0,304	0,395
350	0,867	0,550	0,815	0,456	0,821	0,706	0,602	0,795	0,764	57	0,328	0,423
400	0,943	0,711	0,947	0,828	0,859	0,734	0,767	0,875	0,896	60	0,330	0,414
450	0,876	0,553	0,822	0,632	0,771	0,671	0,788	0,801	0,808	45	0,366	0,476
500	0,921	0,629	0,928	0,763	0,709	0,583	0,755	0,803	0,854	43	0,373	0,485
600	0,884	0,523	0,863	0,703	0,817	0,726	0,676	0,848	0,877	60	0,330	0,414
700	0,862	0,771	0,782	0,702	0,770	0,736	<i>0,463</i>	0,846	0,811	41	0,381	0,495
800	0,889	0,644	0,863	0,719	0,796	0,656	0,618	0,835	0,877	36	0,424	0,526
900	0,899	0,790	0,938	0,799	0,745	0,670	<i>0,580</i>	0,785	0,779	26	0,496	0,603
1 000	0,872	0,782	0,905	0,876	0,826	0,770	0,457	0,925	0,975	19	0,575	0,686
1 200	<i>0,713</i>	0,879	0,945	<i>0,643</i>	0,888	<i>0,715</i>	<i>0,659</i>	0,828	0,863	15	0,641	0,750
Σ <i>r_s</i> : 17	0,805	0,511	0,848	0,665	0,739	0,648	0,590	0,813	0,819			

en gras : absence de corrélation significative à 0,01 et 0,001.

en italique : corrélation positive significative à 0,01.

en romain : corrélation positive significative à 0,001.

En fait l'hypothèse nulle n'est pas vérifiée, les variables *x* et *y* ne sont pas distribuées au hasard et il existe une association significative pour tous les éléments entre ce niveau et la roche dure. Les exceptions concernent l'aluminium jusqu'à 1 m et le sodium à 10 m. Nous discuterons des quatre cas dans le chapitre consacré aux interprétations.

Traces :

Les tableaux sont donnés pour une probabilité de

0,001 ce qui augmente encore l'intervalle pour lequel il n'existe pas de corrélations.

— Les coefficients de corrélation de rang ont été pondérés pour Cu, Ni, Cr, à l'aide de la formule de SIEGEL (3) ce qui baisse légèrement la valeur de *r_s* mais ne la change pas fondamentalement.

Ex. : cuivre niveau 0 cm — *r_s* = 0,685 au lieu de 0,692.

— Pour les éléments suivants Co, Zr, Zn, Pb, Sr. Le nombre d'analyses pour chaque niveau n'est pas constant — *N* est indiqué en haut de la case à gauche.

