

LE RÔLE DE L'ALTÉRATION ET DE LA GRANULOMÉTRIE
DANS L'INTERPRÉTATION DES ANALYSES
DES MINÉRAUX LOURDS DÉTRITIQUES (*) (**)

par L. BUSTAMANTE S. C.

(2 fig. dans le texte)

RÉSUMÉ

L'analyse très poussée de l'aspect des minéraux lourds prélevés sur le terrain, les données d'attaques chimiques en laboratoire, ainsi que des calculs théoriques de l'équivalence hydraulique permettent de répartir les minéraux lourds en quatre groupes distincts.

Au sein de chaque groupe, la densité, la forme et la résistance à l'altération des minéraux sont assez proches, ce qui aide à déceler le rôle de la granulométrie sur les variations de teneurs au sein d'un même dépôt.

L'examen systématique des modifications des caractères optiques apparues pour chaque espèce minéralogique lors des attaques expérimentales a fourni les références nécessaires à l'identification des grains fort altérés recueillis dans les terrasses de la Meuse.

SUMMARY

Heavy minerals collected in sediments from the terraces of the River Meuse can be divided into four distinct groups based on detailed microscopic analysis, experimental data concerning their behaviour under chemical attack, and theoretical calculation of their hydraulic equivalence.

Within each group, the density of the minerals, their form, and their resistance to alteration are similar. This help in determining the influence of granulometry on the variation in proportions of heavy minerals in a given sediment.

Systematic study of the changes in optical properties of each mineral species during experimental chemical attack provides the basis for identification of strongly altered grains.

INTRODUCTION

Dans les sédiments, les associations de minéraux lourds résultent de la nature des formations mères, de l'action des phénomènes post-sédimentaires et du comportement hydraulique des grains.

Comparer et interpréter correctement diverses associations minéralogiques exigent donc d'atténuer ou d'identifier au préalable les influences hydrodynamiques contemporaines de la sédimentation, ainsi que le rôle des modifications post-sédimen-

(*) Communication présentée et manuscrit déposé le 4 novembre 1975.

(**) Résultats extraits d'une dissertation doctorale encore inédite, entamée en 1967 et défendue à la K.U.L. en 1973; promoteur: professeur F. Gullentops. Le professeur J. Verkaeren a critiqué et relu le texte. Nous les en remercions.

taires. Notre note tente d'exposer brièvement la méthode suivie pour cerner ce problème d'interprétation à la lumière d'une étude exhaustive des alluvions actuelles et anciennes du bassin de la Meuse.

L'altération des minéraux prélevés sur le terrain a été reproduite approximativement en laboratoire. De cette expérience a été déduite une nouvelle échelle d'altérabilité (*vide infra*).

En outre, une reconstitution de faciès progressivement altérés de chaque espèce minérale a permis de mieux cerner la précision des déterminations et de supprimer l'emploi du terme équivoque d'altérite (Van Andel, Tj. 1950).

L'échelle d'altération combinée aux résultats de calculs théoriques de l'équivalence hydraulique a consolidé les critères de comparaison entre diverses associations minérales.

La granulométrie des minéraux a été établie par mesure directe de la largeur des grains au microscope pétrographique (Berthois, L. 1947), en même temps que les déterminations minéralogiques. Cette méthode fournit en nombre absolu la répartition granulométrique de chaque espèce. Elle suffit souvent à comprendre les variations de teneurs observées au sein d'un même dépôt.

I. — PROBLÈME DE L'ALTÉRATION DES MINÉRAUX LOURDS

Les minéraux lourds offrent une résistance différentielle aux altérations post-sédimentaires dont les effets peuvent modifier profondément la composition pétrographique originelle d'un dépôt. Ce phénomène est complexe. Il est lié aux paléoclimats post-sédimentaires, aux qualités locales du substratum, à tout l'ensemble de l'évolution des données paléocéologiques ainsi qu'à la diagénèse.

Les minéraux susceptibles d'altération vont subir une oblitération progressive de leurs caractères optiques originels, ce qui rend difficile leur identification. Ceci a jadis donné lieu à l'introduction du terme « altérite » (Van Andel, 1950), forcément peu précis et source de confusion. Une expérience, en laboratoire, a voulu mettre fin à l'imprécision résultant de l'emploi de ce terme.

1. — *Échelle expérimentale d'altération des minéraux lourds*

A. *L'expérience*

L'expérience sur l'altération des minéraux lourds a été réalisée sur la fraction de 3 à 3,25 \varnothing des sédiments subactuels prélevés dans les alluvions de l'Ourthe, de la Lesse, de la Moselle, du Rhin et sur une basse terrasse de l'Amblève.

