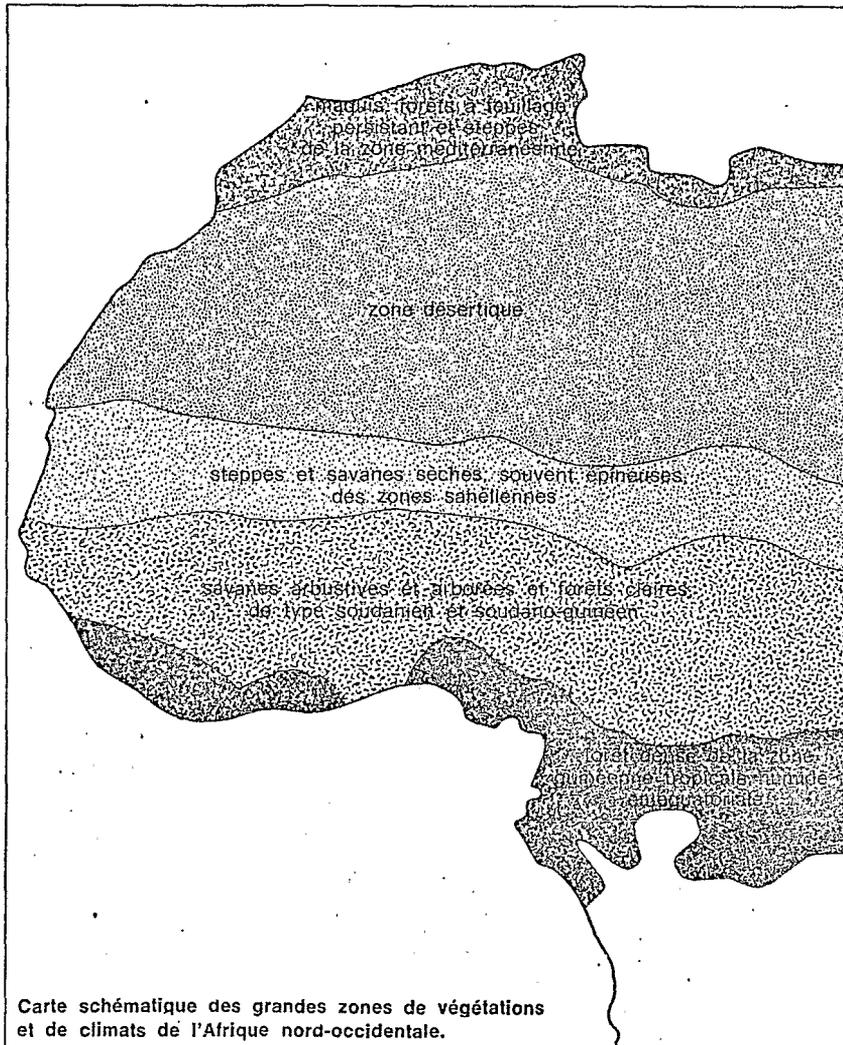


Géochimie et paysages tropicaux

par Georges Millot,
Gérard Bocquier
et Hélène Paquet



Carte schématique des grandes zones de végétations et de climats de l'Afrique nord-occidentale.

■ L'étude des paysages ne répond pas seulement à des soucis d'esthétique et de tourisme. Le paysage est ce qui abrite la vie des plantes, des bêtes et des hommes. L'abbé Breuil, grand préhistorien, disait peu avant sa mort : « L'homme sort à peine du néolithique. » Le spectacle des sociétés peu développées le montre avec force, car elles sont comme moulées dans leurs paysages. Mais les sociétés industrialisées elles-mêmes restent dépendantes de leur environnement pour l'agriculture, l'élevage, les communications, les installations d'habitation, les industries et la manière de vivre.

■ Les règles de la naissance et de l'évolution des paysages ont donc un intérêt capital : si elles aident à comprendre les liaisons passées entre les hommes et les paysages, elles permettent aussi de modeler avec doigté les transformations profondes que l'homme moderne impose à son environnement.

ORSTOM Fonds Documentaire
N° : 29 281 EK 1
Cote : B

Géologue,
Georges Millot
dirige à Strasbourg
le Centre de
géochimie de la
surface du CNRS, et
l'Institut de
géologie.

Pédologue,
géochimiste,
Gérard Bocquier,
après quinze années
de recherches en
Afrique tropicale,
professe à
l'université de
Paris VII.

Géochimiste
des altérations,
Hélène Paquet
est spécialiste des
déterminations aux
rayons X et au
microscope
électronique à
balayage.

■ L'expérience du voyageur, analysée par la science du géographe, indique que les paysages, et la vie qui y règne, dépendent de la manière dont les climats attaquent et façonnent les roches et l'organisation géologique d'une région. Viennent d'abord les mécanismes des agents qui nous sont familiers : vent, glace, eaux de ruissellement, des cours d'eau et des mers... C'est l'action mécanique ou physique des agents d'érosion et de dépôt qui s'exerce dans ce cas. Mais il est des mécanismes plus discrets et tout aussi importants, qui sont des mécanismes chimiques. On parle de géochimie, car il s'agit de l'évolution chimique de la Terre. Ici, ce sera la géochimie de la surface : géochimie des altérations, géochimie des sols, géochimie des paysages. Des progrès considérables ont été accomplis depuis dix ou vingt ans, par la rencontre et le travail en commun de géologues et de pédologues de terrain, avec des minéralogistes et des « géochimistes » (voir encadré).

Ce sont ces relations entre la géochimie, ou chimie des matériaux terrestres, et les paysages que nous souhaitons évoquer ici, grâce à quatre exemples, situés en Afrique méditerranéenne et tropicale. Nous choisissons l'Afrique car, pour des raisons historiques, ce continent est le mieux connu des Français et parce que nos travaux s'y sont développés. Mais des phénomènes analogues sont observables sur les autres continents tropicaux, comme l'Amérique du Sud ou l'Inde. Nous choisissons les climats humides et chauds de la Méditerranée et des tropiques, car c'est là que, sous l'influence de la pluie et de la chaleur, les actions géochimiques sont les plus intenses.

Les paysages méditerranéens : l'encroûtement calcaire.

Les pays méditerranéens sont fréquemment formés de grandes chaînes alpines, dont l'ossature est faite de roches calcaires. C'est pourquoi le cal-

caire abonde dans ces pays. Au pied de ces chaînes s'allongent de longues plaines inclinées, ou glacis, souvent étagées. Dans tous ces pays, les sols les plus fréquents sont des sols argileux vivement colorés, rouges ou bruns, que tous les voyageurs remarquent au flanc déchiré des routes. Mais dans les régions où la quantité de pluie est faible, inférieure à 500 ou 600 mm par an, c'est-à-dire deux fois plus faible qu'à Paris, se développent au sein de ces sols argileux rouges, à peu de profondeur, des croûtes calcaires. Souvent mises ensuite au jour par l'érosion, ces croûtes forment de grands bancs superficiels qui interdisent la culture. On les a longtemps prises pour des dépôts de vieux lacs, ou attribuées à la remontée du carbonate de chaux sous l'influence de la sécheresse. Mais des travaux pédologiques et géochimiques récents nous expliquent qu'il s'agit d'une accumulation géochimique, par migration des solutions au sein des sols.

