

Evolution des particules d'or en milieu latéritique soudano-sahélien : alluvions et colluvions dans l'environnement d'un gîte filonien, Piéla, Burkina Faso

MARIAM OUANGRAWA¹, GEORGES GRANDIN², JEAN-CLAUDE PARISOT³ ET MIREILLE DELAUNE²

Mots-clés. – Géomorphologie, Or, Alluvions, Colluvions, Climat soudano-sahélien, Burkina-Faso.

Résumé. – Dans la région birimienne de Piéla, l'or est associé à des filons de quartz d'une centaine de mètres de longueur qui se situent dans une large zone de cisaillement. La présence d'or a également été mise en évidence dans les matériaux superficiels. Ceux-ci sont étudiés dans deux plaines d'épandage présentant des contextes géomorphologiques différents. Un site proximal, où l'or est mal trié, présente des particules peu évoluées avec une faible proportion de particules évoluées héritées de formations superficielles anciennes. Un site distal, situé à 2,5 km de la minéralisation primaire, piège des particules d'or grossières, de formes très évoluées malgré la modicité du transport.

Evolution of gold particles in a lateritic Sudano-Sahelian area : alluviums and colluviums of the Piela deposit, Burkina Faso

Keywords. - Geomorphology, Gold, Morphoscopy, Alluvial flat, Sahelian zone, West Africa.

Abstract. – On a barren bedrock, transported auriferous materials of colluvial and alluvial origin present differences in the distribution, composition and morphology of gold particles. Under Sudano-Sahelian conditions, transport processes shape evolved particles in short distances.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

In the auriferous Birimian (Lower Proterozoic) region of Piela, primary gold is associated with quartz veins situated in a large shear zone. The main formations are metalavas (basalt, andesite) and volcano-sediments (tufts, pelites, sericitic schists). Gold occurrences have also been found in removed surficial materials. BUMIGEB (Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina) studied the deposit and gold-washers are working the upper part. The climate is Sudano-Sahelian. As in other regions of West Africa [Boulet, 1970; Michel, 1973; Grandin, 1976; Peltre, 1980; Beaudet and Coque, 1986], the main geomorphological features (fig. 1) are ironcrust plateaux issued from the dissection of ancient flattened surfaces. Twelve pits were dug. After a first study of gold dispersion in the various surficial materials, especially ferruginous crusts [Ouangrawa *et al.*, 1996], five pits were selected in two depositional plains for detailed observation of recent transported erosion products. Zone 1 is a foothill plain located near the primary gold mineralization. Zone 2, situated at about 2,5 km of this mineralization, is an alluvial flat between two elevated remnants of the high land lateritic system and two plateaux of the median land lateritic system. It corresponds to a stable exutory of a small watershed downward the deposit (fig. 1).

The weathering profiles observed in pits can be divided in three layers from base to top: the bedrock, the broken-stone and gravel layer, the sandy clayed layer. Gold particle sizes are ranged into five classes (fig. 4). The bedrock is barren. Zone 1 colluvial material contains a mixture of fine and coarse particles with more particles at the top of the broken stone and gravel layer but also a good number at the top of the sandy clayey layer, giving an interesting surficial enlargement of the deposits geochemical anomaly. Zone 2 alluvial material contains coarser gold particles in the broken stone and gravel layers, corresponding to a more powerful hydrodynamism. The sandy clayey layers are gold particle poor or barren with only fine particles observed and do not allow a geochemical detection of the three metres enriched gravel layer.

SEM observations of 357 gold particles show different populations. In the zone 1 they are little evolved and exhibit relicts of primary surfaces and some pits of dissolution associated to a few scratches and turned over features (fig. 5). They correspond to a direct short transportation from the primary deposit. Some are much more evolved and blunted with numerous cavities of dissolution. These particles result from a translocation taking place after a stay in the crusted ancient soil present at the top of the deposit. In the zone 2, the majority of the particles are very evolved, in chemical and principally mechanical aspects, with a turning up of the rims giving sometimes sandwich shapes. They indicate that a transport distance less than three kilometres is enough to strongly modify gold particle morphologies in the considered climatic conditions, characterized by temporary water running with strong sediment load.

INTRODUCTION. ROCHES ET RELIEF

Les climats à pluviosité concentrée après une longue saison sèche et le paysage aplani des régions sahéliennes permettent aux matériaux en transit issus de l'altération des roches

de s'étaler sur des surfaces importantes. Ces recouvrements perturbent bien souvent la prospection minière et notamment celle des gîtes aurifères. L'étude de la forme et de la composition chimique des particules d'or, extraites des matériaux de surface, a été menée dans divers contextes géo-

¹ Université de Ouagadougou, FAST, département de Géologie, BP 7021 Ouagadougou, Burkina Faso.

² IRD, Centre d'Ile-de-France, 32, avenue Henri-Varagnat, 93143 Bondy cedex, France.

³ IRD, BP 1386, Dakar, Sénégal.

Manuscrit déposé le 25 mai 1999; accepté après révision le 1^{er} février 2000.



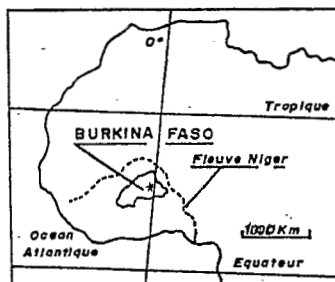
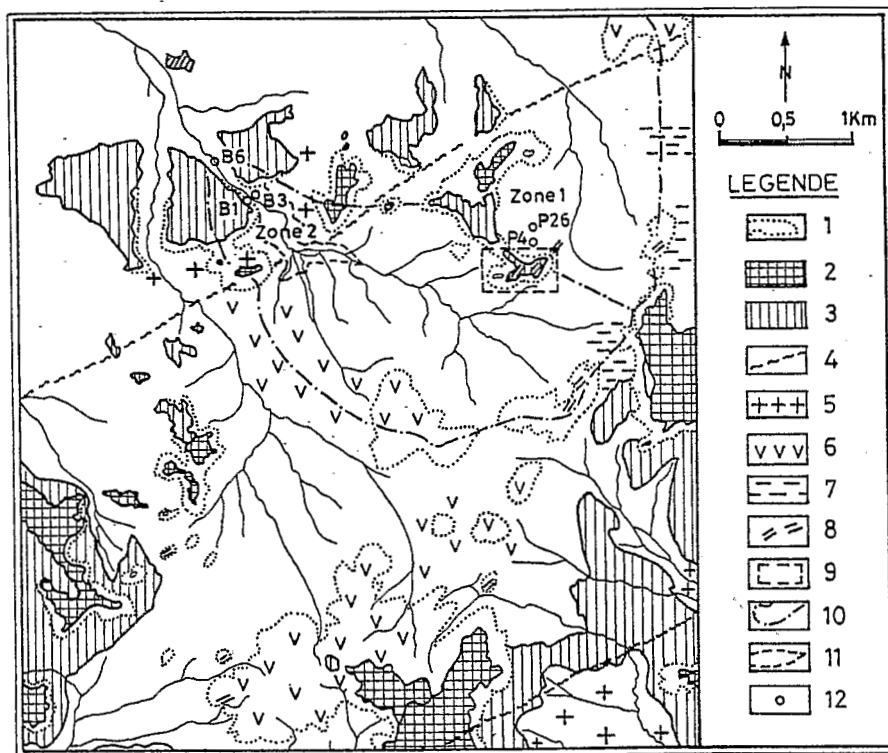


FIG. 1. - Carte géomorphologique du secteur d'étude.