Le matériel a été immergé dans des solutions azéotropes d'HCl et d'HNO₃ pendant 700 heures à une température de 70° C.

B. *Résultats de l'expérience*

a) *Ordre d'altération des minéraux lourds*

L'expérience a montré l'altérabilité de chaque espèce minérale et la répartition possible des minéraux en quatre groupes :

— Minéraux stables : zircon, rutile, anatase, brookite.

— Minéraux résistants : tourmaline, staurotide, disthène, andalousite, topaze, sillimanite.

— Minéraux altérables : épidote, hornblende brune, hornblende verte, grenat, enstatite, augite, titanoaugite, chloritoïde, sphène, hornblende basaltique.

— Minéraux très altérables : hypersthène, apatite, olivine, fluorine.

b) *Changements de caractères optiques des minéraux*

Au cours de l'expérience on a constaté les faits suivants.

— L'épidote, la hornblende et l'augite s'altèrent suivant leurs plans de clivage et de fracture. Le relief et le pléochroïsme s'atténuent. Ces minéraux prennent un aspect sale, très foncé par formation d'oxydes de fer surtout au centre des grains, le long de plans de clivage. La hornblende, en outre, devient parfois incolore et isotrope vers ses bords. La hornblende brune s'est montrée plus résistante que la hornblende verte. Cette dernière, fort altérée, montre un passage à la chlorite et les grains ressemblent à un agglomérat.

La hornblende basaltique s'est transformée en une masse incolore, isotrope, reconnaissable seulement au clivage et à la forme prismatique. Parmi les pyroxènes, l'enstatite s'est montrée la plus résistante.

— Contrairement à ce qu'on observe dans les sédiments naturels, le sphène s'est altéré aussi intensément que le chloritoïde, la hornblende verte et la hornblende basaltique.

— Le grenat du type almandin de la Moselle s'est altéré plus facilement que les grenats des bassins ardennais et rhénan.

— Une très grande partie des grains d'ilménite se sont transformés en grains d'anatase fort corrodés de teinte bleue.

— Le chloritoïde fort altéré montre un passage à la chlorite; son relief diminue.

— Les encoches de corrosion que présentent le disthène, la staurotide, la tourmaline, le zircon et le rutile sont probablement d'origine primaire et indépendants de l'expérience.

II. — INFLUENCE DE LA GRANULOMÉTRIE

Dans les analyses des minéraux lourds on enregistre souvent des teneurs différentes au sein de sédiments d'une même provenance mais de granulométrie différente. A l'extrême, les mêmes sédiments peuvent présenter des associations minéralogiques très distinctes.

Parmi les différentes méthodes appliquées pour déceler l'influence de la granulométrie, l'analyse fractionnée a été tentée (Zonneveld, 1946; Kalinsko, M., 1948).

Par ailleurs, Rubey (1933) et Rittenhouse (1943) ont proposé l'hypothèse de l'équivalence hydraulique qui peut s'exprimer comme une tendance à la sédimentation simultanée de minéraux lourds plus petits et de grains de quartz plus grossiers (p. ex. quartz et grenat, quartz et ilménite).

1. — *L'analyse fractionnée*

a) *tamissage ou mesure directe des grains*

L'analyse fractionnée des minéraux lourds peut s'opérer soit par la méthode traditionnelle, soit par la mesure directe de la largeur des grains avec le micromètre

oculaire. La première méthode requiert à peu près 10 fois plus de temps que la seconde, mise au point par Berthois en 1947. Deux heures pour cette seconde méthode suffisent au comptage et à la mesure de 300 grains par la méthode du ruban.

Les légères différences apparues entre les deux méthodes (fig. 1) pourraient s'expliquer par le plus grand nombre de grains comptés (environ 1 000 grains par échantillon) dans l'analyse par fractions individuelles.

b) *Valeur des comptages*

L'analyse fractionnée par mesure directe de la largeur des grains donne la répartition granulométrique réelle en nombre absolu de chaque espèce minérale pour l'ensemble de l'échantillon.

Les pourcentages obtenus par cette méthode montrent fréquemment pour un même sédiment de fortes différences de teneurs simplement liées à la valeur modale de l'échantillon prélevé. Il est donc indispensable de préciser le rôle sélectif de la granulométrie, qui pourrait erronément suggérer la présence d'éléments de sources différentes (tableau I, 7 échantillons d'un même dépôt, la terrasse de Caberg).