Le Maroc oriental illustre bien cet

exemple. A. Ruellan (1) y a étudié avec soin les plaines de la Basse-Moulouya : plaine des Triffa et plaine du Zebra entre les chaînes des Bni-Snassène et des Kibdana. Ces plaines sont remplies de grands épandages d'argiles rouges à cailloux calcaires, apportés par les oueds (alluvions) ou hérités des hauteurs (colluvions). Tout ce matériel provient de l'érosion des sols des reliefs amont. Ayant eu l'occasion de parcourir ces plaines à Pâques, nous en avons admiré la verdure piquée de fleurs. Mais ce sont des steppes, car dès que la pluie cesse, l'aridité montre ses effets. Le paysage devient désolant et dur. L'alternance de la saison humide et de la saison sèche s'illustre ainsi, et les croûtes calcaires se développent au sein des sols rouges ou châtaîns qui recouvrent le paysage.

Grâce à des puits successifs, on peut étudier les variations verticales et latérales de ces accumulations calcaires dans le paysage. Voici en termes simples comment elles sont disposées. D'abord verticalement, dans un puits complet, on voit l'accumulation calcaire croître de bas en haut. A la base apparaissent des taches blanches dans le sol argileux rouge ; ce sont des amas friables. Si l'on monte, ces amas deviennent des nodules qui, de plus en plus nombreux, forment un encroûtement, qui devient homogène et donne une croûte puis une dalle, surmontée, sur une surface nette, par un niveau ou « horizon » de sol meuble. Ensuite, horizontalement, si l'on examine les faits d'un puits à l'autre le long de la pente, depuis le moins atteint jusqu'au plus encroûté, on est surpris de trouver la même succession : amas qui précèdent nodules, puis encroûtement, croûte et dalle. La figure 1A montre cette double ordonnance. L'accumulation du calcaire est donc croissante dans un versant ou glacis, de sa partie haute vers sa partie basse, autrement dit de l'amont vers l'aval. En même temps, elle est croissante, dans un puits, de la base vers le sommet. Analyses et études montrent que cette disposition ordonnée correspond à une redistribution du calcaire dans le versant. Les parties amont s'appauvrissent en calcaire, parce qu'il se dissout sous l'influence des eaux de pluie qui percolent. Les parties aval s'enrichissent peu à peu en calcaire transporté, puis déposé. Ainsi, sur chaque glacis étagé, apparaît un transport latéral de matière.

Les argiles contenues dans ces sols argileux rouges confirment le sens de cette évolution. Au départ, les matériaux contenaient des argiles banales, nommées illites, et leurs produits d'al-

Méthodes et techniques d'analyse d'un paysage

Observation de terrain. On sait aujourd'hui que les altérations et les sols dans un paysage peuvent être ordonnés en une suite enchaînée le long de la pente. C'est pourquoi on ne procède plus par puits isolés, mais par suites de puits rapprochés ou par tranchées. Ainsi peuvent être observés et mesurés les agencements des zones de départ, de transfert et d'accumulation (photo A).

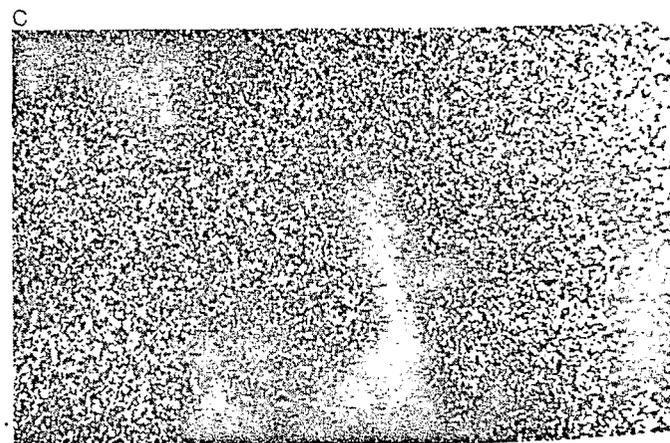
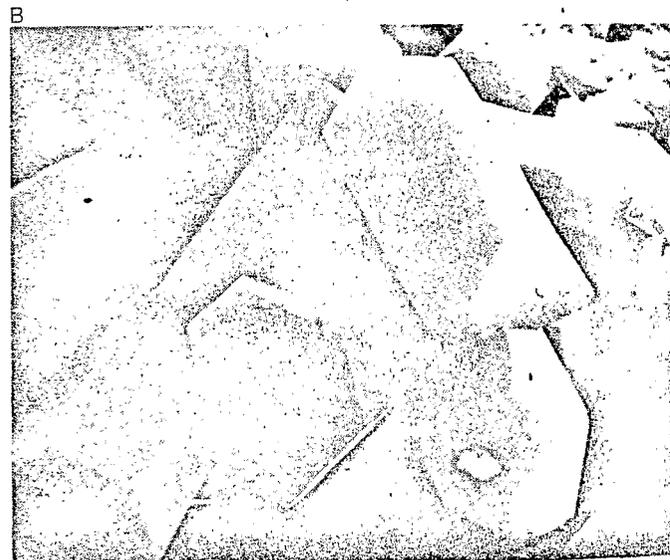
Analyses de laboratoire. Sur les échantillons prélevés sont opérées de nombreuses analyses chimiques ou minéralogiques : matière organique, granulométrie, minéraux argileux, capacité d'échange, analyses chimiques des majeurs et des traces. Ces données ou leurs rapports peuvent faire l'objet de graphiques des isovaleurs, comme celui de la figure 2B, qui donne les isovaleurs en montmorillonite dans la coupe du piedmont de Kosséllii.

Observations microscopiques. Mais l'organisation des altérations et des sols doit être examinée plus profondément que par la simple observation des coupes de terrain. Au microscope polarisant, puis aujourd'hui au microscope électronique à balayage, on peut observer la structure des produits d'altération et des sols (photos B et C). Mais on peut aussi déterminer la chronologie relative des figures observées. Tel minéral ou tel squelette minéral est antérieur à tel revêtement. Tel dépôt chimique est postérieur à tel nodule ou tubule. Telle imprégnation est postérieure à telle autre. Ainsi, l'on peut montrer que la calcite épigénise tel feldspath, que telle accumulation d'alumine est postérieure à l'accumulation argileuse, etc. La microsonde donne des indications précieuses sur la composition des plus fins détails de cette organisation, dont l'histoire est reconstituée.

(Voir G. Bocquier et Lj. Nalovic, « Utilisation du microscope électronique à balayage en pédologie », *Cahiers ORSTOM, sér. Pédol.*, 10, 411, 1972 ; et L. Le Ribault, « La mémoire des grains de sable », *la Recherche* n° 28, p. 985, nov. 1972.)

A. Tranchée creusée en savane sur 50 mètres de long et 2 à 3 mètres de profondeur, depuis le plateau jusqu'au bas-fond, pour étudier une suite de sols (N'DOK, Cameroun).

B et C. Le cliché B montre au microscope électronique à balayage (x 2 600) l'admirable cristallisation de la gibbsite (hydroxyde d'aluminium) dans une microfissure d'une cuirasse ferrugineuse. La carte des teneurs en aluminium (C) confirme la diagnose du minéral. (Clichés G. Bocquier.)



Dans le Guéra, en zone tropicale sèche, un paysage de western : de gros rochers granitiques dominent la plaine.

