

Dynamique de l'or et d'autres minéraux lourds dans un profil d'altération cuirassé du Burkina Faso, Afrique de l'Ouest.

Intérêt pour l'interprétation de la mise en place des matériaux constituant les cuirasses de haut glacis

Jean-Claude Parisot, Valéry Ventose, Georges Grandin, François Bourges, Pierre Debat, Francis Tollon et Laurent Millo

C.R. Acad. Sci. Paris, t. 321, série II a, p. 295 à 302, 1995

Résumé Le profil d'altération cuirassé de haut glacis, développé dans l'environnement du site aurifère de Gangaol, a subi des phases d'altération suffisamment intenses pour que des minéraux résistants, comme le zircon et l'or, présentent des traces de dissolution importantes. Dans l'horizon supérieur de la cuirasse, ces minéraux altérés coexistent avec des particules d'or conservant des formes primaires intactes et avec des sulfures sains. Au sein de cet horizon, les teneurs en particules d'or sont plus élevées dans la matrice que dans les nodules fortement indurés. Cela implique qu'à ce niveau, le cuirassement a affecté un matériau contenant des éléments de nature et de degré d'altération variés. L'absence d'or dans la partie médiane du profil confirme un certain degré d'allochtonie des matériaux parentaux de l'horizon supérieur de la cuirasse.

Mots-clés : Altération supergène, Cuirasse ferrugineuse, Minéraux lourds, Or, Zircon, Afrique de l'Ouest, Burkina Faso.

Abstract Dynamics of gold and associated heavy minerals in a lateritic profile, Burkina-Faso, West Africa. Implication for origin of the ironcrust materials

A lateritic profile, developed in the area of the Gangaol gold mineralization, underwent intensive weathering episodes resulting in significant dissolution of the most resistant heavy minerals including gold and zircon. In the upper horizon of the ironcrust, those weathered minerals coexist with unweathered gold particles characterized by primary shapes and fresh sulfides. Within this horizon, the matrix is richer in gold particles than in indurated ferruginous nodules. These observations suggest this part of the ironcrust is constituted by elements of varying compositions with varying degrees of weathering. The lack of gold particles in the medium part of the profile confirms the allochthonous character of the parent material of the upper part of the ironcrust.

Keywords: Weathering, Ironcrust, Heavy minerals, Gold, Zircon, West Africa, Burkina Faso.

Abridged English Version

A THICK lateritic mantle covers the greater part of the intertropical area. Heavy minerals, some of which are inherited from the parent rock, may testify to the complex evolution of these formations. Several stu-

dies, carried out in alluvial (Hallbauer and Utter, 1977; Boyle, 1979; Hérial *et al.*, 1990) or in lateritic systems (Freyssinet, 1993; Edou-Minko, 1988; Sanfo *et al.*, 1992; Colin 1992) have demonstrated that gold particles can

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : 43155.
Cote : B ex 1

Note

présentée par Georges Pédro.

remise le 20 mars 1995, acceptée le 31 mai 1995.

ORSTOM Documentation



010003891

record regional morphoclimatic paths. Gold and other heavy minerals were used to study a lateritic weathering profile in a sub-Saharan region.

The gold deposit of Gangaol is located in the east part of the Bouroum-Yalogo Birrimian volcano-sedimentary belt in northeast Burkina Faso. In this semi-arid area, the landscape is characterized by large flattened areas, dominated by hills with rock outcrops, and plateaus capped by ironcrusts, relicts of past glacis (Michel, 1978, Grandin, 1976). Two generations of plateaus can be observed, the high glacis with an altitude of 340 m and the middle glacis at 320 m. Primary mineralization occurs in two groups of quartz veins outcropping in amphibolites (Bourges *et al.*, 1994). The main quartz vein structure disappears under a lateritic plateau, relict of the high glacis planation. This study deals with the weathering profile developed in this plateau (fig. 1).

THE WEATHERING PROFILE

In pits dug from the top of the high glacis plateau to the foot of the downslope, we found the weathering profile previously described in this Burkina Faso area (Boulet, 1974; Leprun, 1979; Pion, 1979; Ambrosi, 1984). Our study concerns four pits excavated in the ironcrust. Two pits were dug to depths of 15 and 17 m crossing the ironcrust to reach the kaolinic saprolite. Petrological study and whole rock chemical and mineralogical (X-ray diffraction) analyses were carried out on representative samples.