Les comptages peuvent montrer de nettes variations au sein de chaque groupe, et entre les quatre groupes. Dès lors, retenir seulement la fraction modale du sédiment (Cromelin, 1964), même si l'on y ajoute une ou deux fractions auxiliaires (Rubey, 1933; Sindowsky, 1949) peut même éliminer certaines espèces minéralogiques qui se concentrent dans d'étroites fractions granulométriques délibérément négligées.

D'ailleurs, le plus souvent, la fraction modale d'un sédiment sableux ne correspond pas à la fraction modale des minéraux lourds. En général, pour le Meuse, plus la fraction modale du sédiment est grossière, plus son contenu en minéraux lourds est pauvre et plus le nombre d'espèces observées est restreint.

L'analyse fractionnée peut seule déceler les répartitions granulométriques bimodales ou plurimodales de chaque espèce minéralogique, et a fortiori, de l'ensemble des minéraux lourds (fig. 2). Cette donnée est nécessaire pour déceler les apports d'origines multiples et les remaniements. Par exemple, pour la Meuse, distinguer les épidoles d'origine ardennaise, d'origine rhénane, ou dues au remaniement de loess, nécessite l'analyse fractionnée. La méthode a permis de situer à proximité de Neroeteren : Waterloos-De Warre la position du confluent Meuse Rhin au Mindel (Bustamante, L., 1974).

2. — *L'équivalence hydraulique*

Dans une étude théorique, Rubey (1933) a montré que pour un même sédiment la valeur modale des minéraux lourds est inférieure à celle du quartz. Il a défini le « diamètre hydraulique équivalent » comme la différence entre l'écart modal des grains sphériques de quartz et ceux du minéral lourd qui présentent dans l'eau calme une même vitesse de sédimentation.

A. *L'équivalence hydraulique des minéraux lourds du bassin mosan*

a) *Méthodologie*

La loi de Stokes permet de calculer les écarts théoriques des différentes minéraux lourds supposés sphériques par rapport aux grains de quartz de même forme. Les écarts théoriques ont ensuite été comparés aux écarts réels d'une série d'échantillons.