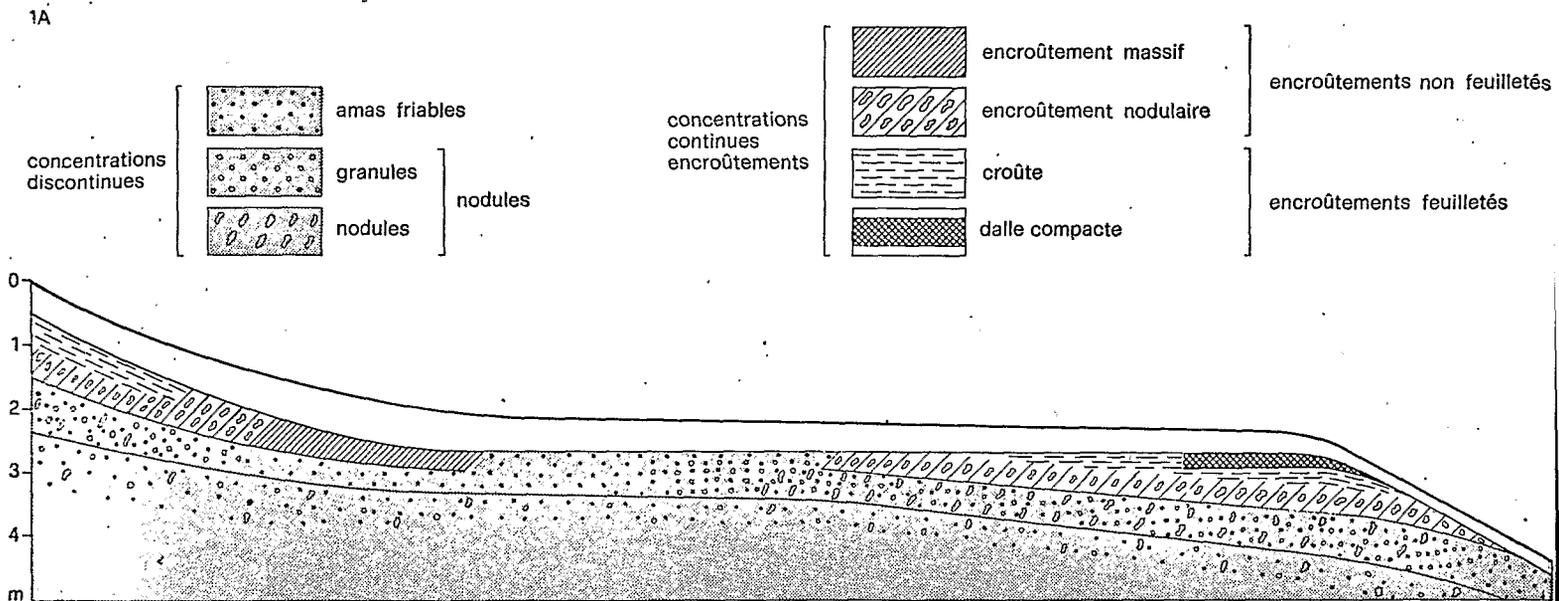


Figure 1. Au Maroc, lorsque les effets d'un climat subaride se font sentir dans ce pays méditerranéen, s'observent des encroûtements calcaires typiques.

1 A. Cette coupe de la plaine des Triffa, dans le bassin de la Basse-Moulouya, au Maroc oriental, montre les passages verticaux et latéraux des différentes accumulations calcaires dans l'épaisseur des sols d'un glacis quaternaire. (D'après A. Ruellan, 1970.)

1 B. Une petite exploitation locale, sur la plaine côtière de l'Anti-Atlas, aux environs de Tiznit, montre la suite verticale de ces encroûtements calcaires jusqu'aux blocs de dalle compacte du sommet. (Cliché G. Millot.)

tération. Mais quand l'encroûtement s'accroît, une argile particulière survient : l'attapulgite, silicate d'alumine et de magnésium, et les autres disparaissent. Dans le milieu où se concentrent les solutions pour précipiter le calcaire, les argiles anciennes sont instables et se détruisent, tandis que l'attapulgite est stable et se construit.

Ainsi s'explique l'accumulation du calcaire dans les versants ou glacis des pays méditerranéens, par migration des solutions dans les sols. A la saison humide, le calcaire est mis en solution. Les solutions migrent dans la tranche du sol. Puis, surprises par la saison sèche, elles précipitent à nouveau le calcaire, mais plus en aval, et ainsi de suite, au fur et à mesure de l'alternance des saisons. Par un sorte de jeu de culbuto que nous appelons le « culbuto géochimique », le calcaire aura tendance à s'accumuler au sein des sols, de l'amont vers l'aval. De plus, au fur et à mesure que le dépôt se produit, le nouveau calcaire bute contre celui qui l'a précédé, si bien que la zone enrichie en calcaire remonte le versant. Prenons une comparaison. Quand une file d'automobiles descend les Champs-Élysées, les voitures cheminent de l'amont vers l'aval. Quand le feu rouge s'allume, la file de voitures s'allonge vers l'amont et peut même engorger l'avenue jusqu'à l'Étoile. De la même façon, le calcaire migre au sein des sols de l'amont vers l'aval, mais le front d'accumulation se déplace de l'aval vers l'amont.

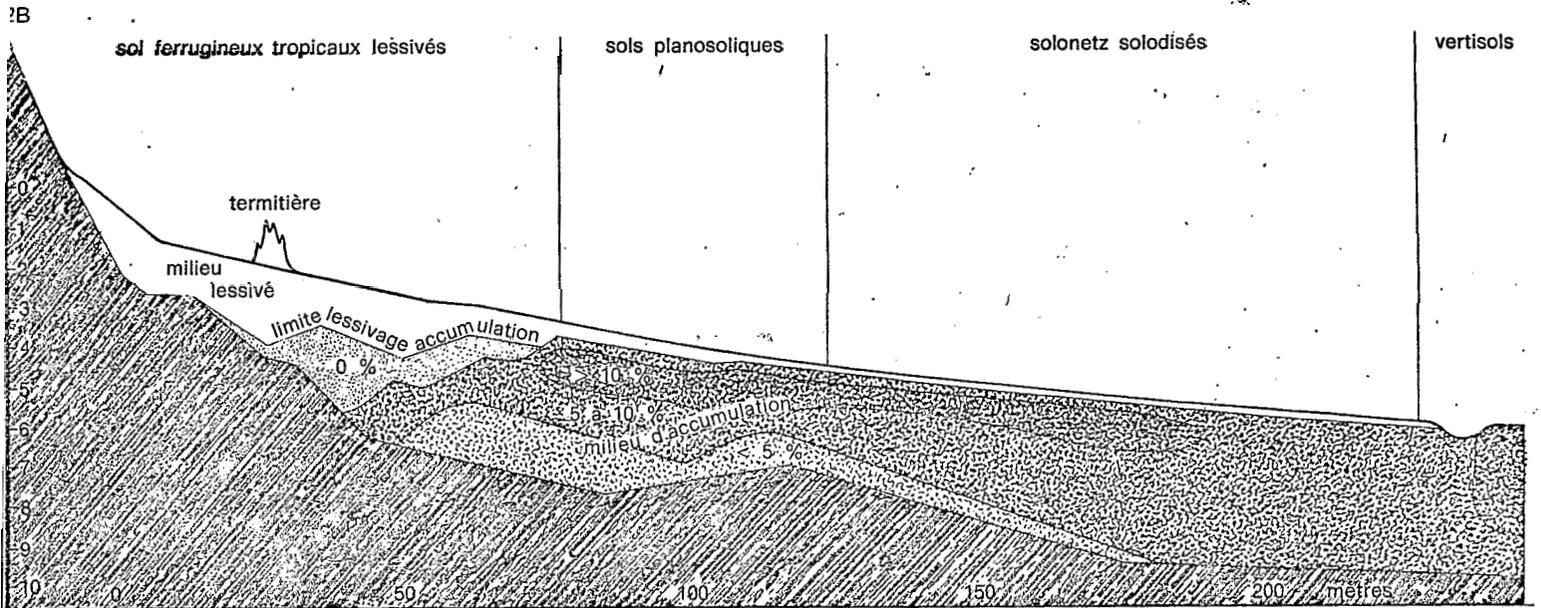
Quand l'érosion survient, par modification des climats, des dénivelées du trajet des cours d'eau, les horizons meubles de la surface sont déblayés. Ainsi s'expliquent ces dalles calcaires

exposées au soleil dans les régions semi-arides. On comprend aujourd'hui qu'il ne s'agit pas de dépôts d'anciens lacs ou de remontées de calcaire par capillarité. On sait que ces paysages sont le siège d'une accumulation latérale de carbonate de chaux, par une migration oblique, saisonnière, entretenue et envahissante, et, de toute façon, intérieure aux altérations et aux sols.