The saprolite : Within the saprolite, kaolinite, goethite and quartz are the main minerals with minor muscovite. At quartz vein wall, cut by one pit, saprolite contains many rust stains, pseudomorph after pyrite. At 12 m depth, the rock structures disappear progressively upward in the mottle zone. This transition is marked by the disappearance of muscovite and the presence of hematite and is accompanied by the decrease of alkaline and alkali earth elements content and an increase of Fe_2O_3 content (table).

The ironcrust : The ironcrust is 10 m thick. At the base, a 2 m thick nodular layer with little hardened matrix is overlain by a hard massive crust locally tubular or nodular. On the

top, from 0 to 3 m, we observe a conglomeratic crust with 0.5 to 10 cm well indurated red-purple elements and brown angular elements. The saprolite-ironcrust transition is marked by the decrease of kaolinite content, the disappearance of quartz and the increase of Fe_2O_3 content (table). However, within the ironcrust, chemical or mineralogical analyses do not show any significant changes.

HEAVY MINERAL DISTRIBUTION

The minus 1 mm fraction of the global samples was panned. This fraction, which forms from 7 to 30 weight percent of the ironcrust, is mainly composed of the matrix, which is more friable than the indurated elements. The coarse fraction was crushed and panned when samples exhibit a significant number of gold particles. A portion of the gold particles and zircon grains were observed by scanning electron microscope (SEM).

The zircons : 114 zircons coming from 3 saprolite and 3 ironcrust samples have been observed under SEM. Whatever the habitus (rounded or euhedral) and the weathering horizon these minerals show dissolution cavities (fig. 2) in proportions varying from 21 to 77% without apparent correlation with sample position in the profile. These dissolution features present the problem, pointed out by Colin *et al.* (1993), with the use of zirconium as stable element in mass balance calculations.

The sulfides : In the fresh rock, sulfides (pyrite and arsenopyrite) occur in the quartz vein and at its walls. In the saprolite only iron oxo-hydroxides, pseudomorph after pyrite, are observed. However, some unweathered sulfides are present at the top of ironcrust, between 0 and 2.5 m depth, as well as in the matrix and in the indurated elements (EDS spectra, fig. 3).

The gold particles are present in the saprolite and in the ironcrust between 0 to 2.5 m (fig. 1). In the ironcrust the matrix with an average content of 391 particles per 100 kg is richer than the indurated elements with an average content of 28 particles per 100 kg fraction. Morphological features of 25% of the 460 gold particles, extracted from one pit, have been studied under SEM. Within the ironcrust, we observe 50% of particles with dissolution pits, 40% of blunt particles, and also

10% of fresh particles. 77% of these particles show transport marks (Héraïl *et al.*, 1990; Yeend, 1975). Within the saprolite, particles are mainly blunt (84%). Fresh particles are only observed within the stockwork.

The sulfide and gold particles distribution in the profile indicates a discontinuity in the ironcrust around 2.5 m depth that neither chemical nor mineralogical whole rock analyses reveal.

NATURE OF THE DISCONTINUITY IN THE IRONCRUST

The lack of sulfide and gold particles in the ironcrust between 10.5 and 2.5 m indicates a barren rock, probably *in situ*. Above, the presence of fresh gold particles and unweathered sulfide demonstrates that part of the initial material was weathered little. On the other hand, in the same level, gold particles and zircon with dissolution features demonstrate a strong weathering (Colin, 1992; Krupp and Weiser, 1992). The lower content of gold particles of the indurated nodules, compared to the gold particle content of the matrix, shows also a heterogeneity of the parental

material. Therefore heavy minerals show, at the upper part of the crust, that the ferruginous induration took place on a parental material having various origins and degrees of weathering. As the mineralized structure has a dip higher than 30°, the limit between the barren ironcrust and the auriferous ironcrust does not originate from two *in situ* parent rocks. At the present time, in the glacis of the lowlands of this Sudano-Sahelian area, we observe the same phenomena : a pebbly material, in surficial transit, mixed with ironcrust debris upslope rock fragments and local rock pebbles, overlies an autochthonous saprolite.