1 : limite entre les reliefs et les plaines (pied-de colline rocheuse ou de plateau cuirassé). 2 : haut glacis cuirassé. 3 : moyen glacis cuirassé. 4 : limites approximatives de la zone de cisaillement. 5 : granite. 6 : roche volcanique basique. 7 : schistes. 8 : filon de quartz. 9 : zone minéralisée principale. 10 : limite de bassin versant. 11 : limite du flat alluvial de la zone 2. 12 : puits étudiés.

FIG. 1. - Geomorphological map.

1 : limit between hills and plains. 2 : high pediment ferricrete. 3 : middle pediment ferricrete. 4 : limits of the shear zone. 5 : granite. 6 : basic volcanites. 7 : schists. 8 : quartz vein. 9 : main auriferous zone. 10 : watershed limit. 11 : limit of the zone 2 alluvial flat. 12 : studied pits.



morphologiques et climatiques, en milieu alluvial [Hallbauer et Utter, 1977; Boyle, 1979; Hérail, 1984, 1996; Hérail *et al.*, 1990] et en milieu latéritique [Wilson, 1981; Freyssinet *et al.*, 1989; Colin, 1992; Edou-Minko *et al.*, 1992; Sanfo *et al.*, 1992; Colin *et al.*, 1993; Freyssinet, 1993; Zang et Fyfe, 1993; Parisot *et al.*, 1995; Porto *et al.*, 1995; Bamba, 1996]. Grâce à l'aptitude des particules d'or à conserver à long terme les traces d'actions physiques ou chimiques, cette étude permet une meilleure compréhension de la genèse des profils d'altération anciens et l'élaboration de critères de prospection. Toutefois la répartition des transformations entre les déplacements de matériaux et l'altération chimique *in situ* reste discutée.

Le site aurifère de Piéla est situé à l'est du Burkina Faso dans un sillon volcano-sédimentaire birimien (Protérozoïque inférieur). Il a été prospecté par le BUMIGEB (Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina) de 1987 à 1992 [Wédraogo et Napon, 1988; Baras, 1992]. Les principales roches sont des métalaves (basaltes et andésites) et des formations volcano-sédimentaires (tufs, pélites, schistes sériciteux). Les minéralisations aurifères sont associées à des filons de quartz déformés mis en place sous forme de remplissages de fentes de tension dans une large zone de cisaillement de direction NNE-SSW [Bourges *et al.*, 1994]. L'or primaire y est accompagné de pyrite, d'arsénopyrite, de chalcopryrite, de tourmaline et d'épidote. L'orpaillage qui s'est développé sur le site représente la principale activité

des villages environnants pendant la saison sèche. Il s'effectue principalement sur les filons de quartz et les matériaux superficiels proximaux issus de leur démantèlement et de celui des surfaces cuirassées proches. Le climat est de type soudano-sahélien. La pluviosité annuelle moyenne est de 700 mm pour la période 1960-1980, avec des années déficitaires à 500 mm.

Le paysage de Piéla, où se retrouve la séquence étagée de cuirasses ferrugineuses décrite en Afrique de l'Ouest [Boulet, 1970; Michel, 1973; Grandin, 1976; Peltre, 1980; Beaudet et Coque, 1986], comporte un haut pays et un bas pays (fig. 1). Le haut pays, dépassant 340 m d'altitude, est formé de collines de roches basiques et de plateaux cuirassés. La colline la plus élevée atteint 398 m et montre, sur un des versants, des blocs de cuirasse ferrugineuse intermédiaire d'âge oligocène à miocène. Les plateaux cuirassés proviennent de la dissection du système des hauts glacis, d'âge pliocène à quaternaire ancien [Michel, 1973]. Leur altitude est voisine de 350 m. La dénivellation de leurs versants varie de 10 à 25 m. Le bas pays comprend des collines provenant du décapage du haut glacis ainsi qu'un système de moyens glacis cuirassés, en position de piémont par rapport aux hauts glacis ou se rejoignant en sommet d'interfluve. Des bas glacis récents, localement cuirassés ou carapacés, se poursuivent vers l'aval, souvent sans discontinuité, par la plaine alluviale. Ils forment avec celle-ci une surface fonctionnelle. Les incisions actuelles des lits mi-

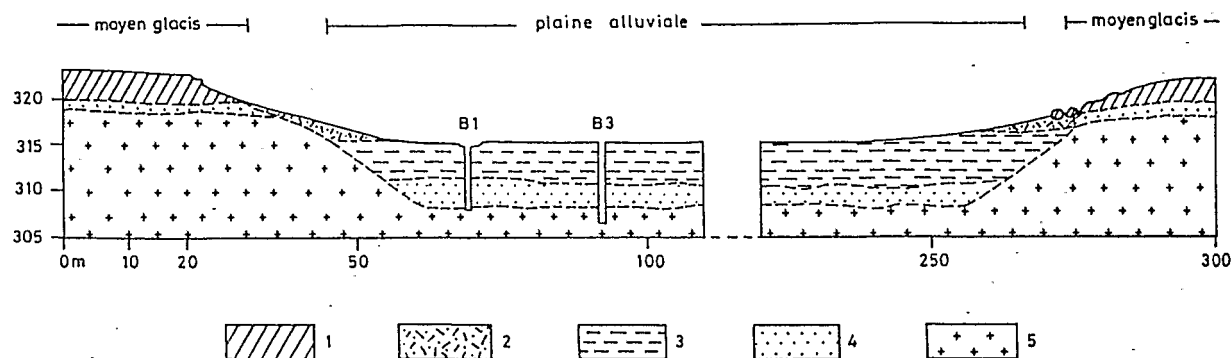


FIG. 2. - Coupe transversale de l'exutoire de la zone 2.

1 : cuirasse ferrugineuse. 2 : colluvions de versant. 3 : recouvrement alluvial argilo-sableux. 4 : cailloutis et graviers meubles. 5 : granite altéré en place.

FIG. 2. - Transversal cross section of zone 2 exutoire.

1 : ferruginous crust. 2 : hillside colluviums. 3 : sandy-clayey alluvial layer. 4 : pebbles and gravels layer. 5 : granite saprolite.

neurs mettent parfois en évidence des remblais alluviaux à graviers sous berge assez épais, masquant des entailles du bas ou du moyen glacis.