Depuis le monde méditerranéen, nous allons franchir le Sahara et gagner le monde tropical de l'Afrique. Les pluies tombent en saison chaude et les mécanismes géochimiques sont encore plus intenses. Là, l'ensemble des paysages n'est plus formé de chaînes montagneuses calcaires, mais de vieux pays granitiques et gneissiques. Les accumulations ne seront plus de calcaire, mais d'argile, de fer ou d'alumine.

Le paysage tropical sec à saisons contrastées : l'invasion de la montmorillonite.

Il existe au sud du Sahara une zone climatique appelée sahélienne, formée de vastes steppes au tapis herbeux discontinu, garni d'arbustes clairsemés. C'est cette zone, aux conditions limites, qui est la victime actuelle la plus atteinte par les sécheresses répétées des dernières années. Plus au sud encore, se trouve la zone soudanienne garnie de savanes arbustives, puis arborées. G. Bocquier⁽²⁾ a étudié la biogéochimie d'une zone intermédiaire, dite sahélo-soudanienne. L'exemple choisi se trouve au Tchad central, dans le massif granitique du Guéra, au lieu dit Kossélli. La pluviosité est de 850 mm par an, mais la redoutable



saison sèche dure huit mois. Contrastent, ainsi, des saisons intensément arrosées et de longues saisons sèches. Le pays du Guéra est un pays garni de monstrueux rochers granitiques posés sur la plaine, comme dans les « westerns », et que l'on nomme des « inselbergs » (montagne en forme d'île). Dressés avec des formes insolites (fig. 2 A), ces inselbergs dominent de longs glacis steppiques à faible pente. Au pied de l'inselberg de Kosséllili, une série de puits très serrés a permis d'observer en détail les variations latérales et verticales des altérations et des sols. Des centaines d'échantillons prélevés ont fourni des milliers d'analyses. Une véritable dissection de ce paysage fut ainsi opérée.

L'inselberg domine de 100 m le glacis, avec des pentes de 45 %. La pluie ruisselle sur ses flancs, et vient arroser abondamment son pied. Autour de lui se disposent en auréoles, d'abord une zone de raccordement de 150 mètres, garnie de savane avec une pente de 4 % en moyenne, ensuite un glacis, garni d'une steppe sur plusieurs kilomètres, avec une pente de 1 %. La clef de l'évolution de ce paysage se loge dans la zone de raccordement. En effet, s'y succèdent en auréoles, comme le montre la figure 2 B, une suite de sols, toujours ordonnés de la même façon et que dans leur nomenclature les pédologues appellent, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'inselberg : sols tropicaux lessivés, plansols, solonetz solodisés et vertisols. Ce langage de spécialiste correspond à des caractères précis. Mais, pour l'essentiel, voici le résultat des observations et analyses. Il y a, dans ce versant, deux milieux géochimiques et leur frontière.

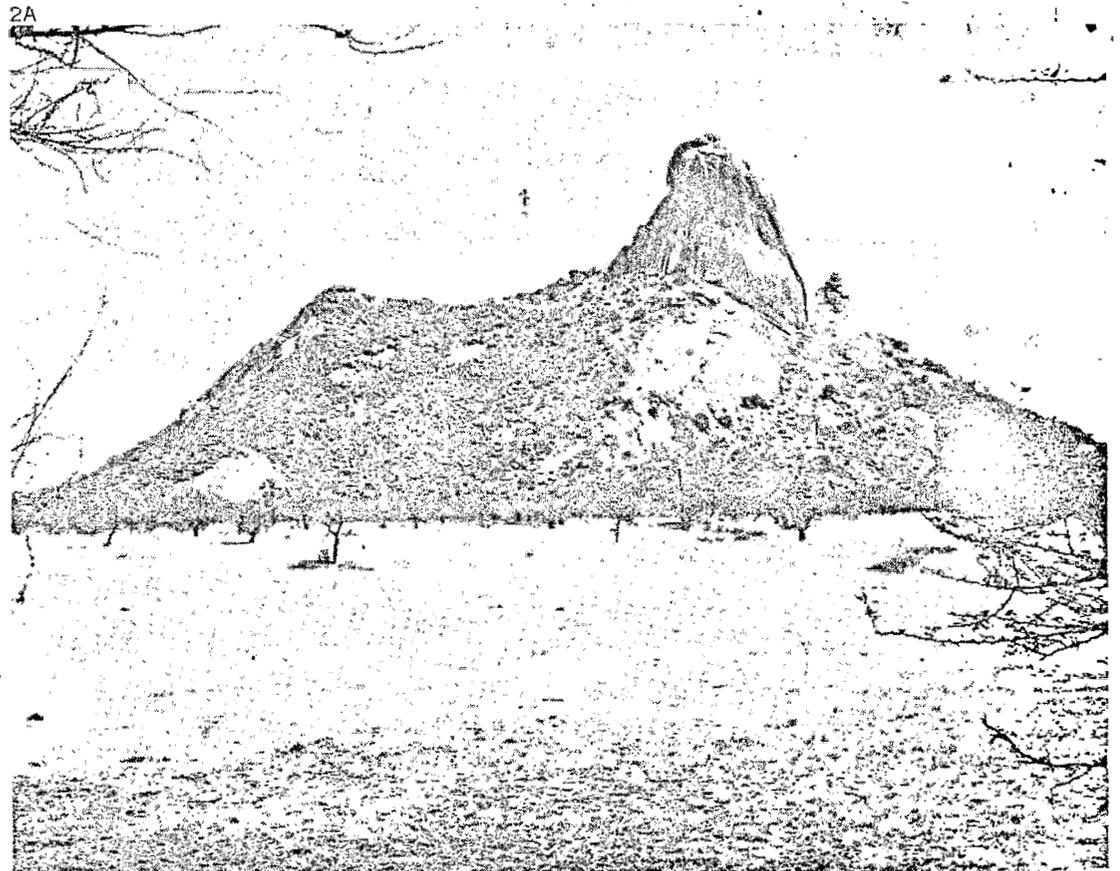


Figure 2 A. Le climat tropical à saisons alternées règne sur les paysages du massif du Guera (Tchad), parsemé de hauts îlots granitiques, ou « inselbergs » : ici l'inselberg d'Abtouyouur. A son pied se développe une ceinture de savane boisée sur les sols lessivés par les pluies qui ont ruisselé sur les parois rocheuses. Puis s'étend une steppe sahéenne, garnie de sols où s'accumule la montmorillonite. (Cliché G. Millot.)

Figure 2 B. On distingue ces deux régions géochimiques sur une coupe du pied de l'inselberg voisin de Kosséllili. L'accumulation de la montmorillonite est progressive au-delà de la limite lessivage-accumulation : 0 %, 5 % puis 10 % de la terre totale. Les pédologues distinguent, au fur et à mesure que l'on s'éloigne du pied de l'inselberg, quatre types de sols : sols tropicaux lessivés, plansols, solonetz solodisés et vertisols. (D'après G. Bocquier, 1973.)

