Compréhension des faciès des sols du secteur Sud – Ouest Ankatafa

Les faciès des sols résultent des effets consécutifs mais juxtaposés des mécanismes géologiques mécaniques, physiques et chimiques dont l'agent actif est l'eau qui altèrent d'abord la roche mère et ensuite ses propres produits successifs. Ce processus fait avancer le front pédologique toujours vers le bas.

Identification d'une évolution latérale des faciès des sols

Le profil pédologique établi suivant les faciès observés dans chacun des puits d'exploration est toujours tronqué par rapport au profil pédologique complet. Toutefois, et au travers des profils des puits d'exploration, une évolution latérale partant des espaces d'altitude relativement basse vers les espaces de plus hautes altitude ressort. A ce titre, les trois profils (*figure 23, 24-a, 24-b*) suivants sont proposés pour illustrer.



- Profil 13 suivant Y = 8 470 800 (réf. : *figure 18* en **page 34**)

Figure 23: Coupe des faciès des sols d'après les observations faites dans les puits d'exploration suivant le profil 13 des puits d'exploration le plus au Sud

Dans la suite de cette section, les saprolites qui sont bien développés au bas de chaque profil pédologique ne seront pas tenues en compte. Le profil 13 montre une récurrence de faciès allant des latérites de transition (latérite jaune et latérite tachetée) minces vers des hauts de profils avec un net développement de la latérite mature (latérite rouge et latérite à concrétions ferrugineuses). Les espaces à relatives basses altitudes ont une possibilité en sols indifférenciés à racines et radicelles.

Le profil 13 laisse entrevoir une évolution latérale estompée Est – Ouest des faciès des sols. En effet, des puits à l'Ouest (BTPIT1122) au puits BTPIT1128, il y a une évolution latérale oblitérée avec la succession des faciès suivants : latérite jaune, latérite tachetée, latérite rouge et latérite à concrétions ferrugineuses. La même évolution latérale oblitérée est notée du puits BTPIT1135 (le plus à l'Est) vers l'Ouest jusqu'au puits BTPIT1131. Par ailleurs, ces deux évolutions sont symétriques par rapport aux altitudes les plus élevées du profil. Sur le profil 13,

les faciès les plus matures sont bien développés et ce développement est d'autant plus souligné aux espaces en hautes altitudes relatives.



Figure 24- a: *Coupe des faciès des sols suivant le profil 4 des puits d'exploration au sein de la zone d'étude*



Figure 24- b: Coupe des faciès des sols suivant le profil 1 des puits d'exploration au sein de la zone d'étude

Malgré un développement relatif de la latérite à concrétions ferrugineuses aux hauts des profils pédologiques du profil 4, il est remarquable de noter le grand développement de la latérite tachetée qui, avec la latérite jaune, deviennent les faciès dominants des sols observés dans les puits d'exploration du profil 1 (le plus au Nord). La variation latérale des faciès est de l'Est vers l'Ouest : la latérite jaune (à l'extrême Est du profil) passe latéralement à la latérite tachetée puis à la latérite ferrugineuse à l'extrême Ouest du profil.

Variation latérale du Sud vers le Nord des faciès des sols

Toujours sur la base des trois profils précédents, il est à noter que

 sur le profil 13 (le plus au Sud du secteur SW Ankatafa), les profils pédologiques sont mieux fournis en faciès des sols. Les sols matures tels que la latérite rouge y sont très développés et la latérite à concrétions ferrugineuses occupe quasiment tous les hauts des profils pédologiques. La latérite de transition (latérite tachetée et latérite jaune) n'est que ponctuelle ;

- sur le profil 4 (vers le milieu du secteur) la latérite de transition avec la latérite tachetée est très développée sous la latérite à concrétion ferrugineuse qui reste affleurant ;
- sur le profil 1 (le plus au Nord du secteur) la latérite à concrétions ferrugineuses n'affleure que ponctuellement. La latérite tachetée est très développée sur toute la partie Ouest du profil où elle affleure largement. La latérite jaune affleure largement sur la partie Est du profil 1.

Une variation latérale vers le Nord fait que les faciès matures du Sud font quasiment place aux faciès de transition sur le rebord Nord du secteur SW Ankatafa.