LES PROFILS DE MATÉRIAUX D'ÉPANDAGE NON INDURÉS

Après une étude portant sur les divers matériaux de surface, notamment sur des profils à cuirasse ferrugineuse de haut et de moyen glacis [Ouangrawa *et al.* 1996], les matériaux d'épandage de deux plaines actuelles, de situations géomorphologiques différentes, ont été observés en détail par l'intermédiaire de cinq puits foncés jusqu'à la roche altérée en place à structure conservée. La zone 1 (fig. 1), avec les puits P 4 et P 26, se situe en aval immédiat de la minéralisation filonienne principale et fait partie d'une plaine sans exutoire bien marqué, entourée de collines de roches basiques et de témoins du haut glacis. La zone 2 (fig. 1 et 2), avec les puits B1, B 3 et B 6, se situe à 2,5 km à l'ouest et en aval de la minéralisation filonienne principale et correspond à l'exutoire d'une plaine parcourue par un réseau hydrographique plus organisé. Cet exutoire est stable depuis longtemps car il est localisé entre deux buttes de haut glacis puis deux plateaux de moyen glacis.

De la base au sommet des puits sont observés : l'altérite, les horizons à cailloutis et graviers et les recouvrements argilo-limoneux ou sablo-argileux de surface.

L'altérite

Dans la zone 1, la base des puits met à jour une altérite conservant des plans de schistosité, de couleur verdâtre, argileuse, avec de nombreuses épidotes résiduelles, provenant des schistes de la série volcano-sédimentaire birimienne. Elle est surmontée par un horizon ne dépassant pas 10 cm d'épaisseur dans lequel l'altérite est remaniée avec quelques gravillons ferrugineux et des plaquettes de schistes légèrement ferruginisés. Des concrétions manganésifères noirâtres y sont observées. Dans la zone 2, l'altérite est blanche à blanc grisâtre, tachetée d'orange, friable, avec de nombreux grains de quartz anguleux dans une matrice kaolinitique abondante. Elle comporte des minéraux résiduels comme la muscovite, la hornblende, le grenat et l'ilménite. Elle résulte de l'altération d'un métagranite.

Les horizons à cailloutis et graviers

Dans la zone 1, l'épaisseur totale des cailloutis et graviers atteint 0,75 m. Ils sont constitués de cailloux de quartz anguleux à subanguleux (quelques mm à 15 cm de dimension principale), de cailloux de cuirasse ancienne et de nodules ferrugineux de la même taille que les quartz, de rares morceaux de roche verte altérée et de concrétions manganésifères noires. Tous ces éléments grossiers sont emballés dans une matrice argilo-limoneuse et sableuse à kaolinite et smectite avec un peu de goéthite. Un horizon inférieur au contact de l'altérite se distingue d'un horizon supérieur plus grossier et plus épais.

Dans la zone 2, l'épaisseur des cailloutis et graviers varie d'un puits à l'autre de 2,5 à 3,5 m. Des horizons se distinguent selon la taille des éléments grossiers et la proportion de matrice fine. Certains d'entre eux présentent localement une alternance de strates bien lavées à éléments grossiers jusqu'à 4 cm de diamètre et de strates assez mal lavées à éléments plus fins dans une matrice argilo-limoneuse. Les éléments grossiers sont de même nature pétrographique que dans la zone 1 mais avec un éboulé des quartz plus marqué, qui reste toutefois variable. Les éléments supérieurs à 10 cm sont en très faible proportion. Par contre les fractions comprises entre 2 cm et 2 mm sont importantes et peuvent atteindre 60 % du poids de l'échantillon.

Les horizons supérieurs de matériaux fins

Dans la zone 1, l'épaisseur des recouvrements de surface, de 40 cm dans le puits P4, atteint 1 m dans le puits P26, situé plus en aval. Il s'agit d'un horizon argilo-limoneux et sableux à chevelu racinaire assez dense. On y observe des pisolites ferrugineux et des débris de quartz de taille inférieure à 1 cm, ainsi que des concrétions manganésifères noires. Dans la zone 2, d'amont en aval de la séquence, l'épaisseur de ces recouvrements varie de 3 à 5 m. On y retrouve les mêmes éléments que dans les puits de la zone 1 mais également des récurrences de matériaux grossiers sous forme de poches lenticulaires et de petits lits.

Une étude plus fine de la granulométrie des fractions inférieures à 2 mm a été réalisée, à l'aide d'un sédiograph, sur le puits P26 de la zone 1 et sur le puits P3 de la zone 2 (fig. 3). Les recouvrements argilo-limoneux de surface ont des courbes granulométriques cumulatives de forme comparable, la plus forte médiane, 10,5 μ m, étant celle du puits P26, ce qui indique la nature plus argileuse du recou-

vement dans la zone 2 où la médiane descend jusqu'à 1,6 μm . Ces recouvrements correspondent dans les deux zones à un hydrodynamisme faible de type ruissellement diffus, avec toutefois de brefs épisodes d'apports grossiers en zone 2.

Pour la fraction inférieure à 2 mm des horizons à cailloutis et graviers, la forme des courbes granulométriques cumulatives est très différente. Dans le puits P3, les courbes ont une concavité prononcée manifestant un bon tri granulométrique. La fraction inférieure à 2 mm comporte peu de matériaux argilo-limoneux, à l'opposé de celle du recouvrement. La médiane est comprise entre 100 et 225 μm . Ces horizons correspondent à un hydrodynamisme de type torrentiel, en accord avec un caractère alluvial. Dans le puits P26, cette fraction est moins distincte de celle du recouvrement. Le cailloutis est mal trié, riche en argiles et de caractère colluvial, ce qui correspond à la position proximale du puits.

Le socle schisteux de P26 présente une granulométrie proche de celle du recouvrement argilo-limoneux avec une prépondérance des fractions fines inférieures à 100 μm . Le socle granitique de P3 montre une distribution granulométrique bimodale qui met en évidence la fraction d'argile d'altération et le squelette quartzux.

LES PARTICULES D'OR

Distribution

Après débouillage de 30 à 90 kg d'échantillon brut, la fraction inférieure à 1 mm et dans quelques cas celle comprise entre 2 et 1 mm ont été lavées à la batée. Des batées ont également été effectuées, après un concassage modéré, sur les cailloux de quartz et sur les cailloux de cuirasse. Dans les concentrés ainsi obtenus, les particules d'or ont été triées, comptées, les tailles mesurées. Cinq classes ont été distinguées selon les dimensions principales : classe > 1 000 μm et classe 1 000-500 μm (grains), classe 500-160 μm (points), classe 160-50 μm (minipoints), classe < 50 μm (poussières).

Dans les deux zones, le nombre de particules pour 100 kg d'échantillon (fig. 4) montre que le bedrock est stérile et que les horizons à cailloutis et graviers sont plus riches en particules d'or que le recouvrement de surface. On note cependant des différences entre les deux zones :

- un nombre plus important de grains dans le cailloutis de la zone 2, seul à présenter des particules supérieures à 1 mm. Dans cette zone le nombre de particules tend à décroître de bas en haut du cailloutis, tandis qu'il croît de bas en haut du cailloutis de la zone 1 ;

- un nombre moins important de particules d'or à la surface du recouvrement argilo-limoneux de la zone 2. De même, dans cette zone, le nombre de particules d'or décroît de bas en haut du recouvrement tandis qu'il croît dans le recouvrement de la zone 1 ;

- l'observation de particules d'or, le plus souvent des poussières, dans les concentrés de batée provenant des débris de cuirasse et de quartz du cailloutis de la zone 1 et l'absence de telles particules en zone 2.