The occurrence of sulfide relicts in the ironcrust confirms that the deep ferrallitic weathering developed at the expense of the old planation surface is later than the ferruginous induration (Leprun, 1979; Grandin, 1976). In the ironcrust, it seems that some ferruginous crusts act as a protective layer for residual minerals, presenting solutions from percolating.

The heavy mineral distribution and morphology reveal a sedimentological discontinuity in an old ironcrust.

I. INTRODUCTION

L'épais manteau d'altération latéritique, qui couvre la plus grande partie de la zone intertropicale, renferme des minéraux lourds dont une partie est héritée de la roche fraîche. Ces phases sont les témoins de l'évolution complexe de ces formations. Parmi ces minéraux, les particules d'or peuvent enregistrer différentes étapes de l'histoire morphoclimatique des milieux dans lesquels elles ont évolué. C'est ce que montrent les travaux, menés d'abord en milieu alluvial (Hallbauer et Utter, 1977; Boyle, 1979; Héraïl *et al.*, 1990), puis en milieu latéritique (Freyssinet, 1993; Édou-Minko, 1988; Sanfo *et al.*, 1992; Colin, 1992). Nous avons utilisé les particules d'or et les minéraux lourds les accompagnant pour retracer les processus de mise en place des matériaux latéritiques dans un contexte soudano-sahélien au Burkina Faso.

Le site aurifère de Gangaol est situé au NE du Burkina Faso, dans la branche orientale du sillon volcano-sédimentaire birrimien de Bouroum-Yalogo. Dans cette région semi-aride, le paysage est constitué par de vastes étendues aplanies, dominées par des plateaux cuirassés et des collines où affleurent la roche en place. Deux générations de plateaux cuirassés, interprétés comme les témoins de glacis anciens, s'individualisent bien dans le paysage, le haut glacis vers 340 m et le moyen glacis vers 320 m (Michel, 1978; Grandin, 1976). Le gîte primaire affleure sur 700 m, dans une zone surdéformée, au sein d'une série hétérogène d'amphibolitoschistes orientée N70° 60°SE, recoupée par des roches basiques. Ce gîte, dont la structure principale est également orientée N70°, est formée par des filons de quartz sombre (11 g/t d'Au), à pendages toujours forts vers le SE ou verticaux. Des filons de quartz clair (5 g/t d'Au), branchés sur la structure majeure, sont plissés avec des