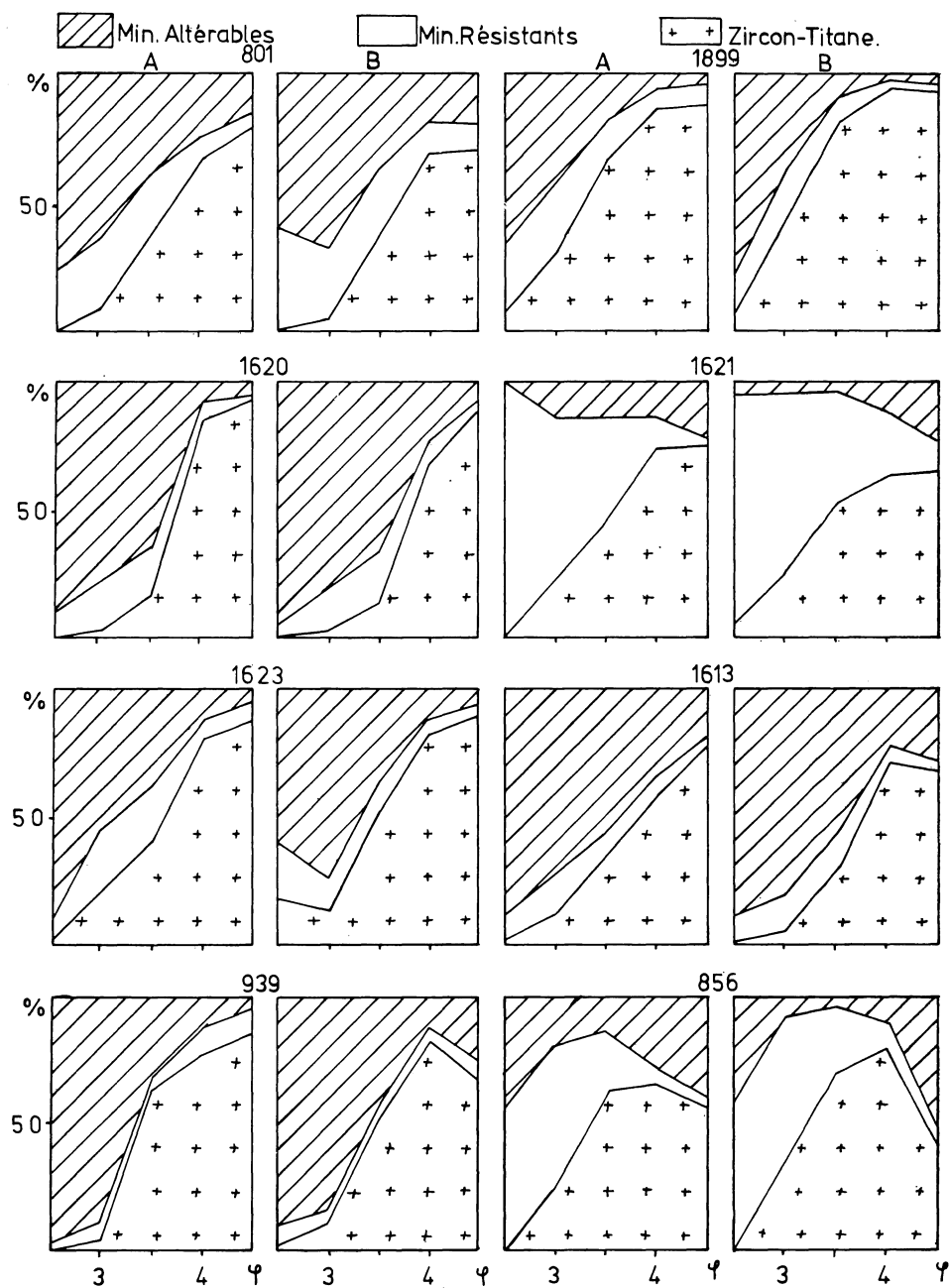


Fig. 1. — Diagrammes comparatifs des analyses fractionnées par mesurage de la largeur des grains (A) et par l'étude des fractions individuelles (B).

Par la relation de Hatch (1933), nous avons obtenu le mode des minéraux légers pour une fréquence relative en nombre à partir d'une fréquence relative en poids. Cette méthode évite les nombreux calculs indispensables pour transformer les fréquences relatives en nombre des minéraux lourds en fréquences relatives en poids.

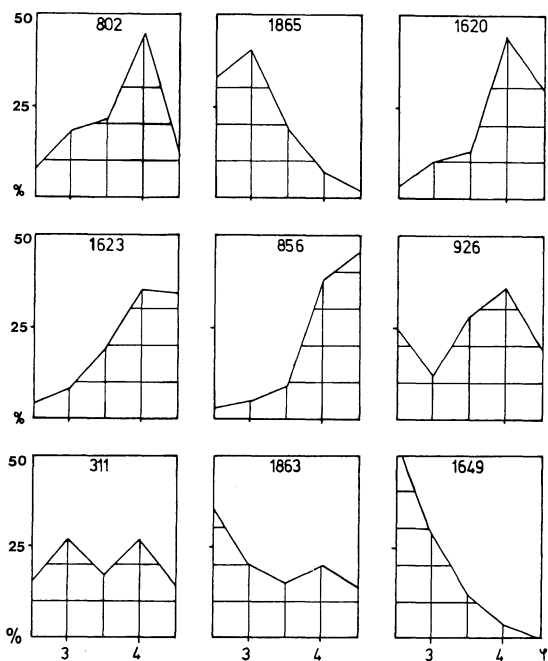


Fig. 2. — Répartition granulométrique des minéraux lourds transparents.

b) Résultats et discussion

Dans le bassin mosan, la dimension originelle des grains à leur source ainsi que leur forme constituent les facteurs prédominants de la sédimentation. Le rôle de la densité n'est guère perceptible. Ce résultat découle de l'absence à peu près constante de concordance entre les écarts théoriques et les écarts réels.

Les grenats, les épidotes et les tourmalines du bassin de la Meuse ont plusieurs origines : Ardennes, sables tertiaires, loess, Rhin, Vosges. Chaque source a sa propre valeur modale.

L'épidote d'origine rhénane est plus grossière que l'épidote d'origine mosane.

Dans les sédiments de l'Ambève, l'emplacement de la tourmaline d'après sa densité résulte du remaniement important par l'Ambève des couches reviniennes et des formations grésoschisteuses du Dévonien.

Le mode très petit du grenat dans les sédiments de l'Ambève résulte des apports importants de son affluent de la rive gauche. La Salm, à la traversée des couches salmiennes du massif de Stavelot, est chargée en grenats équidimensionnels de petites tailles (3,5 à 4,5 \varnothing).