**En pays plus humide
naissent l'épais manteau d'altération
et les cuirasses latéritiques.**

Le milieu géochimique amont est lessivé. L'appoint d'eau fourni par l'inselberg en est responsable. Les minéraux du granite s'altèrent en partie. Ils perdent des bases et de la silice. Une argile composée exclusivement de silice et d'alumine se forme : la kaolinite. Du fer s'accumule en faible quantité, sous forme de petites concrétions caractéristiques. Ce milieu correspond aux sols tropicaux lessivés de l'amont et aux horizons supérieurs des autres sols. Il est le milieu qui perd de la matière.

Le milieu géochimique aval est un milieu d'accumulation. En effet, les solutions venues de l'amont y parviennent en se concentrant peu à peu. Certains ions transitent, mais plusieurs s'y arrêtent : silicium, magnésium et fer s'y combinent pour donner une deuxième argile, la montmorillonite (silicate alumino-ferrifère), pendant que le calcium s'immobilise dans des nodules calcaires. Ce milieu est représenté par la base des sols tropicaux lessivés de l'amont, puis par la totalité des profils de sols. Il est le milieu qui gagne de la matière.

La frontière entre ces deux milieux est tracée sur la figure 2 B. Elle n'est pas horizontale. Basse à l'amont où la percolation des eaux est encore vigoureuse; elle s'élève par paliers, séparés par des marches d'escalier jusqu'à se tenir à 1 ou 2 décimètres de la surface, dans les solonetz, puis jusqu'à disparaître dans les vertisols. On conçoit déjà que cette frontière sépare un milieu qui perd de la matière d'un milieu qui en gagne. Mais il y a plus : l'analyse microscopique a pu montrer, dans le milieu d'accumulation aval, malgré la présence de

montmorillonite, que cette zone était autrefois un milieu lessivé avec ses structures et ses concrétions caractéristiques. Cela nous donne la preuve que la frontière entre les deux milieux s'est déplacée.

Et nous tenons le fil du raisonnement. Il existe un transport latéral ou oblique de matière. Cette matière est redistribuée entre l'amont et l'aval. A l'amont, les minéraux du granite s'altèrent en partie, libèrent des ions et engendrent de l'argile. Le tout émigre vers l'aval. Pour chaque palier, l'argile immigrée en milieu lessivé poreux colmate les pores. Les ions engendrent la montmorillonite, qui diminue encore la porosité. Chaque apport fait obstacle à celui qui le suit : la frontière recule. Migration de matière vers l'aval provoque remontée des accumulations vers l'amont. Ici, c'est l'invasion remontante de la montmorillonite. Tous ces mécanismes de libération puis de piégeage de matière sont commandés par le climat alternant des régions sahélo-soudaniennes. A la saison des pluies, brève mais intense, mises en solution et transports se produisent dans le milieu lessivé de l'amont. A la saison sèche, longue et sévère, les solutions se concentrent et déposent la matière transportée dans le milieu d'accumulation de l'aval. Ces deux milieux s'affrontent, et leur frontière, bien nette à chaque instant, est changeante avec le temps : elle migre vers l'amont.

L'influence de ces mécanismes, délicats mais constamment entretenus au long des millénaires, est décisive sur les paysages. Le milieu lessivé ronge l'inselberg à son pied, ce qui redresse ses versants. La zone de

raccordement émigre et se rétrécit, et fur et à mesure que l'inselberg recule et s'isole. Le glacis du milieu confinsuit, avec sa pente de 1 %. La zone de raccordement est une sorte de laboratoire géochimique qui ronge le pied des inselbergs et fabrique des glacis. Nous assistons à un façonnement géochimique des paysages, par redistribution de matière à l'intérieur des formations superficielles.

Supposons que l'érosion survienne en raison d'une aridité croissante, qui libère l'ablation par le vent et l'action destructrice des oueds. L'inselberg perd, avec sa végétation, les marges sols qui le garnissent. Sur le glacis, les horizons superficiels meubles sont déblayés, les particules fines s'envolent, les sols s'amenuisent. Sur d'immenses surfaces planes, caillou et cristaux inaltérés pavent le terrain avec un mince reliquat des sols anciens sous ce pavage. C'est le regard des Touaregs, ou le regard des Maures. C'est le paysage saharien, formé d'inselbergs isolés et morts, piqués au milieu de vastes champs de regs. Ce paysage désertique peut donc être le fils du paysage tropical ici étudié. Et l'outil qui le façonna fut le laboratoire géochimique qui fonctionne aujourd'hui au pied des reliefs tropicaux.

**Le paysage tropical humide
à saisons contrastées :
le cuirassement ferrugineux.**

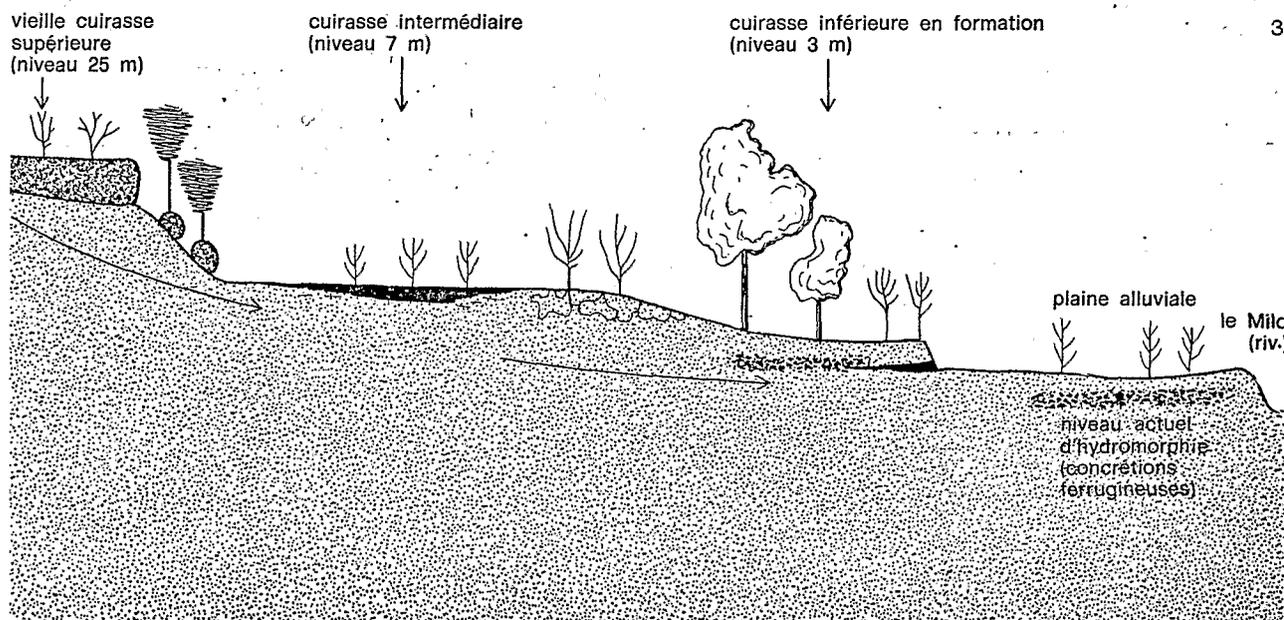
Vers le sud, on atteint des zones climatiques plus humides, dénommées soudaniennes, puis guinéennes. Les climats développent une pluviosité supérieure à 1,5 mètre, et les saisons sèches deviennent plus courtes que

(1) A. Ruellan, *Mém. ORSTOM*, 54, 302 p., 1971.

(2) G. Bocquier, *Mém. ORSTOM*, 62, 350 p., 1973.