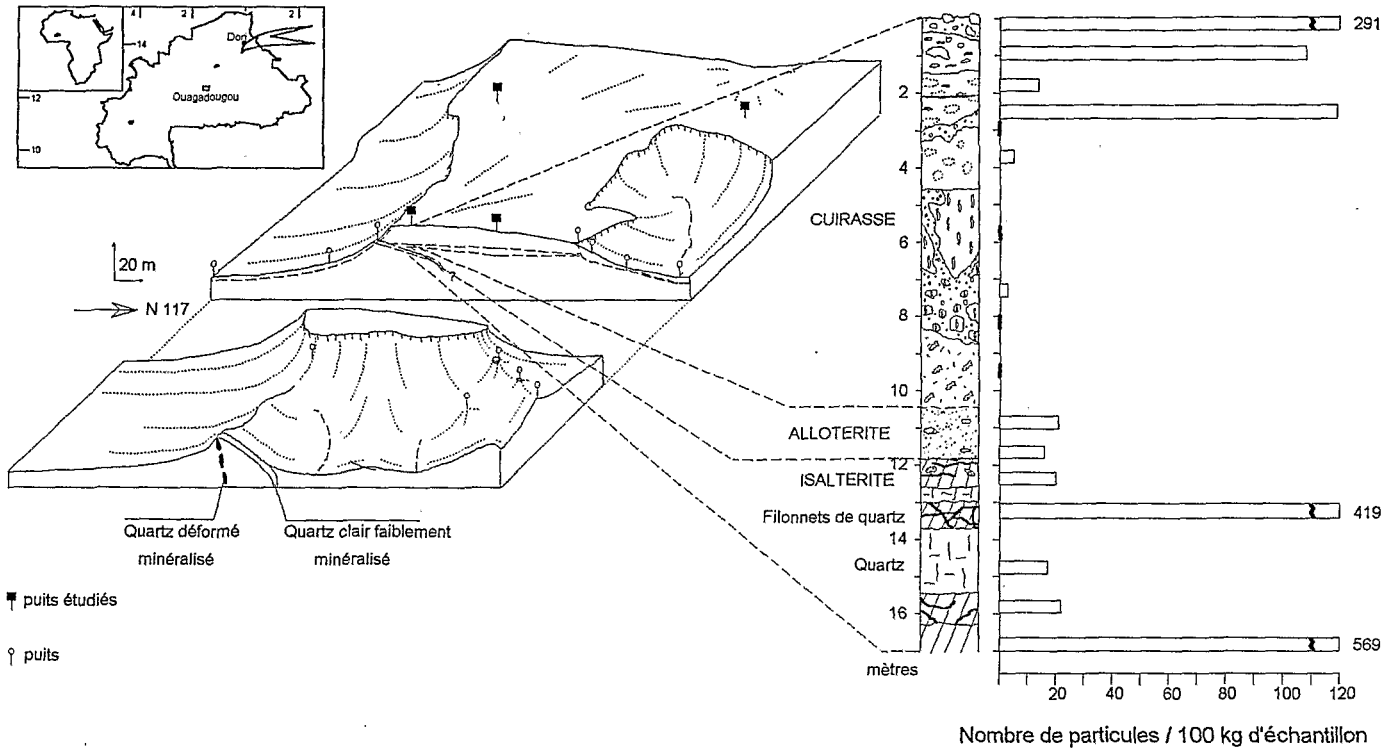


Fig. 1 Situation géographique et géomorphologique du site de Gangaol. Distribution de particules d'or dans un profil cuirassé de haut glacis.

Geographical and geomorphological setting of the Gangaol deposit. Sketch of a weathering profile. Gold particles distribution along the weathering profile.

pendages variant de 15 à 45° (Bourges *et al.*, 1994). Cette structure disparaît dans sa partie NE sous un plateau cuirassé, relique d'un haut glacis (fig. 1).

II. PRÉSENTATION DU PROFIL D'ALTÉRATION

Dans les puits implantés en toposéquence, du sommet de la cuirasse de haut glacis jusqu'au pied des versants, on observe les différents faciès d'altération décrits régionalement (Boulet, 1974; Leprun, 1979; Pion, 1979; Ambrosi, 1984). Le travail présenté ici concerne quatre puits foncés sur le haut glacis. Deux puits traversent la cuirasse et se poursuivent jusqu'à 15 et 17 m dans l'isalterite kaolinique. Les observations macroscopiques et microscopiques ainsi que des analyses chimiques et minéralogiques par diffraction de rayons X (DRX) sur roche totale, ont été effectuées sur des échantillons représentatifs des différents horizons des profils. Les profils sont constitués de deux ensembles principaux : un ensemble altérite et un ensemble cuirasse sus-jacent (fig. 1).

1) *L'altérite*. Dans la partie inférieure des puits, l'altérite conserve la structure de la roche parentale. Cette isalterite, constituée de kaolinite et d'une phase micacée (raie à 10 Å au DRX), est progressivement envahie par des oxyhydroxydes de fer. Les quartz du filon principal, recoupé par un puits à 13,7 m, et ceux du réseau de filonnets observé aux épontes présentent d'importantes marques de dissolution. L'isalterite des épontes est constellée de taches rouille, pseudomorphoses de pyrite en goéthite. Entre 9 et 12 m, les structures de la roche parentale sont progressivement effacées. Dans cette alloterite, la phase micacée disparaît, tandis que des domaines lithorelictuels subsistent sous forme de concrétions et de plaquettes hématitiques dans une matrice argilo-ferrugineuse. Chimiquement, le passage à l'alloterite se marque par une chute des teneurs en K_2O , MgO et SiO_2 et une augmentation en Fe_2O_3 (tableau).