TABLEAU I

Analyses fractionnées des minéraux lourds de la terrasse de Caberg-Pietersen

Ø	Opaques	Schistes	Zircon	Zircon zoné	Rutile	Anatase	Cassitérite	Tourmaline	Staurotide	Disthène	Andalousite	Topaze	Sillimanite	Épidote	Zoisite	Feldspath saussurité	Hornblende brune	Hornblende verte	Grenat rose	Grenat inclus	Enstatite	Augite	Titanoaugite	Chloritoïde brun	Chloritoïde vert	Chloritoïde vert clair	Sphène
Ech. 322																											
2 — 2.5			1					1					*	1			3	2						1		1	
2.5 — 3			12		4			7	1	*	*		*	2			12	3	2	2			4	1	2		
3 — 3.5			62		19	2		12						10	1	*	9	3	4	2					1	1	1
3.5 — 4			60		7	1		14						8	1		2	3	6	4							
4 — 4.5								1											3	2							
NT			135		30	3		35	1					21	2		26	11	15	11				5	1	4	1
%T	20	40	45		10	1		12	.3	*	*		*	7	6	*	9	3	5	.3				2	.3	1	.3
Ech. 323																											
2 — 2.5																	1		1							1	
2.5 — 3					2	2		7	1					1			5	4	1					1	1	3	
3 — 3.5			6		8	1		12		1				1			6	4	6	4	*						1
3.5 — 4			65		26	3		5		1				15			2	2	6	3							
4 — 4.5			81		5	4								10	1	*			2								1
NT			152		41	10		24	1	2				27			14	10	16	7				1	1	4	2
%T	65	12	48		13	3		8	.3	.6				9	.3	*	5	3	5	2	*			.3	.3	1	.6
Ech. 324																											
2 — 2.5										*							4									2	1
2.5 — 3																	3	2	2	1						5	
3 — 3.5			7		3	1		3					*	3			1		5	2			1				1
3.5 — 4			88		10	3	1	4	1					18	1		1		13	1							1
4 — 4.5			105		14	1		2						8	1	*	1	1	4								1
NT			200		27	5	1	9	1					29	2		10	3	24	4				3		7	3
%T	50	15	61		8	2	.3	3	.3	*			*	9	.6	*	3	1	7	1				1		2	1
Ech. 325																											
2 — 2.5																	1		8	2						2	1
2.5 — 3								1						1			2	12	5				2		3		
3 — 3.5			1		1	3		3	2					1			1	2	3	1							
3.5 — 4			61		22	6		8	1					18		*	2	2	1								
4 — 4.5			107		21	3		5						16	1		1	1									
NT			169		44	12		17	3					36	1		4	7	24	8				2		5	1
%T	47	20	50		13	4		5	1					12	.3	*	1	2	7	2				.6		2	.3
Ech. 326																											
2 — 2.5																	1									3	
2.5 — 3								8		1	1		*			2	2	6	1						5		
3 — 3.5			11		9			5	1					2			4		9	3					1	1	
3.5 — 4			99		13	2		7						12			1		12								1
4 — 4.5			86		12			3						9		*	1		3								
NT			196		34	2		23	1	1	1			23			9	2	30	4				5		9	1
%T	57	11	57		10	.6		7	.3	.3	.3		*	7		*	3	.6	9	1				1		3	.3
Ech. 1863																											
2 — 2.5					4	1		7	2		1						31	9		5				5	2	5	2
2.5 — 3					11	1		4	2								17	3	1	4				3	1	2	1
3 — 3.5			8		3	2		2		2				2	1		4		2	2				1	1		1
3.5 — 4			21		2	2		1						3					2	1							
4 — 4.5			14		1																						
NT			44		21	6		14	4	2	1			5	1		52	12	5	13				9	4	7	4
%T	84	5	22		11	3		7	2	1	.5			2	.5		26	6	2	6				4	2	3	2
Ech. 1864																											
2 — 2.5						2		2									31	4	2	1				5	2	1	
2.5 — 3					2	4		6	*		*		*	2			26	6	3	1				2		2	
3 — 3.5			10		3	4		6		2				3			17	4	4	3				1		1	1
3.5 — 4			44		24	6		5		1				10			4		1	1							
4 — 4.5			45		11			1						4	1				1	2							
NT			100		40	16		20		3				19	1		78	14	11	8				8	2	4	1
%T	77	9	31		12	5		6	*	1	*		*	6	.3		24	4	3	3				3	.6	1	.3

III. — APPLICATION DE LA MÉTHODE

Dans le tableau II, les grains sont répartis en groupes suivant leur parenté de résistance à l'altération et de comportement hydraulique. Les proportions minéralogiques sont indiquées en pourcentages en nombre des grains, à la fois à l'intérieur de chaque groupe et aussi par groupe.