Morphoscopie

357 particules ont été étudiées sous le microscope électronique à balayage. Les caractéristiques morphologiques distinguent nettement les deux zones. Dans la zone 1, on reconnaît quatre familles :

- des particules libres qui ne présentent pas d'éroussé ou un éroussé faible, rarement quelques stries, de petites

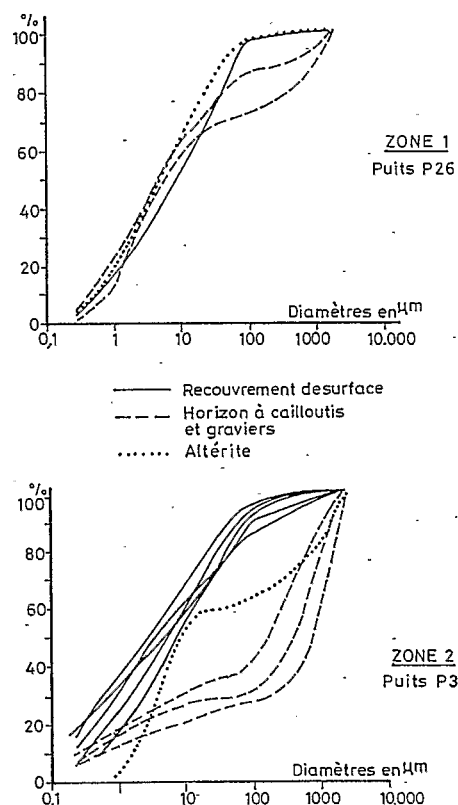


FIG. 3. - Répartition granulométrique de la fraction < 2 mm des différents horizons.

FIG. 3. - Granulometric distribution of the fraction < 2 mm of the various layers.

cavités de dissolution en nombre limité, des reliques de surface primaire (fig. 5A). Ce sont des particules peu évoluées, tant mécaniquement que chimiquement ;

- des particules libres évoluées avec un éroussé moyen à fort (fig. 5B), des aspects de rebroussement sur les bordures, un nombre plus important de cavités de dissolution et parfois des traces d'aplatissement et des stries. Ces particules sont en proportion réduite (20 % des particules). La part est difficile à faire (et semble variable selon les particules) entre l'évolution chimique et l'évolution mécanique ;

- les particules d'or extraites après concassage des cailloux de quartz, qui présentent des arêtes légèrement éroussées à l'intersection de faces primaires avec peu ou pas de cavités de dissolution ;

- les particules d'or extraites après concassage des cailloux de cuirasse. Comme les particules libres évoluées, elles présentent un éroussé variable, souvent fort (fig. 5C). En revanche les marques de transport et les cavités de dissolution sont généralement absentes à la surface des grains. L'évolution chimique sans cavités de ces petites particules (la plupart inférieures à 50 μm) correspondrait, selon Freysinet [1993], à une dissolution en milieu saturé.

Dans la zone 2, on reconnaît une seule famille de particules, avec les mêmes caractéristiques dans les différents horizons. Les particules ont des formes ovoïdes, allongées ou aplaties avec des contours très arrondis (fig. 5D). Toutes présentent des marques de transport important, avec des retournements de bordures qui peuvent aller jusqu'à des formes en sandwich (fig. 5E), des stries (fig. 5F), des marques d'aplatissement. Les reliques de surface primaire

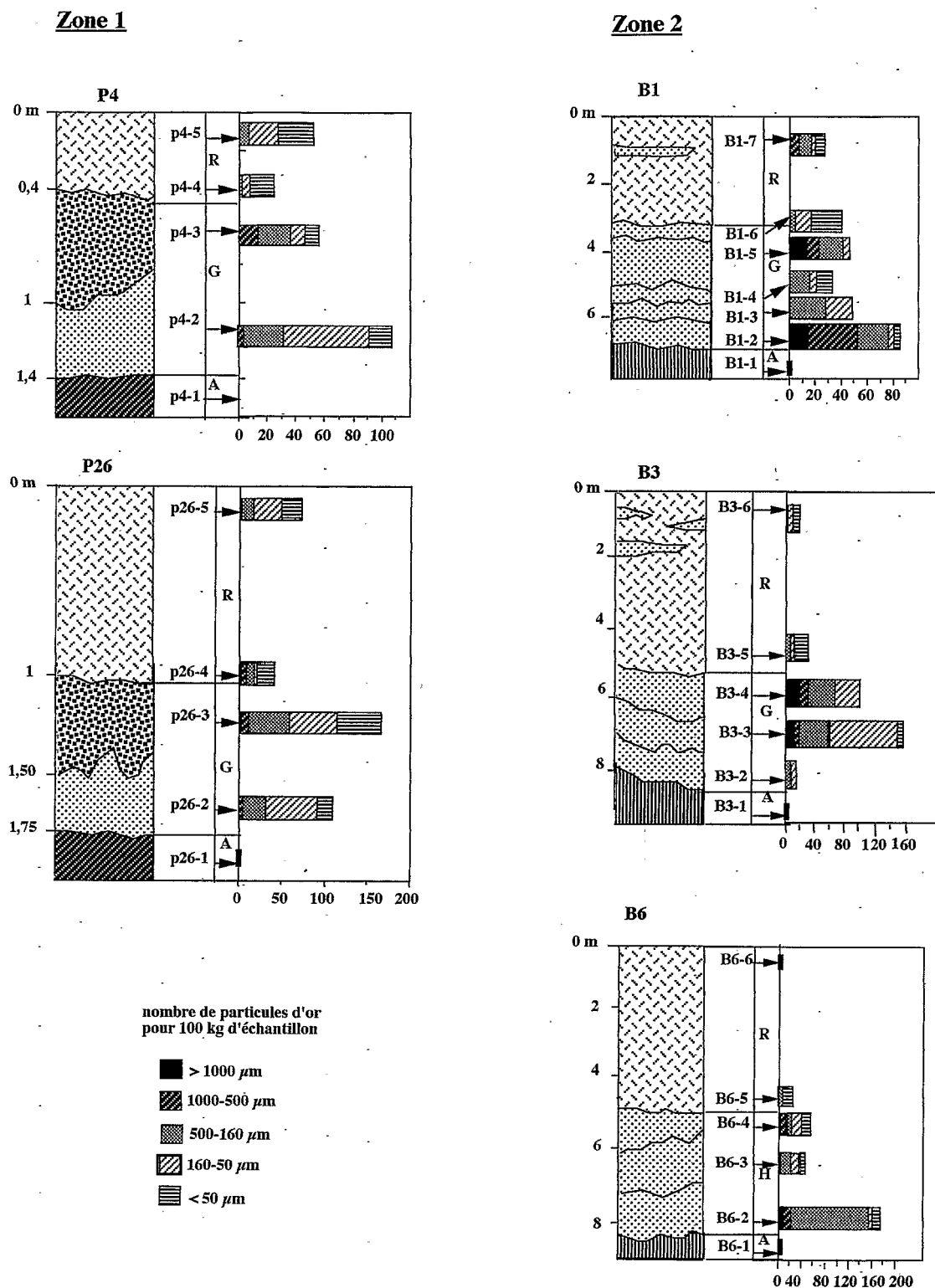


FIG. 4. - Répartition des particules d'or dans les puits P4, P26, B1, B3, B6 (voir fig. 1 et 2).