TABLEAU 2
r_s : éléments traces

Profondeur (cm)	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Pb	Sr	V	Zn	Zr	N	limites <i>r_s</i> à 0,01	limites <i>r_s</i> à 0,001
0-25	0,577	⁴⁹ 0,667	0,385	0,685	0,185	0,800	⁵⁷ 0,574	⁵¹ 0,699	0,649	⁸⁷ 0,485	⁵⁷ 0,527	58	±0,335	±0,420
50	0,670	⁵⁰ 0,689	0,735	0,744	0,640	0,875	⁶⁸ 0,736	⁵³ 0,448	0,522	³¹ 0,705	⁶⁷ 0,668	71	0,305	0,384
100	0,709	⁶⁷ 0,737	0,701	0,781	0,513	0,721	⁶⁹ 0,728	⁷¹ 0,645	0,737	⁴⁰ 0,358	⁷⁶ 0,704	80	0,288	0,365
150	0,818	⁶¹ 0,858	0,755	0,747	0,702	0,863	⁷⁰ 0,784	⁶⁴ 0,694	0,732	⁴⁰ 0,555	⁷⁴ 0,786	77	0,294	0,371
200	0,809	⁵⁶ 0,785	0,583	0,769	0,639	0,848	⁶⁴ 0,523	⁵⁹ 0,728	0,698	³¹ 0,579	⁶³ 0,590	68	0,311	0,392
250	0,831	⁵⁸ 0,852	0,788	0,789	0,711	0,873	⁶¹ 0,765	⁶⁰ 0,682	0,820	³⁹ 0,651	⁶⁹ 0,781	72	0,294	0,382
300	0,880	⁵⁹ 0,882	0,775	0,716	0,718	0,889	⁶⁴ 0,771	⁵⁷ 0,773	0,650	³⁴ 0,728	⁶² 0,695	69	0,309	0,389
350	0,715	³⁹ 0,903	0,805	0,770	0,689	0,878	⁵¹ 0,631	⁴⁵ 0,780	0,800	²⁸ 0,300	⁵⁴ 0,835	56	0,340	0,426
400	0,904	⁴⁸ 0,909	0,827	0,791	0,671	0,924	⁵⁴ 0,878	⁵¹ 0,783	0,732	³⁰ 0,863	⁵⁶ 0,757	60	0,330	0,414
450	0,726	³⁴ 0,840	0,826	0,831	0,645	0,870	⁴⁰ 0,701	³⁷ 0,864	0,573	²⁵ 0,289	⁴² 0,873	44	0,385	0,480
500	0,816	³⁷ 0,857	0,707	0,814	0,800	0,836	³⁹ 0,840	³⁷ 0,723	0,785	²³ 0,728	⁴⁰ 0,820	42	0,393	0,490
600	0,845	⁴⁸ 0,874	0,798	0,750	0,723	0,893	⁵⁴ 0,781	⁵² 0,819	0,749	³² 0,740	⁵⁷ 0,951	60	0,330	0,414
700	0,870	³³ 0,848	0,800	0,805	0,751	0,864	³⁴ 0,765	³⁷ 0,617	0,554	²² 0,738	³⁷ 0,861	40	0,403	0,499
800	0,690	²⁶ 0,909	0,868	0,771	<i>0,511</i>	0,924	³¹ 0,848	³¹ 0,700	0,888	¹⁷ 0,446	³³ 0,963	33	0,442	0,548
900	0,819	²² 0,837	0,912	0,871	0,795	0,918	²⁵ 0,825	²⁵ 0,805	0,726	¹⁶ 0,679	²³ 0,952	26	0,496	0,603
1 000	0,667	¹⁶ 0,751	0,875	0,756	0,748	0,823	²⁰ 0,920	¹⁹ 0,731	0,832	¹² 0,374	¹⁸ 0,925	19	0,575	0,686
1 200	0,854	¹³ 0,777	0,746	0,946	<i>0,569</i>	0,906	¹⁵ 0,930	¹⁵ 0,719	0,725	¹⁰ 0,458	¹⁵ 0,999	16	0,622	0,731
$\frac{\Sigma r_s}{17}$	0,776	0,822	0,758	0,784	0,648	0,865	0,765	0,718	0,716	0,569	0,805			

en gras : absence de corrélation significative à 0,01 et 0,001.

en italique : corrélation positive significative à 0,01.

en romain : corrélation positive significative à 0,001.

angle supérieur gauche : nombre d'analyses traitées pour l'élément considéré.

— Il existe une corrélation positive pour tous les éléments à tous les niveaux sauf pour le niveau 0 et 12 m de lithium et pour 6 niveaux du zinc. Ces huit exceptions seront discutées dans les interprétations.

— Les valeurs en italique se trouvent comprises entre les limites des probabilités 0,001 et 0,01, elles représentent une corrélation positive à la probabilité 0,01 et une absence de corrélation à la probabilité 0,001.

— Comme pour les majeurs les coefficients de corrélation de rang sont en général très largement supérieurs à la limite. Par exemple pour le niveau 150 la limite étant 0,294 les différents coefficients calculés s'étagent entre 0,702 et 0,865. Donc la corrélation est très largement positive.

III. — INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Les corrélations observées dans les tableaux généraux de résultats indiquent une relation positive pour presque tous les éléments et à tous les niveaux. Ce qui peut se résumer très simplement en disant que le sol et les niveaux d'altérations reflètent très exactement la composition de la roche sous-jacente.

Cependant nous devons examiner les exceptions qui existent et discuter dans quel cadre géochimique et dans quel contexte environnant ces résultats ont été obtenus.

Les conclusions devront tenir compte des limites méthodologiques mais surtout de l'individualité de chaque série de puits. En fait les buts poursuivis pour l'étude des altérations nous ont amenés à choisir des zones favorables à cette étude et à éliminer certaines régions à priori défavorables :

1° les zones où les épaisseurs supposées des niveaux altérés dépasseraient 15 m, limite imposée par le creusement manuel. En particulier la plupart des plateaux cuirassés ont une épaisseur d'altérite sous-jacente supérieure à 20 m.

2° les zones basses où le niveau hydrostatique supposé serait assez proche de la surface. Le manque de moyen de pompage sérieux arrête le creusement du puits très rapidement, en particulier, dans les régions à climat soudano-guinéen avec une pluviosité de l'ordre de 1 200 mm/an.