(3) R. Maignien, *Mém. Serv. carte géol. Als. Lorr.*, 16, 235 p., 1958.

(4) J. Delvigne, *ORSTOM, Pédogénèse en zone tropicale. La formation des minéraux en milieu ferrallitique*, Dunod, 177 p., 1965.



les saisons humides. Ici survient un nouveau paysage, riche en végétation, savane arborée, puis forêt. La coupe des sols, les arrachements, les saignées du relief ne montrent plus les teintes blanches des encroûtements calcaires, ni les teintes grises des plaines à montmorillonite, mais les célèbres couleurs rouge vif des « latérites ». Cette couleur rouge vif est due au fer, accumulé dans ces régions sur de fortes épaisseurs. Nombreux sont les minéralogistes, géologues, pédologues et géographes qui ont étudié les altérations tropicales et les cuirasses ferrugineuses. On évoquera ici le travail de R. Maignien⁽³⁾ sur les cuirasses ferrugineuses de Guinée. Ce fut, en 1958, le premier ouvrage d'ensemble sur la géochimie de ces accumulations.

Nombre de ces paysages sont formés de glacis étagés (fig. 3). Chacun de ces glacis porte une épaisse couverture d'altérations et de sols argileux, riches en kaolinite. Cette kaolinite est le produit commun de l'altération des silicates sous ces climats. L'épaisseur de cette couverture va de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres. De plus, très souvent, le glacis est « cuirassé » par des oxydes de fer. Cela veut dire qu'à peu de profondeur, sous la surface du sol, des accumulations de ces oxydes peuvent s'observer et atteindre plusieurs mètres. Et c'est la distribution de ce fer qui nous intéresse ici. Un profil vertical, observé dans un puits, montre que se développent au sein de la masse argileuse, de bas en haut, des taches puis des nodules. Ceux-ci deviennent coalescents et donnent les carapaces, que l'on peut encore briser

à la main, puis les cuirasses, qu'il faut attaquer au marteau. En vision horizontale, au long d'un glacis, la même succession se retrouve de l'amont à l'aval : taches, nodules, carapaces, cuirasses. Observations et mesures montrent que le fer peut s'accumuler sur place par départ d'autres éléments. De plus, il peut migrer verticalement ou obliquement, soit sous forme particulaire, soit sous forme réduite ou complexée par la matière organique. Ensuite, dans les lieux favorables à son piégeage et à son oxydation, et spécialement pendant la saison sèche, ce fer déplacé s'accumule sous forme d'oxydes. Et ces oxydes, tantôt amorphes, tantôt cristallisés, enrichissent progressivement les accumulations antérieures. Il y a redistribution de la matière dans un paysage. Le milieu amont perd des argiles et des ions, dont le fer. Le milieu aval fixe les argiles kaoliniques qui diminuent les porosités et provoquent l'accumulation du fer lui-même. Chaque dépôt crée un obstacle pour la matière qui le suit. La frontière est remontante dans le paysage, si bien qu'une fois encore, une migration de matière de l'amont vers l'aval provoque une invasion remontante, qui, cette fois, est une invasion des oxydes de fer dans les cuirasses ferrugineuses. Ainsi s'explique que nombre de paysages tropicaux sont garnis d'une dalle d'oxydes de fer, développée au sein des profils d'altération par des migrations et redistributions verticales et obliques de matière. Le paysage se trouve ainsi « armé » par une cuirasse, plus robuste à l'aval qu'à l'amont, qui est le fruit d'une accumulation entretenue et remontante.

Supposons que l'érosion intervienne par changement des climats ou des dénivelées. Les horizons superficiels seront déblayés, les zones peu cuirassées de l'amont des glacis seront entaillées. Et nous voyons se profiler dans les paysages ces buttes témoins familières, coiffées d'une dalle un peu inclinée (fig. 4). Et, de fait, de telles silhouettes s'observeront loin vers le nord, dans des pays beaucoup plus secs, et même jusqu'au désert. Longtemps incompréhensibles pour le voyageur, ces buttes couronnées ont provoqué toutes sortes d'hypothèses, comme celle de la montée capillaire du fer sous l'effet des fortes évaporations de ces pays ensoleillés. En fait, nous savons aujourd'hui que ces paysages sont le fruit d'accumulations géochimiques, formées dans les zones basses d'un ancien pays forestier plus humide, et mis en relief par inversion du modelé.

Les paysages équatoriaux ou tropicaux humides : le manteau kaolinique et l'origine des bauxites.

Voyageons vers le sud encore. On parvient dans la zone équatoriale ou tropicale humide. La pluviosité devient très élevée, dépasse 2 mètres, pouvant même atteindre 5 ou 10 mètres. La saison sèche est très réduite ou nulle. Se développe la grande forêt permanente. Ici, la dissolution des roches cristallines de la plate-forme africaine devient très importante. Tous les minéraux sont altérés profondément. Tous les alcalins et les alcalino-terreux qui ne sont pas piégés biologiquement par la forêt sont entraînés vers les cours d'eau et perdus défini-

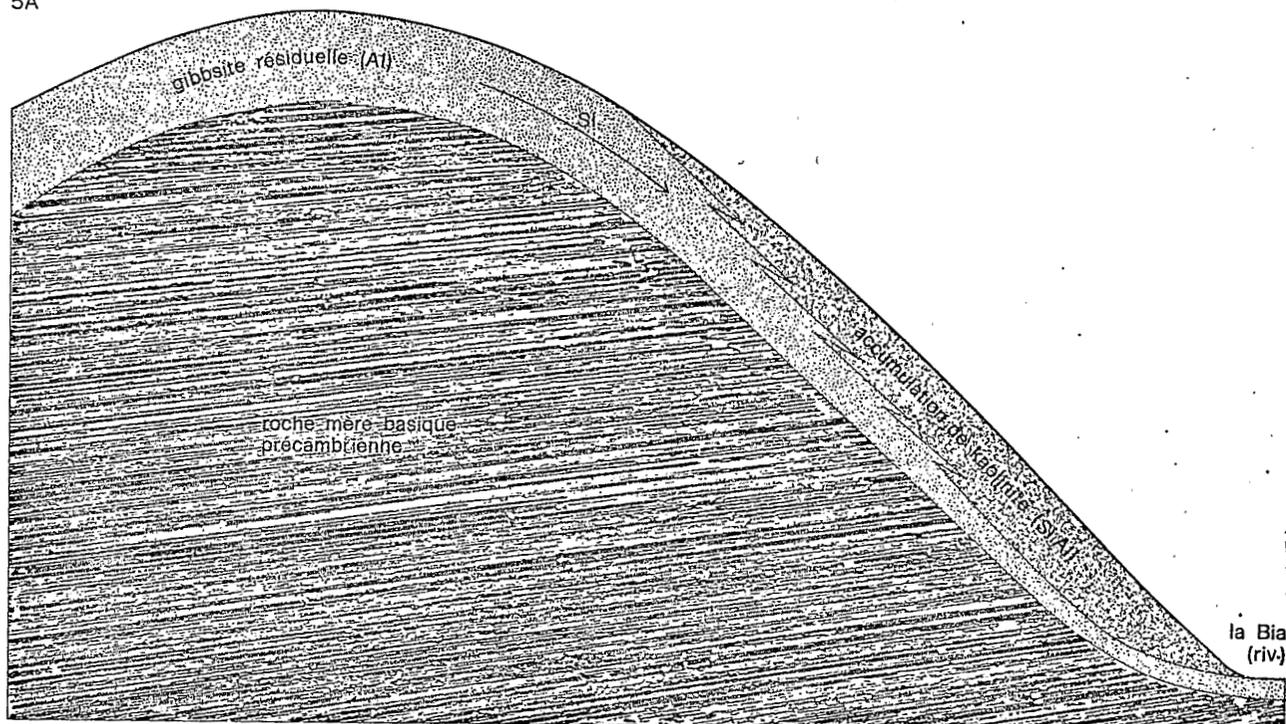
Figure 3. Les paysages soudano-guinéens sont façonnés par un climat tropical humide à saisons sèches. On y trouve souvent des glacis étagés garnis d'altérations et de sols où domine la kaolinite. Au sein de ces couvertures d'altération se développent des cuirasses ferrugineuses par accumulation des oxydes de fer. On observe ces cuirassements successifs sur cette coupe de la vallée du Milo (affluent du Niger), aux environs de Kankan, Guinée. (D'après R. Maignien, 1958.)