La teneur moyenne de chaque groupe est donnée par X. L'emploi des intervalles de confiance de 99 % peut définir conventionnellement l'échantillon type, caractéristique du dépôt. Ceux qui s'écartent de cette définition sont repris et les causes des écarts, étudiées séparément.

Analyses granulométriques et minéralogiques

D'après le mode, les échantillons de sable peuvent être classés comme sable fin (éch. 325), sable fin à moyennement fin (éch. 323, 326 et 1864), sable moyennement fin (éch. 323, 326 et 1864), sable moyennement fin à moyennement grossier (éch. 1863). Les teneurs en espèces minéralogiques lourdes sont largement influencées par la granulométrie. Quelques exemples le montrent clairement.

Les minéraux lourds de l'échantillon 1863 ont une répartition granulométrique bimodale dont la population de mode 3.67 ϕ représente environ 63,5 %.

La fraction modale des minéraux lourds se trouve à 4 ϕ dans les échantillons 322, 323, 324, 326 et 328 et en-dessous de 4 ϕ dans l'échantillon 325.

Groupe Zr-Ti :

La fraction granulométrique 3,5 à 4,5 ϕ des minéraux lourds est très importante, respectivement d'environ 85, 91 et 77 % dans les échantillons 324, 325 et 326. Elle tombe d'environ 51 % dans les échantillons 1863 et 1864.

Les minéraux du groupe Zr-Ti sont généralement concentrés dans les fractions 3,5 — 4,5 ϕ . La teneur globale en rutil et rutile peut donc être très différente pour les échantillons d'un même affleurement mais de granulométrie différente. Toutefois, au sein du groupe Zr-Ti, les variations de teneurs respectives sont négligeables.

Le rapport moyen zircon/rutile reste proche de 3,75.

Minéraux résistants :

La fraction granulométrique 2 à 3,5 ϕ des minéraux lourds représentant environ 15 % dans l'échantillon 324 coïncide avec une faible teneur en minéraux dits résistants.

Au sein de ceux-ci les variations de proportions ne sont pas significatives. Il en va de même des minéraux métamorphiques dont le nombre total de grains comptés est restreint. (Tableau I).

Minéraux altérables :

La fraction granulométrique de 2 à 3,5 ϕ représente environ 26 à 23 % dans les échantillons 323 et 326 et 64 et 49 % dans les échantillons 1863 et 1864, ce qui coïncide avec leur faible ou forte teneur respective en minéraux altérables.

Au sein d'un même groupe, les teneurs respectives sont aussi influencées par la granulométrie. L'épidote est davantage concentrée dans la fraction 3,5 à 4,5 ϕ , tandis que la hornblende s'observe surtout entre 2 à 3,5 ϕ . Ce caractère granulométrique explique que les échantillons 1863 et 1864, à répartition bimodale, (51 % entre 3,5 à 4,5 ϕ) soient riches en hornblende et pauvres en épidote, tandis que les

TABLEAU II

Teneurs par groupe de minéraux lourds de la terrasse de Caberg-Pietersen

Prélèvement et numéro de l'échantillon	Nombre de grains comptés	Zr — Ti				Minéraux résistants						Minéraux altérables											
		Zr — Ti	Zircon	Rutile	Anatase	Min. rés.	Tourmaline	Staurotide	Disthène	Andalousite	Topaze	Sillimanite	Min. Alt.	Épidote	Feldspath. saussuritaïsé	Hornblende brune	Hornblende verte	Grenat	Augite	Chloritoïde brun	Chloritoïde vert	Chloritoïde clair	Sphène
322	301	56	80	18	2	12	97	3					32	24	*	27	11	27		5	1	4	1
323	313	65	75	20	5	9	89	4	7				26	34	*	17	12	27	*	1	1	5	2
324	329	70	86	12	2	3	90	10					27	36	*	12	3	33		4		8	4
325	333	67	75	20	5	6	85	15					27	42	*	5	7	37		2		6	1
326	341	68	84	15	1	8	88	4	4	4			14	28	*	11	2	41		6		11	1
1863	205	35	62	30	8	10	67	19	9	5			55	5	*	46	11	16		8	4	6	4
1864	325	48	64	26	10	7	87		13				45	14	*	53	9	13		6	1	3	1
X	2145	58	75	20	5	8	86	8	5	1			34	26	*	24	8	28		5	1	6	2

teneurs sont inversées pour les échantillons dont les minéraux lourds se concentrent dans des fractions plus fines.