La coloration des sols du secteur

Les roches filoniennes magmatiques de la Caldeira d'Ampasibitika sont potassiques. Au niveau de la latérite de transition, la latérite tachetée est bien développée. Dans ces conditions, la nodulation à l'origine des taches serait l'enrichissement local en alumine qui aurait donc été lessivé et remobilisé. Logiquement alors, les concrétions des faciès matures et surtout de lessivage devraient être du type gibbsite. Dans le cas présent, les nodules des sols matures sont plutôt de nature ferrugineuse pour former la latérite à concrétions ferrugineuses ayant à la base une latérite rouge dont la coloration est due à la stabilité de l'hématite. Les termes magmatiques filoniens de la Caldeira d'Ampasibitika (les syénites du filon annulaire et des filons sécants, les granites hyperalcalins dont la fasibitikite) ont l'aegyrine (pyroxène : NaFe³⁺Sio₂O₆) et la riebeckite (amphibole : Na₂ [Fe²⁺, Mg²⁺]₃ 2(Fe³⁺) Si₈O₂₂[OH]₂) comme minéraux constituants de leur phase pétrogénétique et de leur phase liquide résiduelle. Suivant la série réactionnelle de Bowen et de leur indice d'altérabilité (Ia) compris entre 12,5 et 20 (moyenne de 16,3) (Martin, 2010) opposé aux feldspaths potassiques (3,3), les minéraux mafiques sont facilement altérés par rapport aux feldspaths. Malgré le fait que les syénites et les granites soient essentiellement feldspathiques, la grande sensibilité à l'altération de l'aegyrine et de la riebeckite explique l'évolution verticale de la couleur des sols :

- des faciès de transition : jaune à la base due à une première stabilité de la goethite puis tachetée par la nodulation du fer ferrique toujours véhiculé par la goethite
- des faciès matures : rouge à la base due à la transformation de la goethite en hématite puis à concrétions ferrugineuses en raison du lessivage et donc de la nodulation par agglutination de la goethite.

7.4. Hydrophobie du mécanisme pédologique

De la base vers la surface, les faciès des sols perdent progressivement de leurs épaisseurs. Les altérites ne sont que ponctuelles. La latérite jaune est rare et elle n'est bien exprimée que sur une toute petite portion du filon annulaire de syénite. Les saprolites ainsi que les roches fracturées sont très développées. En rappelant qu'un faciès f_1 est plus mature par rapport à un autre faciès f_2 qui lui est sous-jacent car f_1 a d'abord été f_2 pour subir les actions altérantes de l'eau au cours de la formation de l'actuel f_2 .

La formation des concentrations supergènes comme la cuirasse, croûte ou carapace ferrugineuse ou bauxitique ne peut se faire que si

- d'abord les eaux d'infiltration sont agressives car elles sont abondantes et suffisamment chargées des composés chimiques organiques et / ou minéraux qui provoquent les réactions chimiques de déstabilisation et de lessivage des minéraux des roches ainsi – que ceux des faciès antérieurs des sols qu'elles ont produits ;

- ensuite, l'intensité de l'évaporation permet la remontée vers la surface des eaux chargées des cations et des autres éléments chimiques dissouts.

Dans les cas des sols du secteur Sud-Ouest Ankatafa, aucune concentration supergène n'est rencontrée. Il y a plutôt une nodulation du fer. Ce fait ne peut s'expliquer également que par la faible agressivité des eaux ne permettant pas un intense lessivage mais plutôt une dessiccation des sols.

Si l'eau est agressive, elle est capable de « retravailler » plus intensément et sur une plus grande puissance les faciès antérieurs pour en faire de nouveaux moins matures sus-jacents. Ces faits expliquent :

- le fait que l'évolution des faciès vers la maturité aux hauts des profils pédologiques se fait avec un amincissement en continu ;
- la formation de nodules ferrugineuses (concrétions) mais non de concentrations supergènes;
- le grand développement des saprolites et des roches fracturées.

Tous ces caractères des sols et leur évolution verticale seraient très probablement dus au caractère communément défini comme étant l'hydrophobie du mécanisme pédologique. Il s'agit d'une situation de déficience de la circulation des eaux. Dans une plus large globalité et au niveau de toute l'intrusion d'Ambohimirahavavy, ces raisons expliqueraient également la minceur des sols de recouvrement ne permettant qu'un puits moyen d'exploration de 6,5 mètres. Les mêmes raisons que précédemment exposées expliquent les variations latérales des faciès des sols :