3° les zones à recouvrement important ; vallée

fluviale ou gros marigot, la nappe colluviale-alluviale n'a pas de rapport avec le substratum.

Donc nos puits se localisent géographiquement dans les zones assez peu cuirassées, à grande densité d'affleurement. Dans les provinces basiques il s'agit souvent des chaînes de collines à sommet convexe et pentes fortes. Dans les provinces acides il s'agit surtout de massifs érodés et décapés. En fait dans la zone tropicale sèche, cela ne représente qu'une faible partie de la superficie totale.

Éléments majeurs

Tous les éléments des niveaux superficiels possèdent une corrélation positive avec la roche dure, sauf pour l'aluminium dans trois niveaux (0 cm - 50 cm - 100 cm). L'hypothèse expliquant le mieux ce phénomène est certainement celle de la faible mobilité de cet élément. En effet dans un contexte de lessivage des différents majeurs, l'aluminium reste stable et de ce fait il y a concentration relative par rapport aux autres éléments majeurs. En outre les apports superficiels éventuels, provenant en grande partie des buttes-témoins kaoliniques qui dominent le paysage, comportent des minéraux de néogène riches en aluminium. Ces enrichissements relatifs et absolus interviennent dans une proportion moindre en ce qui concerne les profils des zones décapées : la faible épaisseur du manteau d'altération et du sol limite les variations de teneurs en aluminium, notamment. A partir de 150 cm les coefficients de rang redeviennent positifs, il y a alors corrélation entre la roche dure et les niveaux d'altération profonds. L'autre exception concerne le niveau 1 000 cm pour le sodium, le r_s calculé est .457 alors que la limite est à .575 pour un nombre d'échantillons de 19. Le sodium étant un élément très mobile dès les premiers stades de l'altération, c'est dans la zone de départ, pour les puits profonds à grande épaisseur d'altération que nous aurons les plus fortes variations entre la roche dure et les niveaux altérés. Schématiquement, nous pouvons dire que ces puits profonds correspondent à des altérations épaisses, anciennes et probablement de type ferrallitique. En outre si nous considérons la moyenne des coefficients de rang sur les 17 niveaux étudiés, c'est Na_2O qui, bien que largement positif, se rapproche le plus de la valeur limite où il n'existe plus de corrélation.

Ces valeurs moyennes indiquent que les mobilités des différents éléments sont respectées, mis à part l'aluminium. Nous voyons dans l'ordre Na, Ca,

Mn, Mg, Si qui semblent présenter les moins bonnes corrélations de rang, par rapport à K, Ti, Fe qui sont très stables et dont r_s est très élevé à tous les niveaux.

En fait, il ne peut être question de comparer directement les coefficients de corrélations de rang avec la mobilité relative des éléments, mais simplement de saisir une évolution générale et une tendance de ces coefficients dans les différents niveaux d'altération.

Eléments traces

Ils présentent une très bonne corrélation positive. Les exceptions qui ne présentent pas de corrélations positives sont Li (0 cm et 1 200 cm) et Zn (100 cm - 350 cm - 450 cm - 800 cm - 1 000 cm - 1 200 cm).

Pour le lithium, élément alcalin, la même hypothèse que pour le sodium peut être formulée : le maximum du lessivage s'effectue dans la zone de départ, ce qui explique le manque de corrélation à 1 200 cm. En surface nous devons faire intervenir une autre explication : la relation lithium-aluminium qui existe dans les illites (NICHOLLS et LORING, 1962). Ces phyllites, qui constituent avec la kaolinite l'essentiel des migrations mécaniques superficielles, pourraient ainsi constituer une cause d'augmentation des teneurs en lithium des horizons supérieurs, s'opposant au processus global d'appauvrissement chimique par hydrolyse. Les bilans minéralogiques, notamment dans le cas des profils sur roches basiques pour lesquels la preuve d'apports d'illites est plus aisée à établir, sont encore trop fragmentaires pour permettre une appréciation valable de l'importance de ce phénomène.

Le cas du zinc nous semble ininterprétable dans l'état actuel de nos travaux. Les niveaux qui ne présentent pas de corrélation sont intercalés au milieu de niveaux présentant une bonne corrélation positive. Aucune explication cohérente rattachée à la profondeur ou au lessivage ne peut être émise. De telles variations aléatoires proviennent peut-être d'une pollution après prélèvement ou d'une difficulté à doser le zinc par la méthode spectrographique d'émission d'arc.