A : altérite (// de schiste; || de granite). G : horizon à cailloutis et graviers (♦♦ passées grossières). R : recouvrement argilo-sableux.

FIG. 4. - Distribution of the gold particles in the pits P4, P26, B1, B3, B6 (see fig. 1 and 2).

A : saprolite (// of schist; || of granite). G : pebble and gravel layer (♦♦ coarse material). R : sandy-clayey cover.

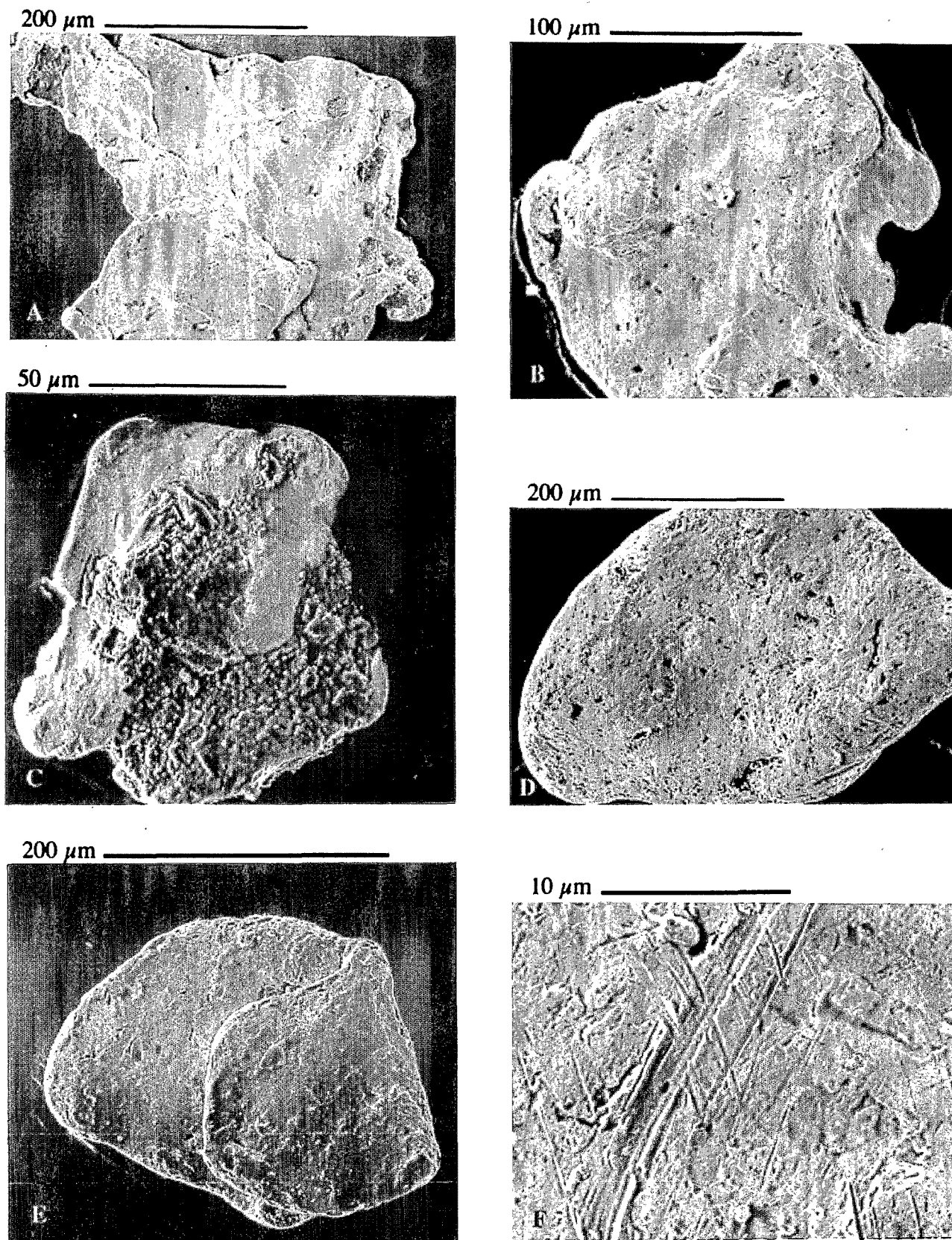


FIG. 5. - Morphoscopie des particules d'or (MEB).

A : zone 1, particule peu évoluée à surface primaire largement conservée; reste de gangue de quartz en haut à gauche. B : zone 1, particule évoluée, à contours lobés avec replis et marques d'aplatissement; cavités de dissolution. C : zone 1, particule extraite de cailloux de cuirasse concassés; enduit d'oxyde de fer ou surface lisse sans cavités de dissolution; forme émoussée. D : zone 2, particule très évoluée, à contours arrondis, aplatie et repliée. F : détail de E montrant des stries.

Planche photographique préparée sur ordinateur par T. Pilorge au centre IRD de Bondy.

FIG. 5. - Gold particle morphoscopy (SEM).

A : zone 1, little evolved particles with primary surface largely preserved; quartz residues (upper left). B : zone 1, evolved particle; rounded rims with turn over features and flattening marks; dissolution cavities. C : zone 1, particle from crushed ferricrete stones; ironoxyde coating or smooth surface without dissolution cavities; blunt shape. D : zone 2, very evolved particle, flat, with rounded edges; numerous dissolution cavities. E : zone 2, very evolved particle, flattened and folded, with rounded edges. F : striated enlargement of E.

sont rares. Les cavités de dissolution sont nombreuses et peuvent atteindre 50 µm de diamètre. Elles sont remplies ou tapissées par des argiles, des oxyhydroxydes de fer, des carbonates. Il s'agit donc de particules très évoluées, chimiquement et surtout mécaniquement.

Une intense évolution mécanique est également observée dans d'autres sites aurifères du Burkina, pour des distances courtes de transport des particules. C'est le cas à Essakane, situé en milieu sahélien. L'orpaillage a concerné une colline allongée comportant une minéralisation primaire en stockwerk et les horizons gravillonnaires de ses piémonts est et ouest. Quelques orpailleurs ont extrait des graviers alluviaux dans le lit d'un marigot issu de la colline minéralisée, 1,5 km à l'ouest du pied de celle-ci. Deux d'entre eux avaient récolté en une journée 0,96 g d'or dans ces graviers. Observé à la loupe binoculaire, cet or présente des formes mécaniquement très évoluées (aplatissement, formes arrondies, bords repliés...) pour presque tous les grains et pour une large majorité des particules de 100 à 300 microns.