Figure 4. D'anciens paysages cuirassés sont parfois attaqués par l'érosion. Résistent des buttes témoins, comme celle-ci, située au nord-ouest de Dori, en Haute-Volta. Là, un massif de vieilles roches précambriennes est coiffé d'une dalle de cuirasse ferrugineuse, portée en altitude par inversion du relief. Il domine une steppe à épineux du Sahel. (Cliché G. Millot.)



Deux grands principes président à l'élaboration de tout paysage : l'amont perd de la matière et nourrit l'aval, mais chaque dépôt faisant obstacle à la matière qui le suit, l'aval envahit l'amont.

5A



5B



tivement pour le paysage, par migration latérale. L'évolution de celui-ci va dépendre du jeu de l'alumine, de la silice et du fer.

J. Delvigne (4) a étudié avec la précision d'un orfèvre, en Côte-d'Ivoire, le cas des collines de roches basiques, c'est-à-dire de roches cristallines pauvres en silice et dépourvues de quartz. On retrouve ici, malgré l'intensité des pluies, des mécanismes intéressants. Au sommet des collines, tous les éléments sont dissous promptement, sauf l'aluminium et le fer abandonnés sur place. La silice a quitté les lieux et migre avec les bases dans le flanc des collines. Moins soluble que ses compagnons, elle peut se combiner vers le bas de la pente avec l'alumine qu'elle rencontre (fig. 5 A). Elle donne cette argile exclusivement silico-alumineuse qu'on nomme kaolinite. Ainsi se retrouvent à l'amont un milieu lessivé qui ne conserve que l'alumine et le fer, puis à l'aval un milieu qui commence à accumuler, mais ne peut piéger que la silice. Cette silice, combinée à l'alumine, donne la kaolinite, argile qui bouche les pores, freine les circulations, fait obstacle aux migrations suivantes. L'accumulation de kaolinite va être entretenue, et ici encore, remontante. Par sa seule dynamique, ce paysage de collines va se trouver l'objet d'une invasion remontante de kaolinite, à partir des bas-fonds jusque vers les hauteurs.

Ce cas n'est pas unique. Il en est d'autres. Citons celui de roches, non pas basiques mais granitiques. Ici, le quartz est présent dans toutes les roches. Sans doute est-il soluble dans ces conditions, mais si lentement que le milieu sera toujours assez riche en

silice. C'est pourquoi l'alumine présente trouvera toujours assez de silice pour se combiner à elle et donner de la kaolinite. Tout le paysage s'enrichit en kaolinite : c'est le manteau kaolinique équatorial. Citons maintenant, à l'opposé, le pays formé de roches pauvres en quartz, et tellement lessivé par les pluies équatoriales que la silice va être évacuée par les cours d'eau. L'alumine, ne disposant plus de son partenaire pour former la kaolinite, reste seule ; elle cristallise alors en gibbsite, minéral purement alumineux : c'est l'aurore d'un gisement de bauxite. Ainsi fonctionne, en pays équatorial, un lessivage intense qui provoque une redistribution de la matière dans le paysage. Ou bien tout le monde est évacué, sauf l'alumine et le fer, et un manteau bauxitique prend naissance. Ou bien la silice est retenue dans les bas-fonds, où elle se combine à l'alumine, et le paysage est mixte : bauxitique dans les hauteurs, kaolinique dans ses parties basses. Ou bien la silice est si abondante qu'elle reste disponible partout pour former la kaolinite avec l'alumine. La kaolinisation a tout envahi : c'est le manteau kaolinique.

Ce paysage garni de son manteau est promis à l'aplanissement généralisé. Et c'est un aplanissement géochimique. Les hauteurs perdent toujours plus de matière que les bas-fonds ; l'intégrale de ces dissolutions différentielles incessantes sera la pénélaine géochimique équatoriale : vaste étendue forestière où chaque relief est promis à la dissolution. Mais que l'érosion reprenne par changement du niveau des rivières, et ce grand manteau va se trouver disséqué par le réseau chevelu des marigots de la forêt. Si le manteau est kaolinique, tous les marigots creusent sur place dans ce pays tendre : entre eux s'élève une population innombrable de collines hémisphériques. On parvient au paysage de style « demi-orange » que présentent au voyageur et à l'aviateur nombre de surfaces de la forêt équatoriale (fig. 5 B). Si le manteau est bauxitique, le paysage est armé par une cuirasse d'alumine ou cuirasse bauxitique, robuste et épaisse. La reprise de l'érosion va dégager ces dalles bauxitiques en buttes témoins isolées, couvertes d'un chapeau horizontal. Ces buttes bauxitiques deviendront les hauts lieux des divinités familières, puis des gisements d'aluminium... Ainsi, selon que l'intensité du lessivage et la nature des roches, granitiques ou basiques, auront opté pour le manteau kaolinique ou pour le manteau bauxitique, le paysage rajeuni par la tectonique optera, soit pour

la dissection en taupinières de l'ordre de l'hectomètre, soit pour le plateau bauxitique de l'ordre du kilomètre. Ces deux paysages sont, au fond des choses, le fruit d'une différenciation géochimique, entretenue par des migrations latérales de l'amont vers l'aval et par des accumulations de l'aval vers l'amont.

La géochimie façonne les paysages.

Quatre exemples ont été décrits pour montrer le rôle des actions proprement géochimiques dans les paysages. Nombre d'autres sont connus. Très généralement, les paysages montrent la trace de plusieurs histoires successives. Ils bénéficient ainsi d'un ou plusieurs héritages qui participent aux évolutions ultérieures, et l'analyse devient complexe. Si l'on s'en tient aux exemples décrits, qui sont assez frais pour être déchiffrés, on peut brosser une fresque générale sur le rôle de la géochimie dans la maturation des paysages. Un paysage ne doit plus être considéré comme livré à un seul type d'altération ou comme garni d'un seul type de sols. La règle générale est qu'un paysage est le cadre d'une succession ordonnée de sols et de types d'altérations. Dans un paysage, la succession ordonnée des altérations et des sols n'est pas fortuite ou morte. Chaque terme agit sur son voisin. Une différenciation naît, puis s'accuse. L'amont perd de la matière, l'aval en recueille tout ou partie. Le stock géochimique originel est ventilé d'une nouvelle manière dans le paysage. Par l'alternance des saisons humides et sèches, par la succession de transports et de piégeages, l'amont nourrit l'aval.

Mais à son tour, l'aval envahit l'amont, car le pouvoir transporteur de l'eau s'essouffle. Des particules se déposent, des produits précipitent. Chaque dépôt devient un obstacle pour ce qui le suit. La frontière du dépôt recule et remonte vers l'amont. Chaque accumulation est donc une invasion remontante de matière.