Pour le dépôt, et tous les échantillons qui en proviennent, l'indice d'altération ou rapport

$$\frac{(\text{Zr-Ti}) + \text{minéraux résistants}}{\text{minéraux altérables}} = 1,88.$$

CONCLUSIONS

L'analyse révèle que des échantillons peuvent montrer des teneurs très variables, sans qu'il s'agisse pour autant de sédiments d'origine différente.

Une application correcte des minéraux lourds des sables réclamerait donc, en principe, le comptage d'un grand nombre de grains prélevés dans les fractions granulométriques de chaque dépôt. De tels comptages deviendraient prohibitifs.

En pratique, pour un même dépôt, les valeurs moyennes fournies par quelques échantillons, par exemple 5 à 7, deviennent significatives. Lorsque les conditions d'affleurement sont médiocres, et que les prélèvements se limitent à un ou deux échantillons seulement, les teneurs respectives de chaque minéral peuvent s'écarter assez fortement des valeurs moyennes. Il serait dangereux d'en déduire qu'ils appartiennent nécessairement à des dépôts notoirement différents.

En outre, le faciès sédimentaire des alluvions influence le résultat des comptages. Dans une braided-river, par exemple, les apports des affluents et de la rivière principale gardent longtemps leur individualité. Ils se mélangent mal. Un même dépôt peut montrer des valeurs très différentes d'un lit à l'autre.

Il faut encore mentionner le rôle de l'altération post-sédimentaire qui peut affecter différemment les lambeaux d'un même niveau de terrasse. La position à proximité ou non de la surface topographique des zones d'oscillations des nappes aquifères induit une altération d'intensité variable. De même, un substratum calcaire sous-jacent accélère l'altération de certains minéraux généralement mieux conservés en d'autres endroits.

BIBLIOGRAPHIE

- BERTHOIS, L., 1947. — Nouvelle méthode d'étude quantitative des assemblages des minéraux lourds. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. **22**, p. 1401-1403.
- BERTHOIS, L. et C., 1954. — Étude critique de la méthode de l'analyse granulométrique basée sur la fréquence numérique. *Bull. Soc. Sci. Bret.*, t. **XXIX**, p. 106-110.
- BERTHOIS, L., 1962. — Étude de comportement hydraulique du mica. *J. Sed. Petrol.*, t. **1**, n° 1, p. 40-49.
- BIETLOT, A., 1940. — Méthodes d'analyse granulométrique. Application à quelques sables éocènes belges. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. **64**, pp. 80-174.
- BOSWELL, P. G. H., 1941. — The stability of minerals in sedimentary rocks. *Nature, London*, n° **147**, pp. 734-737.
- BRAJNIKOV, B., 1944. — Sur l'importance de la granulométrie dans l'étude quantitative de minéraux lourds dans un sédiment. *Bull. Soc. Géol. France*, v. **14**, pp. 381-390.
- BRAMLETTE, M. N., 1929. — Natural etching of detrital garnet. *Ann. Mineral*, v. **14**, p. 336-337.
- BRAMLETTE, M. N., 1941. — The stability of minerals in sandstone. *J. Petrology*, v. **11**, pp. 32-36.