Composition chimique

La composition chimique des particules d'or est analysée à la microsonde électronique. Les teneurs en Au et Ag sont mesurées au cœur des particules et en bordure. Le tableau I donne, pour chaque famille de particules ainsi que pour la minéralisation primaire, les teneurs moyennes au cœur des particules. Les teneurs en Ag diffèrent nettement selon les populations de particules. Dans la minéralisation primaire les teneurs en Ag oscillent entre 7 et 13 % avec une moyenne de 10 %. Dans la zone 1, les teneurs en Ag sont en relation avec les caractères morphologiques. Ce sont les particules très émoussées qui sont les moins riches en Ag. Dans la zone 2, la teneur moyenne en Ag est encore plus faible, traduisant la plus forte évolution des particules d'or. Pour apprécier la distribution de l'argent dans les particules, l'indice de déplétion (Id) a été calculé :

$$\text{Id} = (\text{Ag bord} / \text{Ag centre}) \times (\text{Au centre} / \text{Au bord})$$

La déplétion de l'argent vers les bordures est d'autant plus forte que la valeur de Id est faible. Id = 1 caractérise une distribution homogène de l'argent dans la particule.

Les valeurs moyennes calculées sont représentées sur le tableau I. Pour l'or filonien, Id est très voisin de l'unité. Il diminue légèrement pour les particules peu évoluées de la zone 1. Il est très faible pour les particules fortement émoussées de la zone 1 (valeur moyenne de 0,42). Les particules encore plus évoluées de la zone 2 présentent un Id plus élevé (0,77). On ne peut expliquer cette différence par une évolution principalement mécanique car l'argent a été fortement lessivé jusqu'au cœur des particules d'or où sa teneur moyenne est réduite à 3,4 %. Comme l'or filonien, les particules extraites des cailloux de cuirasse montrent une répartition assez homogène de l'argent. Mais la teneur moyenne au cœur est de 6,95 % et manifeste là aussi un lessivage de ce métal.

DISTRIBUTION DES TENEURS D'OR (fig. 6)

Les teneurs d'or des échantillons ont été estimées d'après une correspondance taille-poids des particules supérieures à 50 µm récoltées à la batée. Des analyses par absorption atomique ont été effectuées sur des prélèvements de la fraction inférieure à 50 µm de la plupart des échantillons afin d'estimer l'importance de l'or très fin ou inclus dans le réseau d'autres minéraux. Les résultats montrent que cet or distingue bien les altérites de granite de la zone 2, avec des valeurs très faibles de 2 à 3 ppb, des altérites de roches

TABLE I. - Composition chimique moyenne de particules d'or.

Au, Ag : teneur au cœur des particules. Id : indice de déplétion. 1 : or filonien. 2 : particules peu évoluées de la zone 1. 3 : particules extraites des cailloux de cuirasse de la zone 1. 4 : particules fortement émoussées avec marques de transport de la zone 1. 5 : particules fortement émoussées avec marques de transport importantes de la zone 2. n = nombre de particules.

TABLE I. - Mean chemical composition of gold particles.

Au, Ag : particle core content. Id : depletion index. 1 : primary gold of quartz vein. 2 : little evolved particles of the zone 1. 3 : particles from ferricrete stones of the zone 1. 4 : rounded particles of zone 1 with transport marks. 5 : very rounded particles with strong transport marks. n = number of particles.

	1 n=16	2 n=8	3 n=5	4 n=8	5 n=11
Au	88.07	92.47	91.07	93.13	94.17
Ag	10.61	7.41	6.95	5.85	3.41
Total	98.68	99.88	98.02	98.98	97.58
Id	0.94	0.84	0.95	0.42	0.77

volcano-sédimentaires de la zone 1 où les teneurs atteignent 10 à 30 ppb.

Dans la zone 1, proche de la minéralisation principale, les teneurs d'or de la fraction fine approchent 100 ppb alors que dans la zone 2 elles sont très faibles, ce qui provient de la perte d'or fin transporté à plus longue distance et de la dilution des matériaux aurifères par des matériaux stériles. En revanche les cailloutis et graviers de la zone 2 accumulent de l'or grossier avec des teneurs jusqu'à 900 ppb (voisines d'un gramme par tonne).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans les deux zones d'épandage étudiées, l'or est présent dans tous les sédiments. Cependant d'importantes variations dans la répartition et la morphologie des particules sont observables à plusieurs échelles.

A l'échelle des profils, la répartition des particules d'or selon une coupe verticale varie avec les caractéristiques sédimentologiques. Les particules sont moins nombreuses dans les recouvrements argilo-limoneux de surface qui correspondent à un hydrodynamisme de plus faible énergie que les cailloutis et graviers. Elles sont cependant bien représentées dans la partie supérieure du recouvrement de la zone 1 et leur nombre décroît d'amont en aval de l'exutoire dans le recouvrement de la zone 2, ce qui manifeste une alimentation actuelle des plaines par des matériaux superficiels en transit. Dans quelques cas un horizon du cailloutis peut contenir moins de particules que le recouvrement. C'est le cas dans le puits P3 où l'horizon de base du cailloutis présente peu de particules d'or, mais il comporte des débris altérés du bedrock granitique stérile qui provoquent une dilution.

A l'échelle du site minéralisé, les variations de la distribution des particules d'or sont imputables à la situation géomorphologique. La zone 2 qui est un exutoire géographiquement stable depuis les premières incisions du haut glacis, constitue un sorte d'entonnoir favorable à l'accumulation des sédiments et de l'or. Elle a accumulé du matériel à caractère alluvial marqué dépassant 6 m d'épaisseur. Dans les cailloutis, correspondant à un hydrodynamisme puissant, les particules fines d'or sont éliminées, mais l'enrichissement en particules grossières accroît les teneurs. La zone 1, située en dehors d'un axe de drainage à faible distance du sommet de la colline minéralisée (P4 est à 150 m, P26 à 250 m), a accumulé une épaisseur limitée de sédiments de type colluvial. Par rapport à la zone 2, le tri des particules d'or est moins poussé et la proportion de particules fines (< 160 µm) plus importante dans le cailloutis.