2) *La cuirasse*. L'ensemble des horizons indurés est épais d'une dizaine de mètres. A la base, un horizon de 1 à 2 m contient des nodules lithorelictuels à cortex brun-jaune,

Tableau Teneurs moyennes des différents faciès d'altération d'un profil cuirassé.
 Mean contents of the weathering levels of a lateritic profile.

Faciès	P (m)	%									ppb	
		Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	SiO ₂	TiO ₂	LOI	TOTAL	Au	
Cui. conglomératique..	0-2,5	20,69	39,36	0,13	0,10	0,15	24,12	0,79	11,91	97,26	21	
Cui. massive.....	2,5-8,5	18,44	44,50	0,14	0,06	0,08	19,87	0,57	11,67	95,33	46	
Cui. peu indurée.....	8,5-10,4	23,93	33,63	0,11	0,07	0,07	26,35	1,05	12,29	97,50	53	
Allotérite.....	10,4-11,8	23,06	28,25	1,58	0,24	0,97	31,17	1,07	10,75	97,12	279	
Isaltérite.....	>11,8	28,17	16,80	2,99	0,39	0,06	37,46	0,99	10,45	97,37	97	

dans une matrice argilo-ferrugineuse peu indurée. La cuirasse *sensu stricto* présente, à la base, un faciès vacuolaire renfermant de larges poches (métriques) digitées à faciès nodulaire. Ces faciès sont surmontés d'une cuirasse massive, constituée de domaines sombres aux contours irréguliers et d'une matrice bariolée indurée. La même succession de faciès est observée dans les différents puits. L'étude au microscope optique permet de suivre une évolution continue du faciès massif au faciès vacuolaire, puis nodulaire. Cette évolution se caractérise principalement par une augmentation de la porosité de la matrice et par la nodulation de domaines lithorelictuels et pédorelictuels. Cette évolution correspond à un démantèlement de la cuirasse.

Dans les 3 m supérieurs, on observe une cuirasse conglomératique dont le faciès varie entre les différents puits. La matrice, soit jaune-rouge relativement friable, soit rouge plus indurée emballé des éléments fortement indurés de natures et de tailles différentes. En lame mince, on retrouve des nodules semblables aux nodules de démantèlement observés dans les faciès de cuirasse sous-jacents. Cependant, apparaissent des éléments qui n'ont jamais été observés dans la partie inférieure de la cuirasse comme des nodules, à cœur rouge zoné, bordés d'un cortex brun rubané sécant, ou des éléments anguleux où sont parfaitement reconnaissables, soit la structure de l'amphibolite non hydrothermalisée, soit celle d'éléments de filon de quartz.

Le passage de l'allotérite à la cuirasse se marque par la disparition presque totale des alcalins et alcalino-terreux (tableau) ainsi

que celle du quartz. En revanche dans la cuirasse, les analyses sur roche totale, chimiques et DRX, ne font apparaître aucune variation significative entre les différents faciès.

III. LA DISTRIBUTION DES MINÉRAUX LOURDS

La séparation des minéraux lourds a été effectuée à la batée sur la fraction inférieure à 1 mm extraite des échantillons bruts par tamisage sous eau. Dans la cuirasse, cette fraction qui représente 7 à 30 % de l'échantillon, est constituée des parties les plus friables de la cuirasse et, en particulier, de la matrice. Dans les échantillons présentant un nombre significatif de particules d'or, des batées ont également été effectuées, après concassage, sur la fraction supérieure à 1 mm, renfermant les éléments les plus indurés. Dans les concentrés ainsi obtenus, les particules d'or visibles à la loupe binoculaire ont été comptées et séparées. Une partie des particules d'or et des zircons, a été observée au microscope électronique à balayage (MEB).

Les zircons : 114 zircons provenant de 3 échantillons d'altérite et de 3 échantillons de cuirasse ont été observés au MEB. Quels que soient leurs habitus, arrondis ou en prismes automorphes, et l'horizon qui les contient, une proportion non négligeable de zircons présente des marques de dissolution plus ou moins importantes (fig. 2). Cette proportion oscille de manière erratique entre 21 et 77 %. Ces traces de dissolution posent le problème, soulevé par Colin *et al.* (1993), de l'utilisation du zirconium comme élément invariant dans les calculs de bilans géochimiques.