- la variation latérale (à comprendre suivant les profils orientés Est Ouest des puits d'exploration) : une symétrie de l'évolution des faciès des sols est relevée par rapport aux espaces d'altitudes élevées de façon à ce que les faciès les plus immatures se trouvent dans les strates inférieures des profils les plus éloignés de la zone en haute altitude et les faciès les plus immatures se trouvent affleurants dans la zone en haute altitude et que les faciès matures n'y sont pas présents du fait qu'en altitude les eaux ruissellent mieux qu'elles ne s'infiltrent et le temps d'exposition y est court ainsi que la profondeur de pénétration ; la faible puissance exposée est prise et reprise par les eaux qui n'ont pas la capacité suffisante pour pénétrer en deçà de l'espace qu'elles ont déjà acquis ;
- les explications précédentes sont valables pour comprendre la variation latérale des faciès des sols allant de grand développement des faciès les plus matures au Sud tandis

 que vers le Nord il y a un relatif développement des faciès les plus immatures. Il faut toutefois ajouter au raisonnement précédent le fait que la bordure Nord du secteur SW Ankatafa est très pointu opposé aux espaces proches Nord, centre et Sud qui sont à morphologie moutonnée. L'écoulement des eaux dans le Nord du secteur est alors très fort et n'autorise qu'une très faible infiltration ne permettant pas l'évolution des faciès des sols par rapport aux autres espaces vers le Sud où l'infiltration s'améliore en allant vers le Sud qui est à moyenne et à basse altitudes.

7.5. Compléments d'informations par les coupes pédologiques

Toutes les observations des faciès des sols des puits et récapitulées sur des coupes des faciès le long des profils confirment et contredisent les informations de la cartographie géologique de surface. En effet, il est conçu que le filon annulaire vertical des syénites qui forme le pourtour de la Caldeira est un filon unique. Les observations des faciès des sols traversés par les puits d'exploration montrent que le filon de bordure est formé d'un réseau de filons sub - verticaux en stockwerks (observations sur les carottes de sondage) au sein des formations de l'encaissant sédimentaire. Ce réseau de filons est bien localisé dans les limites de ce que la cartographie de surface propose pour être le filon annulaire vertical des syénites. Ce fait s'explique assez bien par le fait que lors de l'effondrement du toit de la chambre magmatique, les formations géologiques ne se sont pas effondrées en un volume unique laissant une grosse espace vide entre les matériaux effondrés et les matériaux laissés sur place. Elles seraient plutôt effondrées en de gros volumes fragilisés : les matériaux aux bordures auraient été confrontés à la résistance de ceux qui restaient en place et auraient été beaucoup plus déchiquetés. Le liquide qui remonterait par compression : la masse effondrée comprimerait plus l'intérieur et chasserait le liquide vers les bordures en empruntant les multiples fracturations pour former un réseau filonien vertical plutôt qu'une colonne compacte de liquide.

Les résultats positifs du dosage des terres rares des sols autant sur le filon annulaire de bordure qu'à l'intérieur et à l'extérieur de la Caldeira confirment les configurations observées sur les échantillons de roches saines des carottes de sondage ainsi qu'en de rares affleurements comme à Ampasibitika : les filons de fasibitikite minéralisés en terres rares sont de très faibles puissances (millimétriques à décimétriques, plus communément pluricentimétriques et rarement pluridécimétriques). Leurs formes d'altération dans les faciès des sols dérivés de l'altération des roches encaissantes sédimentaires ont été assimilées par ces derniers et elles n'ont pas été perceptibles aux descriptions macroscopiques.

Les coupes des faciès des sols établis suivant les profils 11 et 7 (*figure 25-a* et **25-b**) offrent des figures qui ne peuvent être expliquées que par l'existence de failles antérieures à la pédogenèse, très probablement verticales et actuellement cicatrisées et assimilées par les sols. Ces failles auraient conféré une structure en touches de piano (succession de horsts et de grabens) du secteur Sud-Ouest Ankatafa.



Figure 25- a: Coupe des faciès des sols suivant le profil 11 des puits d'exploration au sein du secteur Sud – Ouest Ankatafa.



Figure 25- b: Coupe des faciès des sols suivant le profil 7 des puits d'exploration au sein du secteur Sud – Ouest Ankatafa. A remarquer que la légende relative aux faciès des sols est la même que pour les coupes présentées précédemment..