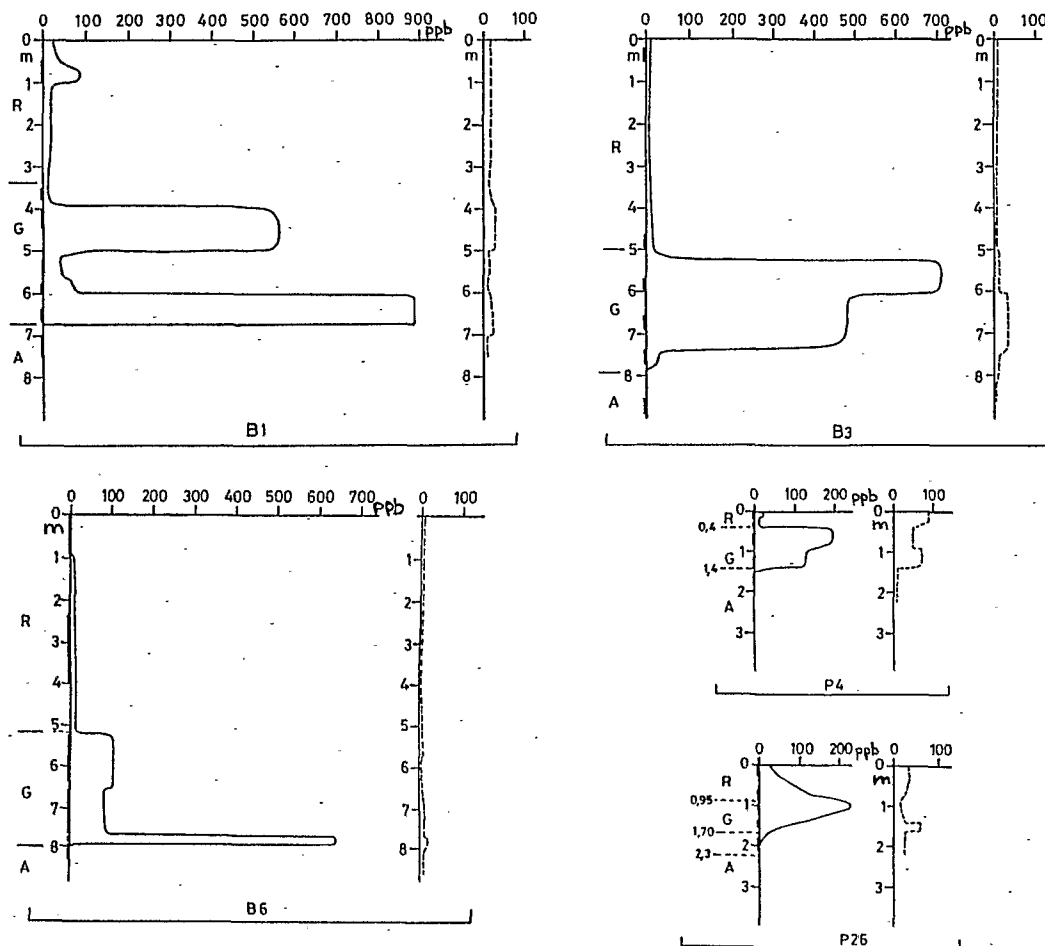


FIG. 6. - Variations de la teneur d'or (ppm) selon la profondeur (m).

Trait renforcé en ordonnée : emplacement des échantillons. Trait plein : teneur due aux particules supérieures à 50 µm, estimée selon une correspondance taille-poids. Tiret : teneur chimique de la fraction inférieure à 50 µm de l'échantillon. A : altérite. G : horizon à cailloutis et graviers. R : recouvrement argilo-sableux.

FIG. 6. - Gold content variations (ppm) with depth (m).

Bold line in ordinate : samples position. Continuous line : gold content due to the particles over 50 µm, estimated according to a size-weight relation. Dotted line : chemical content of the sample fraction below 50 µm. A : saprolite. G : pebble and gravel layer. R : sandy-clayey cover.

La dynamique géomorphologique a aussi des conséquences sur l'évolution morphoscopique des particules d'or. La variabilité dans l'état d'usure de ces particules traduit une complexité des transits. Deux situations se présentent :

— dans la zone 1, le mélange de particules évoluées et de particules peu évoluées demande une interprétation. Cette zone étant située juste à l'aval de la zone minéralisée principale, les distances parcourues par les particules d'or n'expliquent pas une forte évolution dont nous avons d'ailleurs vu qu'elle était en partie chimique. Les particules peu évoluées peuvent être considérées comme issues directement de l'érosion récente des minéralisations primaires. Pour les particules évoluées il faut envisager une plus longue histoire comportant un séjour dans la cuirasse ferrugineuse formée antérieurement sur le gisement primaire et dont il subsiste des blocs résiduels sur la colline minéralisée. Ce séjour serait précédé, pour une partie d'entre elles, par un transport depuis d'autres sites minéralisés de la région de Piéla. Ce dernier point semble confirmé par la présence de quelques zircons et staurotides très usés et corrodés parmi les minéraux lourds euhédraux du matériel colluvial de la zone 1 ;

— dans la zone 2, la plupart des particules sont très évoluées, avec des marques de transport importantes. La colline

minéralisée est à une distance de 2,5 km (d'autres filons peu minéralisés sont à 3,5 km). Les quelques particules qui présentent encore des reliques de surfaces primaires peuvent avoir été en partie transportées dans la gangue avant d'être libérées dans le sédiment. L'évolution chimique est également marquée, avec une forte déplétion de l'argent jusqu'au cœur des particules, si bien que la distinction ne peut plus être faite entre des particules parties fraîches de la colline minéralisée ou parties après une première phase d'évolution dans les sols cuirassés du sommet. Cela suppose un certain temps de résidence dans les sédiments en transit vers la zone 2 puis dans les graviers inactuels de cette zone. S'agissant de matériaux postérieurs à une forte incision du moyen glaciaire, ce temps est toutefois inférieur à 200 000 ans, âge présumé de la fin du cuirassement de ce glaciaire [Michel, 1973]. Il faut donc envisager une forte intensité de l'évolution chimique de l'or dans les matériaux alluviaux des vallées.

La présence d'or en surface des recouvrements fins des colluvions permet un élargissement de l'anomalie géochimique signalant la minéralisation primaire. A l'opposé les graviers alluviaux aurifères, qui peuvent représenter un objectif d'orpaillage, sont susceptibles d'être enterrés sous plusieurs mètres de matériaux fins pauvres en or. Leur dé-

tection ressort en priorité de l'étude des particularités du réseau hydrographique (ici la localisation par rapport aux systèmes de glacis cuirassés, de l'exutoire d'un bassin versant dont l'amont correspond à la zone minéralisée). De façon générale, il faut souligner, avec Zeegers [1990], Sanfo *et al.* [1992], Parisot *et al.* [1995] qu'une bonne connaissance de l'environnement géomorphologique est nécessaire pour une meilleure adaptation des techniques de prospection de l'or dans les environnements latéritiques.

Enfin le site de Piéla fournit une indication importante sur la distance nécessaire à l'acquisition de marques généralisées de transport. En milieu soudano-sahélien, à l'amont du système de drainage, les lits mineurs sont instables et s'inscrivent dans les matériaux fins des flats alluviaux. Seuls les écoulements les plus puissants, à l'occasion d'averses violentes, remanient les cailloutis et graviers. Les particules d'or qu'ils contiennent sont déplacées et triées lors de courtes étapes, séparées par des périodes de résidence fixe. Par rapport au parcours dans une rivière per-

manente à bon débit, les reprises sont nombreuses sur une faible distance, accumulant les traces d'usure, et la durée totale du transit est longue.