Fig. 2 Cavités de dissolution sur un zircon automorphe provenant de l'altérite à structure conservée.

Dissolution pits on a euhedral zircon coming from the saprolite.

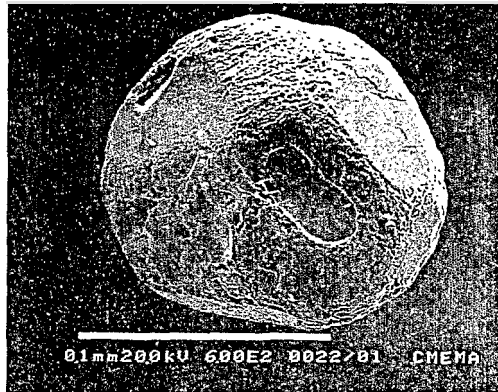


Fig. 3 Analyse qualitative en dispersion d'énergie (EDS) d'un grain d'arsénoxyrite provenant de la partie supérieure de la cuirasse.

Energy dispersion spectrum (EDS) of arsenopyrite coming from the upper part of the ironcrust.

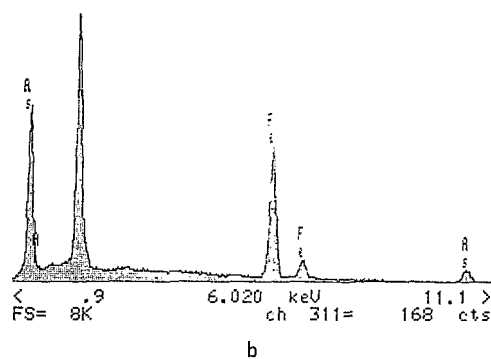
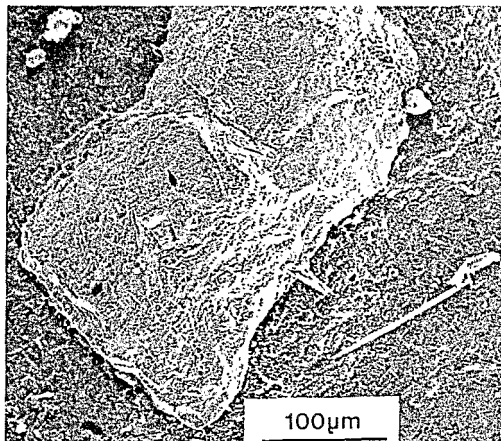


Fig. 3

Les sulfures sont peu abondants. Dans les roches saines, ils n'apparaissent que dans les filons et à leurs épontes. A la base des puits, dans l'isaltérite, seules subsistent des pseudomorphoses de pyrites en oxyhydroxydes de fer, à l'exclusion de sulfures sains. Cependant quelques grains de pyrite et de mis-

pickel sains (spectre EDS, fig. 3) sont observés dans les 2,5 m supérieurs de la cuirasse à faciès conglomératique de trois des quatre puits. Ils sont présents aussi bien dans la matrice que dans les éléments grossiers les plus indurés. Les sulfures sont absents de la partie inférieure de la cuirasse.

Les particules d'or sont présentes dans l'altérite et dans la cuirasse conglomératique, entre 0 et 2,5 m (fig. 1). Dans cette dernière, la fraction inférieure à 1mm contient en moyenne 391 particules pour 100 kg de fraction, alors que la fraction supérieure à 1mm se révèle beaucoup plus pauvre, avec une moyenne de 28 particules pour 100 kg de fraction.

La morphologie du quart des 460 particules d'or recueillies dans un des puits a été étudiée en détail au MEB. Dans la cuirasse conglomératique, on observe, 50 % de particules dont plus de 20 % de la surface sont affectés par des cavités de dissolution, 40 % de particules présentant un émoussé important de la surface et des arêtes, et également, 10 % de particules primaires aux contours irréguliers et arêtes vives. 77 % de ces particules présentent des marques considérées comme acquises par transport (Hérail *et al.*, 1990 ; Yeend, 1975). Dans l'altérite, l'essentiel des particules (84 %) présente un émoussé de la surface et des arêtes. Seuls les filonnets de quartz renferment des particules primaires. L'étude morphologique montre donc une population de particules d'or beaucoup plus hétérogène dans la cuirasse que dans l'isaltérite.