Certains éléments montrent une tendance à ne plus présenter de corrélation positive pour une probabilité supérieure à 0,01. Il s'agit, pour les niveaux superficiels, du chrome à 0 cm et, pour les niveaux d'altération profonds, du vanadium à 1 200 cm du baryum à 1000 et du strontium à 1200.

Le comportement du chrome est à rapprocher de celui de l'aluminium, il remplace très facilement Al^{3+} dans les structures des silicates et l'hypothèse émise pour les niveaux superficiels, en ce qui concerne l'aluminium, est valable pour le chrome. Les deux alcalino-terreux strontium et baryum sont considérés comme des éléments mobiles au cours du lessivage. L'hypothèse avancée pour le sodium et le lithium peut être utilisée pour ces deux éléments, et se trouverait confirmée. En résumé, le phénomène visible dans la zone de départ affecte le sodium et le lithium et, à un moindre degré, le strontium et le baryum. Le processus pourrait être le suivant : départ intense des alcalins et alcalino-terreux, sauf potassium, dans les altérations profondes de type ferrallitique ; ce lessivage se marquerait par les absences de corrélation à 1 200 et 1 000 cm. Puis, au fur et à mesure que nous remontons vers la surface, nous introduisons de nouveaux puits moins profonds qui n'ont pas subi ce lessivage intense, la résultante donne très rapidement une corrélation positive par simple effet de dilution.

Notons que le vanadium à 1 200 cm donne une absence de corrélation difficilement explicable, cet élément étant considéré comme stable au cours de l'altération météorique.

Niveaux superficiels

L'examen des résultats concernant les niveaux de surface jusqu'à 150 cm, nous a montré que, hormis le chrome et l'aluminium, tous les éléments présentent une corrélation positive avec le substratum. Ces résultats ne sont applicables que dans les zones géographiques ressemblant à celles de nos études, c'est-à-dire sans cuirassement important et sans recouvrement visible. Cependant l'importance accordée aux niveaux de surface en prospection géochimique nous a amené à faire quelques essais sur les corrélations de ces niveaux.

Nous avons sélectionné les trente échantillons présentant les plus fortes différences de rang et cela pour tous les majeurs. Trente analyses représentent la moitié des échantillons du niveau 0 cm et un peu plus du tiers des niveaux 50 cm, 100 cm. Nous avons recalculé les coefficients de corrélations de rang de ces trente échantillons les plus dispersés. Les résultats sont donnés dans le tableau 3.

CORRÉLATIONS DANS LES ALTÉRATIONS DE LA ZONE TROPICALE SÈCHE

TABLEAU 3

*Niveaux superficiels*Coefficients r_s des 30 puits présentant la différence de rang la plus forte dans la première étude

Profondeur (cm)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
0,25	0,164	-0,587	0,416	0,143	0,299	0,069	-0,047	0,471	0,260
50	0,145	-0,675	0,116	-0,481	-0,226	-0,277	-0,353	0,277	-0,161
100	-0,090	-0,638	-0,225	-0,324	0,252	-0,035	-0,502	0,237	0,058
150	0,106	-0,577	0,352	-0,250	-0,116	-0,268	-0,179	0,170	0,348
200	0,488	-0,426	0,727	0,246	0,271	0,004	-0,315	0,621	0,365
250	0,652	-0,291	0,774	0,133	-0,133	0,186	-0,053	0,417	0,291

limites de signification : $r_s = \pm 0,461$ à $0,01$.*en gras* : corrélation significative positive.*en italique* : corrélation significative négative.*en romain* : absence de corrélation significative.

Nous voyons immédiatement que les fortes corrélations positives du tableau 1 ont disparu. La plupart des éléments ne présentent plus de corrélation et même, en ce qui concerne l'aluminium, le manganèse à 50 cm, le sodium à 100 cm, nous avons une corrélation négative. L'hypothèse nulle n'est pas vérifiée, il existe une corrélation entre la roche dure et le niveau examiné, mais cette corrélation est négative. Il existe une différence significative systématique entre les x et les y .

Nous devons noter le comportement du potassium qui présente une corrélation positive en surface. Cet alcalin dont la mobilité est considérée par les auteurs comme comparable à celle de la silice serait en fait très stable et comparable au titane et au fer.

A partir du niveau 200 cm la tendance générale semble être celle des tableaux 1 et 2, nous avons une corrélation positive pour le silicium, le fer, le potassium..., même pour les trente échantillons les plus dispersés. Les puits sélectionnés pour leur grande dispersion semblent rejoindre la population générale des puits pris au hasard.