Chapitre 8: Les éléments des terres rares et les éléments accompagnateurs

8.1. Comportements comparés des éléments chimiques étudiés

Durant la différenciation magmatique par la cristallisation fractionnée, les lanthanides et les actinides ainsi-que les métaux rares ont un comportement similaire. Ces éléments ont une forte affinité à la phase liquide. Cette affinité est due à leur potentiel ionique. Ils appartiennent aux éléments à forte charge (HSFE = high strengh field elements) ; leur forte charge ne les autorisant pas à accéder dans les phases minérales précoces. Ils ont alors une affinité magmatique aux roches dérivées des liquides évolués. De surcroit, les lanthanides et les actinides forment des complexes stables avec le liquide magmatique et ils sont dits hygromagmatophiles et ils ont donc une affinité marquée pour le liquide tardi-magmatique.

Le diagramme r = f(Z) de Goldschmidt (r étant le rayon ionique et Z la charge de l'atome) permet de classifier les éléments chimiques selon leur aptitude à être solubles dans l'eau météorique. La *figure 26* est une adaptation par TREM dudit diagramme :

- les ETRs sont projetés dans le domaine des cations insolubles (les précipitants). Ils sont répulsifs à la molécule d'eau et précipitent sur place pour être adsorbées par les phyllosilicates après avoir libéré leur site dans l'édifice cristallin de la roche mère ;
- U et Th sont solubles ;
- Nb et Ta sont projetés dans le domaine des oxyanions solubles (anions de composés oxydés).



Figure 26: Projection de certains cations sur le diagramme de Goldschmidt. (Goldschmidt (1934, 1935), adapté par TREM))

Ce caractère de solubilité détermine alors l'emplacement de chaque espèce ionique dans le sol. C'est aussi la cause qui contrôle leur agglutination dans les faciès peu évolués des sols où les nouveaux minéraux argileux se forment

8.2. Relations comportementales des éléments chimiques

Les teneurs en les éléments Ta, Th et U sont tellement faibles et disproportionnées par rapport à celles de l'oxyde total des terres rares (OTTR) et celles du Nb pour qu'il soit possible d'élaborer des diagrammes de corrélations lisibles. Aussi, et pour y pallier, a - t - il été appliqué un facteur d'amplification de x10. Rappelons que vis-à-vis de leur solubilité dans l'eau qui est l'agent de la pédogenèse, les éléments chimiques considérés ont deux comportements différents :

- les terres rares sont insolubles par l'eau ;
- le Nb, le Ta, le Th et l'U sont tous solubles dans l'eau.

Sur le plan de la rétention par les structures des sols néoformés, les ETRs sont essentiellement retenus et les autres cations sont essentiellement remobilisés. Aussi est-il important de voir comment se comportent les deux groupes des éléments chimiques. Pour ce faire, il est proposé ici de confronter les quatre éléments chimiques mobiles aux ETRs immobiles.

Les diagrammes de la *figure 27* montrent que, contrairement à ce qu'on est en droit d'attendre, il y a une nette corrélation positive entre les ETRs immobiles et les autres éléments chimiques qui sont censés être lessivés : géométriquement, les valeurs des concentrations des éléments chimiques mobiles augmentent avec celles des ETRs. En d'autres termes, les éléments chimiques semblent se comporter d'une manière similaire malgré leurs réactions devant être différentes en rapport à l'agent d'altération. Les faits suivants sont relevés :

- dans les sols à racines et radicelles et dans les sols matures (latérite rouge et latérite à concrétions ferrugineuses) : la teneur des quatre éléments chimiques (Nb, Ta, Th et U) augmente indifféremment d'une manière assez désordonnée quand les teneurs en ETRs restent projetées près de l'origine des axes et ce comportement est plus net dans les sols matures. Une timide corrélation peut toutefois être notée ;
- dans la latérite de transition (latérite jaune et latérite tachetée), les teneurs des ETRs semblent sensiblement mieux étalées avec une augmentation relative des teneurs en trois (Nb, Ta et U) des quatre autres éléments chimiques. La teneur de Th reste faible dans les latérites de transition. Une corrélation positive est notée ;
- un sensible étalement des teneurs de tous les éléments chimiques y est observé avec également une corrélation positive pas très nette ;
- dans les roches, les teneurs des ETRs sont projetées dans le voisinage de l'origine des axes quand celles d'autres éléments chimiques augmentent nettement.