La distribution de l'or et des sulfures met donc en évidence vers 2,5 m une discontinuité dans la cuirasse que ni la chimie, ni la minéralogie sur roche totale ne révèle, mais que l'observation macroscopique et microscopique des faciès de cuirasse dans les puits permettait de suspecter.

IV. NATURE DE LA DISCONTINUITÉ DANS LA CUIRASSE

Dans la cuirasse, l'absence de particules d'or et de sulfures entre 10,5 et 2,5 m indique une roche initiale faiblement minéralisée, vraisemblablement en place, for-

mant le toit du filon et du réseau de filonets de quartz associé. La présence de sulfures sains à partir de 2,5 m et de particules d'or primaires en surface indique que le cuirassement a affecté des éléments de roche peu altérée. Mais, dans ce même horizon de cuirasse, une proportion importante des zircons et des particules d'or présente des cavités de dissolution. Celles-ci sont la marque d'une altération intense (Colin, 1992 ; Krupp et Weiser, 1992). La différence des teneurs en particules d'or de la matrice et des éléments indurés marque également une hétérogénéité du matériau initial. Ainsi, les minéraux lourds montrent que les horizons supérieurs du profil affectés par le cuirassement comportaient des éléments de degrés d'altération très distincts et d'origines différentes. Présente dans les quatre puits étudiés du plateau cuirassé et située dans chacun d'eux à une profondeur comparable, la discontinuité entre la cuirasse non minéralisée et la cuirasse aurifère ne peut pas correspondre à un contact de deux roches en place. En effet, l'allure généralement monoclinale des structures encaissantes et la surdéformation (plissement des filons blancs les plus tardifs) dans la zone du gîte primaire excluent l'existence de structures tabulaires. La seule source d'or que l'on peut envisager dans le contexte local est le filon de quartz. On constate, d'ailleurs, que le plateau cuirassé présente une pente faible ($\approx 2\%$) dont la direction est divergente à celle du filon. Celui-ci a probablement affleuré, avant l'incision du plateau, en amont des puits étudiés.

Le cuirassement du haut glacis a affecté deux types de matériaux : en surface, sur 2,5 m d'épaisseur, un matériau originel hétérogène, présentant un certain degré d'allochtonie, et en dessous une roche en place. C'est bien ce que l'on observe sur les glacis fonctionnels des zones basses du pay-

sage soudano-sahélien de Gangaol : sur une roche peu altérée en place, un cailloutis en transit, associé à une quantité variable de matrice fine, mêle des débris de cuirasse et de roche issus de l'amont à une forte proportion d'éléments de roches locales ; les degrés d'altération sont divers et les particules d'or ne présentent de formes évoluées que si leur transport a eu lieu après libération de leur gangue. Il y a là, à des époques très distinctes, l'effet des mêmes processus climatiques d'aplanissement.

Le maintien, dans la cuirasse de haut glacis, de particules d'or fraîches et surtout de sulfures sains confirme que l'altération ferrallitique profonde qui a affecté les plateaux témoins de la vieille surface est postérieure au cuirassement (Grandin, 1976), voire contemporaine (Leprun, 1979). Tout se passe comme si le cuirassement offrait une protection d'oxyhydroxydes de fer aux minéraux dont les solutions ferrugineuses n'ont pu assurer l'épigénie et que les circulations ultérieures n'atteignent plus.

CONCLUSION

Malgré l'altération intense qui marque les minéraux les moins altérables comme le zircon et l'or, malgré l'effet homogénéisant du cuirassement sur les matériaux qu'il affecte, l'interprétation d'un ancien profil de haut glacis est déduite de la répartition et de la morphoscopie des minéraux lourds relictuels. Une limite au sein de la cuirasse, qui pouvait être interprétée comme l'apparition d'une nodulation ferrugineuse, prend une signification sédimentologique.

L'étude des minéraux lourds apparaît comme un instrument puissant, complémentaire de la chimie et de minéralogie des roches totales, pour interpréter la genèse des cuirasses et des profils d'altération.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet Campus « cartographie géologique appliquée à la recherche minière au Burkina Faso ».