On peut imaginer, comme pour la zone 1, qu'une très faible partie de l'or de la zone 2 ait acquis son caractère évolué au cours d'une histoire antérieure mettant en jeu des apports plus lointains et des altérations intenses. Il n'en reste pas moins, dans le milieu climatique concerné caractérisé par des écoulements temporaires brefs à charge solide élevée, qu'une distance de l'ordre de 3 km suffit à faire acquérir aux particules d'or des formes très évoluées avec de multiples marques mécaniques de transport.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la collaboration scientifique entre l'Université de Ouagadougou, Burkina Faso et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-ORSTOM), France.

Références

- BAMBA O. (1996). – L'or disséminé dans les albitites birimiennes de Larafella (Burkina Faso). Evolution dans les altérites et les cuirasses ferrugineuses. – Thèse de doctorat, Univ. Aix-Marseille, 260 p.
- BARAS E. (1992). – Rapport de fin de campagne 1991-1992, mission Piéla, Province de la Gnagna. – Rapport Bumigeb, 91 p. – Centre de documentation du Bumigeb, Ouagadougou, Burkina Faso.
- BEAUDET G. & COQUE R. (1986). – Les modelés cuirassés des savanes du Burkina Faso (Afrique de l'Ouest). – *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, **27**, 3-4, 213-224.
- BOULET R. (1968). – Etude pédologique de la Haute Volta, région centre nord. – Centre IRD de Dakar, Sénégal. *Rapport Orstom*, 351 p.
- BOULET R. (1970). – La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale. – *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, **VIII**, 3, 245-271.
- BOURGES F., DEBAT P., GRANDIN G., PARISOT J.C., TOLLON F., BARAS E. & OUEDRAOGO M.F. (1994). – Relations entre cristallisations de quartz et concentrations aurifères (exemple des filons aurifères du Birimien du Burkina Faso, Afrique de l'Ouest). – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, **319**, 2, 543-550.
- BOYLE R.W. (1979). – The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element). – *Geol. Surv. Can. Bull.*, **280**, 584 p.
- COLIN F. (1992). – L'or traceur de l'histoire chimique de l'altérosphère latéritique sous forêt équatoriale. – Université Aix-Marseille III, France, Habilitation à diriger les recherches, 171 p.
- COLIN F., VIEILLARD Ph. & AMBROSI J.P. (1993). – Behavior of gold in lateritic equatorial environment: Mass balance transfert and thermodynamic study. – *Earth Planet. Sci. Lett.*, **114**, 269-285.
- EDOU-MINKO A., COLIN F., LECOMTE P. & TRESCASES J.J. (1992). – Altération latéritique du gîte aurifère d'Ovala (Gabon) et formation d'une anomalie superficielle de dispersion. – *Miner. Dep.*, **25**, 90-100.
- FREYSSINET P. (1993). – Gold dispersion related to ferricrete pedogenesis in South Mali: application to geochemical exploration. – *Chron. Rech. Min.*, **510**, 25-40.
- FREYSSINET Ph., ZEEGERS H. & TARDY Y. (1989). – Morphology and geochemistry of gold grains in lateritic profiles of southern Mali. – *J. Geochem. Expl.*, **32**, 17-31.
- GRANDIN G. (1976). – Aplatissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. – *Mém. ORSTOM*, **82**, 275 p.
- HALLBAUER D.K. & UTTER T. (1977). – Geochemical and morphological characteristics of gold particles from recent rivers and fossil placer of Witwatersrand. – *Miner. Dep.*, **12**, 293-306.
- HÉRAIL G. (1984). – Géomorphologie et gîtologie de l'or détritique. Piémonts et bassins intramontagneux du Nord-Ouest de l'Espagne. – Editions du CNRS, Paris, 456 p.
- HÉRAIL G., FORNARI M., VISCARA G. & MIRANDA V. (1990). – Morphological and chemical evolution of gold grains during the formation of polygenic fluvialite placer: the Mio-Pleistocene Tipuani placer example (Andes, Bolivia). – *Chron. Rech. Min.*, **500**, 41-49.
- HÉRAIL G. (1996). – Morphology and composition of gold grains: a tool for exploration (example from Central Andes), 352-357. In: *Segundo Symposium Internacional del Oro/ Second International Gold Symposium*, 396 p., Lima 1996.
- MICHEL P. (1973). – Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. – *Mémoires ORSTOM*, **63**, 3 vol., 752 p.
- OUANGRAWA M., GRANDIN G., PARISOT J.C. & BARAS E. (1996). – Dispersion mécanique de l'or dans les matériaux de surface: exemple du site aurifère de Piéla, Burkina Faso. – *Pangéa*, **25**, 25-40.
- PARISOT J.C., VENTOSE V., GRANDIN G., BOURGES F., DEBAT P., TOLLON F. & MILLO L. (1995). – Dynamique de l'or et d'autres minéraux lourds dans un profil d'altération cuirassé du Burkina Faso, Afrique de l'Ouest. Conséquence sur l'origine des matériaux constituant les cuirasses de haut glacis. – *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **321**, II a, 295-302.
- PELTRE P. (1980). – Le « V » Baoulé (Côte d'Ivoire centrale). Héritage géomorphologique et paléoclimatique dans le tracé du contact forêt-savane. – *Trav. doc. ORSTOM*, **80**, 198 p.
- PORTO G.C. & HALE M. (1995). – Gold redistribution in the stone line lateritic profile of Posse deposit, Central Brazil. – *Econ. Geol.*, **90**, 308-321.
- SANFO Z., GRANDIN G., PARISOT J.C. & PALÉ F. (1992). – Aplatissements latéritisés anciens, glacis récents et indices d'or dans la région d'Aribinda (Burkina Faso). In: *Mineralogical and geochemical records of paleoweathering. – ENSMP, Mém. Sci. Terre*, **18**, 15-30.
- WÉDRAOGO L. & NAPON S. (1988). – Rapport de fin de campagne 1987-1988. Mission Piéla, province de la Gnagna. – Centre de documentation du Bumigeb, Ouagadougou, Burkina. Rapport Bumigeb 42 p.
- WILSON A. (1981). – The economic significance of non-hydrothermal transport of gold, and of the accretion of large gold nuggets in laterite and other weathering profiles in Australia. – *Intern. Conf. of Applied Mineralogy*, Johannesburg, 1981, p. 1-15.
- ZANG W. & FYFE W.S. (1993). – A three stage genetic model for the Igarape Bahia lateritic gold deposit, Carajas, Brazil. – *Econ. Geol.*, **88**, 1768-1779.
- ZEEGERS H. (1990). – L'exploitation minière en milieux latéritiques. Rapport, 42 p. Atelier sur les minéralisations d'or et les amas sulfurés du Birimien. – IUGS-UNESCO, Ouagadougou, Burkina Faso.