IV. — CONCLUSION

— Les résultats de cette étude sont applicables en pays tropical sec, dans une zone climatique com-

prise entre 300 et 1 400 mm de pluviosité annuelle, où sévissent les climats sahélien, soudanien et soudano-guinéen. En outre ces résultats ne s'appliquent que pour certaines conditions géomorphologiques définies : zones assez découpées, sans cuirassements importants ni recouvrements visibles, et à forte densité d'affleurements. Une généralisation des résultats aux grands paysages cuirassés (« bowé »), ou aux plaines alluviales nous semble actuellement prématurée, des études complémentaires seront faites sur ces paysages.

— La méthode utilisée des coefficients de corrélation de rang de Spearman nous semble bien adaptée pour traiter ce cadre géochimique où tous les paramètres sont variables : diversité de la composition chimique des roches, diversité des épaisseurs des niveaux d'altération, diversité des climats, des paysages et de la topographie. Le coefficient de rang est d'autre part facilement applicable aux analyses des éléments traces qui sont semi-quantitatives et souvent inférieures aux limites de détection.

— Dans ces conditions les conclusions suivantes peuvent être avancées :

1° La géochimie de surface donne « une image » fidèle de la roche saine, même si celle-ci est recouverte par d'épais niveaux d'altérites.

2° Les seuls éléments de surface qui présentent une variation importante avec le substratum sont l'aluminium, le chrome et le lithium.

Il y a donc une condition limitative à la mise en œuvre de la prospection géochimique de ces éléments, notamment pour le chrome souvent recherché par ces techniques.

3° La corrélation surface-substratum est particulièrement forte pour fer, titane, potassium, nickel, cobalt. Elle est assez forte pour silicium, magnésium, manganèse, calcium, cuivre, baryum, zirconium, plomb, vanadium, strontium. Elle est faible, bien que positive, pour sodium et lithium.

4° Nous devons insister sur la position remarquable du potassium. C'est un élément particulièrement stable tout au long de nos profils d'altération.

5° Dans les altérations profondes, de tendance ferrallitique probablement ancienne, les éléments qui présentent la plus forte variation avec le substratum sont le sodium et le lithium et, à un degré moindre, le vanadium et le strontium.

6° Les coefficients de corrélation relatifs à ces quatre éléments, sodium, lithium, vanadium et strontium,

se révèlent très faibles pour les niveaux 10 et 12 m. Ce résultat indique une tendance à un lessivage intense dans la zone du front d'altération de ces éléments très mobiles, tendance confirmée par les travaux antérieurs sur les processus de ferrallitisation.

Ces conclusions générales rejoignent les concepts généralement admis en géochimie des régions tropicales sèches. Elles sont parfois en contradiction avec ces concepts. Ces contradictions demeurent au stade présent des hypothèses de travail qui seront précisées dans les travaux ultérieurs.

Du point de vue pédologique, l'existence d'un miroir géochimique du socle dans la partie superficielle des profils rejoint les conclusions d'un grand nombre de travaux récents (entre autres, HUMBEL F.X., 1968), intéressant la zone climatique concernée, qui tendent à montrer que l'aspect morphologique « colluvial » de nombreux sols n'exclut nullement une certaine autochtonie dans un plan vertical ou, tout au moins, une allochtonie réduite le long de vecteurs horizontaux.

Manuscrit reçu au SCD le 13 janvier 1973

DOCUMENTS CITÉS

FLANAGAN (F.J.), 1957. — Semi-quantitative spectrographic analysis and rank correlation in geochemistry. *Geoch. et Cosmoch. Acta*, vol. 12, pp. 315-322.

HUMBEL (F.X.), 1968. — Contribution à l'étude des sols à horizons caillouteux du Nord Cameroun. Rapport centre ORSTOM-Yaoundé, 55 p., *multigr.*

MICHARD (G.), TREUIL (M.), 1969. — Réflexions sur l'utilisation des corrélations entre éléments-traces en géochimie : exemples. *Bull. Soc. Géol. de France* (7), XI, p. 595.

NICHOLLS (G.D.), LORING (D.H.), 1962. — Geochemistry of some British carboniferous sediments. *Geoch. et Cosmoch. Acta*, t. 26, p. 181.

STIEGEL (S.), 1956. — Nonparametric statistics for the behavioral Sciences - (International Student Edition) McGraw Hill edit. 1956.