Figure 27: Diagrammes montrant les corrélations positives entre les éléments chimiques des terres rares insolubles et les éléments chimiques solubles (Nb, Ta, Th et U)



Figure 28: Diagrammes montrant la même corrélation positive que dans les sols dérivés entre les éléments chimiques des terres rares et les autres éléments chimiques considérés par cette étude (Nb, Ta, Th et U)

OTTR

E. A.

0

| Moyennes des concentrations (ppm) dans les sols du secteur SW Ankatafa | | | | | |
|---|-------|-----------|-----------|----------|------------------|
| | OTTR | Nb_2O_5 | Ta_2O_5 | U_3O_8 | ThO ₂ |
| Max | 3 305 | 1 029 | 59 | 246 | 313 |
| Min | 11 | 9 | 1 | 1 | 2 |
| Moyenne | 418 | 280 | 15 | 9 | 44 |
| Moyennes des concentrations (ppm) dans les carottes de sondage d'Ampasibitika | | | | | |
| Moyenne | 605 | 262 | 17 | 14 | 65 |
| KD | 0,69 | 1,07 | 0,91 | 0,69 | 0,68 |

Tableau 4: Comparaison des moyennes des concentrations dans la roche source et dans les sols dérivés

 $K_{\overline{\mathbf{D}}}$ coefficient de partage = moyenne des concentrations dans les sols dérivés sur moyenne des concentrations des roches sources

Pendant deux campagnes, TREM a investi les possibilités de la minéralisation primaire. La moyenne des concentrations des terres rares dans les échantillons des carottes de sondage est de 605 ppm. Cette valeur peut être considérée comme fiable si on tient compte du grand nombre d'échantillons dosés pour son calcul. Si on considère que les fasibitikites altérées et qui auraient libéré les cations pour être piégés dans les feuillets des sols néoformés seraient la source des éléments chimiques de ces derniers, il est donc possible de calculer le coefficient de partage entre la source magmatique et les sols dérivés.

Les diagrammes de la *figure 28* montrent que la corrélation positive entre les ETRs et les quatre autres éléments chimiques accompagnateurs est d'origine magmatique. La corrélation est très nette et sans ambiguïté opposée à la corrélation positive plus timide entre les ETRs et les mêmes éléments chimiques dans les sols. Lors de et suite à la pédogenèse, les coefficients de partage des différents cations montrent qu'ils ont été largement transférés vers les sols néoformés (*tableau 4*). La préservation de la corrélation positive magmatique dans les corrélations des teneurs des éléments chimiques des sols, quoique les allures ont nettement été corrigées vers une tendance à une évolution croissante des teneurs en Nb, Ta, Th et U pour une quasi-indifférence des teneurs en ETRs, est le reflet de et confirme l'hydrophobie suggérée à la section **7.4-** du *chapitre 7* de cette étude. L'eau manque d'agressivité pour mieux lessiver les cations solubles qui ne peuvent que rester dans les sols néoformés.

Toutefois, les profils verticaux des teneurs des éléments chimiques montrent que, malgré la corrélation positive constatée précédemment, les éléments chimiques se comportent différemment. A titre d'illustration, il est proposé les profils des puits d'exploration 13 (*figure 29*) le plus au Sud du secteur SW Ankatafa (Y = 8470800) et 7 (Y = 8471100) vers le milieu du secteur (*figure 30*). Sur les deux profils, il a été choisi les profils des teneurs mettant en opposition les ETRs et Nb ainsi que les ETRs et U. Sur les deux profils, les teneurs dans les sols des ETRs sont bien exprimées au niveau des saprolites (vers le toit) tandis – que celles autant de Nb que de U, elles sont mieux concentrées vers les sols matures notamment la latérite à concrétions ferrugineuses. U est parfois mieux exprimé à la base des sols mature tandis-que Nb vers le haut.



Figure 29: Distribution verticale des éléments chimiques le long des profils pédologiques du profil 13 des puits d'exploration



Figure 30: Distribution verticale des éléments chimiques le long des profils pédologiques du profil 7 des puits d'exploration

Ces tendances citées sont mieux exprimées par l'usage des moyennes des teneurs des éléments chimiques (*figure 31*).

Comportement des moyennes de Nb₂O₅ et de TR₂O₃ des différents faciès des sols



Figure 31: Comportements des moyennes des teneurs des ETRs et celles du Nb₂O₅ des sols du secteur Sud-Ouest Ankatafa

Sur le diagramme de la *figure 31*, il apparait clairement que les ETRs ne sont pas fortement lessivés : leurs teneurs sont maximales au niveau des altérites et vont en décroissant vers le haut du profil pédologique. Leur immobilité fait que les actions superposées de l'eau sur le même faciès ne stimulent pas trop leur remobilisation. Au contraire, le Nb est mieux lessivé et est concentré dans les faciès matures. Cette tendance à être plus concentré vers le haut des profils pédologiques est encore plus nette pour l'uranium.