- BRIGGS, L. I., 1965. — Heavy minerals correlations and provenances. *J. Sed. Petrol.*, v. **35**, pp. 939-955.
- BRIGGS, L. I., McCULLOCH, D. S., FRANK MOSER, 1962. — The hydraulic shape of sand particles. *J. Sed. Petrol.*, v. **32**, p. 645-656.
- BUSTAMANTE, S. C. L., 1967. — Petrografia sedimentaria del Grupo Capas Rojas, Area de Corpacancha, Dpt. de Junin. Thèse inédite. Fac. Ciencias de l'U.N.M.S.M., Lima, Perú.
- BUSTAMANTE, S. C. L., 1973. — Les minéraux lourds des alluvions sableuses du bassin de la Meuse. Thèse inédite (335 p.). K.U.L.
- BUSTAMANTE, S. C. L., 1974. — Les minéraux lourds des alluvions du bassin de la Meuse. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. **278**, pp. 561-564.
- BUSTAMANTE, S. C. L., 1974. — Synthèse sommaire de l'évolution quaternaire de la Meuse. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. **97**, pp. 383-386.
- BUSTAMANTE, S. C. L., 1975. — Analyse fractionnée des minéraux lourds de la terrasse de Campine : position du confluent Meuse-Rhin au Mindel. *Ann. Soc. Géol. Belg.* t. **98**, pp. 37-42.
- BUSTAMANTE, S. C. L., 1974. — Contribution à l'étude des chloritoides Belges. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. **97**, pp. 273-279.
- CARROLL, D., 1953. — Weatherability of zircon. *J. Sed. Petrol.*, v. **23**, pp. 106-116.
- CARROLL, D., 1957. — Use of the term alterite. *Am. Mineral.*, v. **42**, pp. 110-113.
- CROMMELIN, R. D., 1964. — A contribution to the sedimentary petrology and provenance of young Pleistocene cover sand in the Netherlands. *Geol. Mijnb.*, n° **9**, pp. 389-400.
- DE VORE, G. W., 1958. — The surface chemistry of feldspars as an influence on their decomposition products. *Proc. Nat. Conf. Clays and Clays minerals*, v. **6**, p. 26-41.
- DRYDEN, L. and DRYDEN, C., 1946. — Comparative rates of weathering of source common heavy minerals. *J. Sed. Petrol.*, v. **16**, pp. 91-96.
- EDELMAN, C. H., 1931. — Diagenetische Umwandlungerscheinungen an detritischen Pyroxenen und Amphibolen. *Fortschr. Min. Kryst. Pet.*, v. XVI, pp. 323-324.
- FIELDER, M. and SWINDALE, L., 1954. — Chemical weathering of silicates in soil formation. *J. Sci. Tech. New Zealand*, v. **56**, pp. 140-154.
- FLEMMING, N., 1965. — Form and function of sedimentary particles. *J. Sedim. Petrol.*, v. **35**, pp. 381-391.
- GALEHOUSE, J. S., 1969. — Counting grain mounts : number percentage vs number frequency. *J. Sedim. Petrol.*, v. **39**, pp. 812-815.
- GOLDICH, S., 1938. — A study of rock weathering. *J. Geol.*, v. **46**, pp. 17-58.
- GRAHAM, E. R., 1941. — Acid. clay an agent in chemical weathering. *J. Geol.*, v. **49**, pp. 392-401.
- HATCH, T., 1933. — Determination of « average particle size » from the screen-analysis of non uniform particulate substance. *Jour. Franklin Inst.*, v. **215**, pp. 27-37.
- HUNTER, P. E., 1967. — A rapid method for determining weight percentage of unsieved heavy minerals. *J. Sed. Petrol.*, v. **37**, pp. 521-529.
- KALINSKO, M. K., 1948. — Répartition des minéraux lourds dans les fractions de différents diamètres et influence de ce facteur sur la pression des analyses minéralogiques. *C. R. Acad. Sci. U.R.S.S.*, v. **62**, pp. 681-683.
- KRUMBEIN, W. C., 1960. — Some problems in applying statistics to geology. *Appl. Statistics*, v. **14**, pp. 82-91.
- PETTJOHN, F. J., 1941. — Persistence of heavy minerals and geologic age. *J. Geol.*, v. **49**, p. 610-625.
- RITTENHOUSE, G., 1943. — The transportation and deposition of heavy minerals. *Bull. Geol. Soc. Ann.*, v. **54**, pp. 1725-1780.

- RUBEY, W., 1933. — The size distribution of heavy minerals within a waterlaid sandstone. *J. Sed. Petrol.*, v. 3, pp. 3-29.
- SAHU, B. K., 1964. — Transformation of weight frequency and number frequency. *J. Sed. Petrol.*, v. 34, pp. 768-773.
- SINDOWSKY, K. H., 1949. — Results and problems of heavy mineral analysis in Germany. *J. Sed. Petrol.*, v. 19, pp. 1-25.
- STUART, A., 1927. — Heavy mineral frequencies. *Geol. Mag.*, 2, v. 64, p. 143.
- TANNER, W. F., 1959. — Sample components obtained by the method of differences. *J. Sed. Petrol.*, v. 29, p. 408.
- TOURTELOT, H. A. — Hydraulic equivalence of grains of quartz and heavier minerals and implications for the study of placers. *Bull. U. S. Geol. Survey*, Prof. Pap. 54-F, p. F1-F13.
- VAN ANDEL, Tj. H., 1950. — Provenance, transport and deposition of Rhine sediments, H. Veenman en Zonen, Wageningen.
- VAN ANDEL, Tj. H., 1958. — A defense of the term alterite. *J. Sed. Petrol.*, v. 28, pp. 234-235.
- VAN DER PLAS, L., 1962. — Preliminary note on the granulometric analysis of sedimentary rocks. *Sedimentology*, 1, pp. 145-147.
- ZONNEVELD, J. I. S., 1946. — Beschouwingen naar aanleiding van de Korrelgrotte der zware mineralen in zandige sedimenten. *Geol. Mijnb.*, n° 10, 11, 12, pp. 83-90, 93-104.