Remerciements : Les auteurs remercient F. Colin et B. Boulangé pour leurs commentaires constructifs et F. Colin pour la révision de la version anglaise.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMBROSI, J. P., 1984. Pétrologie et géochimie d'une séquence de profils latéritiques cuirassés ferrugineux de la région de Diouga, Burkina Faso, *Thèse 3^e cycle*, Univ. Poitiers, 223 p. Mémoire déposé à la bibliothèque de l'université de Poitiers.
- BOULET, R., 1974. Toposéquences de sols tropicaux en Haute Volta : équilibres dynamiques et bioclimats, *Thèse Sc.*, Strasbourg, *Mém. ORSTOM*, 85, 1978, 272 p.
- BOURGES, F., DEBAT, P., GRANDIN, G., PARISOT, J. C., BARRAS, E., OUEDRAOGO, M. F. et TOLLON, F., 1994. Déformation progressive de filons de quartz en concentrations aurifères, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 319, série II, p. 543-550.
- BOYLE, R. W., 1979. The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element), *Canada Geological Survey*, Bull. 280, Ottawa, Ontario, Canada, 584 p.
- COLIN, F., 1992. L'or traceur de l'histoire chimique de l'altérosphère latéritique sous forêt équatoriale, *Habilitation à diriger les recherches*, Univ. Aix-Marseille III, 171 p. Mémoire déposé à la bibliothèque de l'université d'Aix-Marseille III.
- COLIN, F., ALARCON, C. et VIEILLARD, P., 1993. Zircon: an immobile index in soils?, *Chemical Geology*, 107, p. 273-276.
- EDOU-MINKO, A., 1988. Pétrologie et géochimie des latérites à « stone-line » du gîte d'or d'Ovala. Application à la prospection en zone équatoriale humide (Gabon), *Thèse*, Univ. Poitiers, 147 p. Mémoire déposé à la bibliothèque de l'université de Poitiers.
- FREYSSINET, Ph., 1993. Gold dispersion related to ferricrete pedogenesis in South Mali: application to geochemical exploration, *Ch. Recherche Minière*, 510, p. 25-40.
- GRANDIN, G., 1976. Aplanissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest, *Mém. ORSTOM*, 82, 275 p.
- HALLBAUER, D. K., et UTTER, T., 1977. Geochemical and morphological characteristics of gold particles from recent rivers and fossil placer of Witwatersrand, *Mineralium Deposita*, 12, p. 293-306.
- KRUPP, R. E. et WEISER, T., 1992. On the stability of gold-silver alloys in the weathering environment. *Mineralium Deposita*, 27, n°4.
- HERAIL, G., FORNARI, M., VISCARRA, G. et MIRANDA, V., 1990. Morphological and chemical evolution of gold grains during the formation of polygenic fluvial placer : the Mio-Pleistocene Tipuani placer example (Andes, Bolivia), *Ch. Recherche Minière*, 500, p. 41-49.
- LEPRUN, J. C., 1979. Les cuirasses ferrugineuses des pays cristallins de l'Afrique occidentale sèche. Genèse. Transformation-dégradation, *Sci. Géol. Mém.*, Strasbourg, 58, 224 p.
- MICHEL, P., 1978. Cuirasses bauxitiques et ferrugineuses d'Afrique occidentale. Aperçu chronologique; in *Géomorphologie des reliefs cuirassés dans les pays tropicaux chauds et humides*, Travaux et Documents du CEGET, Talence, 33, p. 11-32.
- PION, J. C., 1979. Altération des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Étude de quelques toposéquences en Haute Volta, *Sci. Géol. Mém.*, Strasbourg, 57, 220 p.
- SANFO, Z., GRANDIN, G., PARISOT, J. C. et PALE, F., 1992. Aplanissements latéritisés anciens, glaciés récents et indices d'or dans la région d'Aribinda (Burkina Faso). Mineralogical and geochemical records of paleoweathering, SCHMITT J. M. et GALL Q., éd., ENSMP, *Mém. Sc. de la Terre*, 18, p. 15-30.
- YEEND, W., 1975. Experimental abrasion of detrital gold, *Journal Research US Geological Survey*, 3, p. 203-212.