Ainsi, chaque versant, chaque paysage devient, au sens propre du mot, un système, c'est-à-dire une structure, dont chaque pièce agit sur les autres pour s'ajuster vers un nouvel équilibre. L'amont agit sur l'aval, l'aval sur l'amont, le climat sur les altérations, les altérations sur le climat interne au sol, le sol sur la végétation, la végétation sur le sol, etc. Nous nous initions au fonctionnement d'un système, qui fut appelé d'un terme heureux : le système biogéodynamique. Ces systèmes biogéodynamiques, dans un versant ou un paysage, ont des

Figure 5 A. Plus avant, vers le sud, les pluies tropicales soumettent les roches cristallines à un lessivage intense. Ici, une coupe simplifiée d'un paysage de la zone guinéenne, aux environs d'Ayamé en Côte-d'Ivoire. Sur cette colline de roches basiques, l'altération libère l'alumine. La silice évacuée est piégée sur le flanc du versant. Elle se combine à l'alumine pour donner la kaolinite. C'est ainsi que se forme, en ces contrées, le manteau à gibbsite ou kaolinite qui recouvre tout le paysage. (D'après J. Delvigne, 1965.)

Figure 5 B. Les pluies tropicales sont drainées par un réseau serré de marigots qui sculptent le paysage et son manteau d'altération en relief « demi-orange » de collines hémisphériques. Cette vue des environs d'Ayamé montre deux de ces collines. Leurs flancs sont déboisés et plantés de caféiers. Les sommets conservent les restes de la forêt dense équatoriale. (Cliché G. Millot.)

La lutte des pauvres de la steppe contre les nantis des vallées fertiles est l'histoire du passé. A présent, l'homme essaye d'aménager et d'utiliser au maximum le paysage auquel il appartient.

Pour en savoir plus :

Ouvrages généraux de géochimie de la surface :

- G. Millot, *Géologie des argiles*, Masson, 1964.
- A.I. Perelman, *Geochemistry of Epigenesis*, Plenum Press, 1967.
- C.J. Allègre, G. Michard, *Introduction à la géochimie*, PUF, 1973.

Géochimie et paysages tropicaux :

- Y. Tardy, « Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique », *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, Strasbourg, 37, 199 p., 1969.
- H. Paquet, « Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées », *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, Strasbourg, 30, 210 p., 1970.
- G. Grandin, « Aplanissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest », *Mém. ORSTOM*, 1973 (sous presse).
- J.J. Trescases, « L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale et la formation des gisements nickélicifères en Nouvelle-Calédonie », *Mém. ORSTOM*, 78, 259 p., 1975.
- G. Bocquier, G. Millot, A. Ruellan, « Différenciation pédologique et géochimique dans des paysages africains, tropicaux et méditerranéens. La pédogénèse latérale remontante », *Xth Intern. Congr. Soil Sci.*, Moscou, 1974, VI-1, p. 226-233.

propriétés d'autodéveloppement. Inlassablement, même sans changement de climat, de relief ou d'érosion, les mêmes mécanismes poursuivront leur effet d'une manière têtue, en nourrissant l'aval qui envahira l'amont. Et cela jusqu'à épuisement des différences de potentiel : aplanissement des modelés, matière pratiquement redistribuée...

De l'équateur humide à la zone désertique se développe ainsi dans l'espace une série de systèmes biogéodynamiques. On peut énumérer les types d'accumulation successifs : gibbsite ou kaolinite en pays équatorial, cuirasses ferrugineuses dans les pays tropicaux humides, montmorillonite dans les plaines tropicales sèches, croûtes calcaires en zone semi-aride, enfin accumulations salines dans les bas-fonds évaporatoires sans écoulement. Chaque étape de cette succession de paysages comporte ses minéraux et, en particulier, les minéraux argileux qui sont en équilibre avec chaque milieu d'accumulation. Et chaque étape de cette succession de paysages est le fruit de différenciations géochimiques et biologiques agencées en système. Les variations des climats, des reliefs, du trajet des cours d'eau vont perturber gravement ces systèmes par intervention de l'érosion.

Reconstituer ces bouleversements, c'est faire l'histoire d'un paysage au long des millénaires et des millions d'années. Et cela est difficile. Disons seulement qu'un climat plus humide va tendre à effacer le passé, car les dissolutions sont sans appel. Un climat plus aride va tendre à « momifier » le passé, quitte à le retoucher, mais il reste le plus souvent reconnaissable. L'érosion va tendre à mettre les accumulations dures ou denses en relief. Elle va tendre à disperser les produits poreux ou meubles. De cette façon, l'érosion et le façonnement des reliefs sont guidés par la différenciation géochimique, soit que les vieux reliefs soient confirmés (bauxites), soit que les vieux reliefs soient inversés (cuirasses ferrugineuses).

Ces paysages sont le lieu de la vie des hommes.

En forêt équatoriale, l'eau abonde, mais les sols sont si lessivés qu'ils sont pauvres en bases, indispensables à la culture. Ces bases ne subsistent que dans la litière des feuilles accumulées au sol. Le paysan de la forêt, privé d'engrais, doit sauter d'un défrichement à l'autre pour réussir. De plus, ni bétail, ni animal de trait ne survit aux parasites forestiers. Tout doit être porté sur la tête des hommes... et des

femmes. L'habitat est clairsemé, les circulations difficiles. Les civilisations, les langues et les croyances sont pulvérisées dans le paysage.

En zone tropicale, l'eau se fait plus rare. Il faut gagner les rivières permanentes ou creuser des puits. Les sols sont meilleurs, mais la cuirasse ferrugineuse les rend stériles, quand elle vient au jour. La culture se réfugie dans les vallées ou se hâte sur les plateaux, dès la sortie de la saison humide. La circulation des hommes est meilleure. Des empires ou des royaumes ont pu se construire, souvent fédérés par les pasteurs aguerris, venus du nord.

En zone tropicale sèche, sahélienne ou steppique, l'obtention de l'eau exige des travaux : puits profonds ou galeries drainantes. Les plaines à montmorillonite sont si imperméables qu'elles s'engorgent pendant les pluies, mais coupent l'alimentation des nappes souterraines. Les sols sont riches, mais ne peuvent être fertilisés que par l'irrigation toujours coûteuse. C'est la zone des pasteurs, de parcours des troupeaux, de la circulation des hommes et des idées. C'est dans la zone steppique que sont nés les grandes langues déclinées, les grandes religions et les grands conquérants.

En zone aride, les lieux habités deviennent rares. Le grand nomadisme est de règle, du pâturage à l'oasis. L'homme, qui se signifie par la taille de son troupeau, guette la steppe du haut de sa monture, chameau ou cheval. Il espère y trouver, par une razzia heureuse, un butin de complément et les serviteurs nécessaires. Il tend surtout à venir se fixer à son tour aux dépens des sédentaires.

L'homme appartient donc lui aussi aux systèmes biogéodynamiques. Le paysage où il est né en fait un errant aux larges horizons, ou un paisible laboureur. Ce n'est pas seulement dans les formes du terrain que l'homme s'intègre, mais dans sa « chimie », qui commande et ordonne la vie. Une partie de l'histoire de nos civilisations, et cela jusqu'à nos jours, est celle de la lutte des aguerris et des pauvres de la steppe contre les nantis des vallées verdoyantes. Cela concerne le passé. Pour l'avenir, au fur et à mesure que les hommes seront contraints de demeurer sur place, les mêmes facteurs devront présider à l'utilisation, l'aménagement et, déjà, la préservation des paysages. Et ce n'est que si nous avons bien compris les équilibres biogéodynamiques, eau, transports mécaniques, migrations chimiques et biologique, que nous saurons, sans les endommager, tirer le meilleur parti des paysages, au service des hommes. ■