Comparaison des résultats analytiques obtenus après fusion alcaline au métaborate avec ceux obtenus après fusion alcaline au tétraborate dans les niveaux d'altération des grès de l'Inkisi (secteur de Brazzaville, République du Congo) : applications dans l'étude des profils d'altération

Jean-Didier Sounga, Helene Miche, Yves Noack, Pascal Affaton, Fidèle Mialoundama

▶ **To cite this version:**

Jean-Didier Sounga, Helene Miche, Yves Noack, Pascal Affaton, Fidèle Mialoundama. Comparaison des résultats analytiques obtenus après fusion alcaline au métaborate avec ceux obtenus après fusion alcaline au tétraborate dans les niveaux d'altération des grès de l'Inkisi (secteur de Brazzaville, République du Congo) : applications dans l'étude des profils d'altération. Africa Geoscience Review, 2012, 19 (3), pp.151-168. hal-01230119

HAL Id: hal-01230119
https://hal.science/hal-01230119

Submitted on 13 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Comparaison des résultats analytiques obtenus après fusion alcaline au metaborate avec ceux obtenus après fusion alcaline au tetraborate dans les niveaux d'altération des grès de l'Inkisi (Secteur de Brazzaville, République du Congo). Applications dans l'étude des profils d'altération.

Jean-Didier SOUNGA (1), **Hélène MICHE** (2), **Yves NOACK** (2), **Pascal AFFATON** (2), **Fidèle MIALOUNDAMA** (1)

(1) **Université Marien Ngouabi, Faculté des Sciences et Techniques, BP 69, Brazzaville, Congo**

(2) **Aix-marseille Université, CNRS, CEREGE, UM 34 - BP 80, 13545 Aix en Provence cedex 4, France**

Jean-Didier Sounga : soungaj@yahoo.fr

Hélène Miche : miche@cerege.fr

Yves Noack : noack@cerege.fr

Pascal Affaton : affaton@cerege.fr

Fidèle Mialoundama : mialoundamaf@yahoo.fr

RESUME

Les résultats analytiques obtenus en ICP-AES après fusion alcaline au métaborate de lithium sont comparés à ceux obtenus après fusion alcaline au tétraborate de lithium sur un profil d'altération des grès de l'Inkisi (Sud de Brazzaville, Congo). Les teneurs obtenues montrent des différences parfois importantes, notamment dans les niveaux supérieurs de l'altération. Ces différences sont, soit positives, soit négatives. Elles varient selon l'élément chimique analysé. Certains éléments chimiques, comme l'aluminium, présentent des différences très faibles attribuables à la précision des analyses; pour d'autres, par contre, comme le silicium, elles sont importantes et fluctuantes. Nous avons conçu un coefficient Ki de la manière suivante :

$$Ki\,(\%) = 100 * ((oxyde_i\,(tf) - oxyde_i\,(mf)) / oxyde_i\,(mf))$$

(tf : résultat obtenu après fusion alcaline au tétraborate et mf : résultat obtenu après fusion alcaline au métaborate, pour un oxyde i analysé).

Les courbes de variation du Ki en fonction de la profondeur, établies de la base au sommet du profil d'altération permettent de localiser les niveaux plus fusibles au tétraborate (Ki positif) et les niveaux plus fusibles au métaborate (Ki négatif).

En comparant ces courbes avec l'évolution minéralogique au cours de l'altération, montrée par les diagrammes rayons X, nous avons obtenu les résultats suivants :

-les variations des courbes du Ki du sodium et du potassium ont pu être corrélées, respectivement, avec les niveaux d'altération de l'albite et ceux d'altération des feldspaths potassiques.

-les variations des courbes du Ki du silicium ont pu être corrélées avec la nature des minéraux secondaires apparaissant successivement le long du profil d'altération.

Ainsi l'utilisation du coefficient Ki, tel que nous l'avons déterminé, peut contribuer, en appui avec d'autres méthodes comme la diffraction RX, à l'étude des processus d'altération

ABSTRACT

We have compared the analytical results obtained by ICP-AES after alkali fusion with lithium metaborate and with lithium tetraborate in the analysis of samples from an arkosic sandstone from « Inkisi » (Congo, Central of Africa) along a weathering profile. The observation of some differences of behaviour of the two fluxes at the upper levels has conduce us to assume that this differences was in relationship with the degree of weathering process on potassic feldspars and sodic feldspars (albite) contained in those sandstones. In order to locate easily the weathering front on the weathering profile we have defined a coefficient of variation K_i :

$$K_i\,(\%) = 100 * ((\text{oxide}_i\,(tf) - \text{oxide}_i\,(mf)) / \text{oxide}_i\,(mf))$$

(with **tf** : result obtained after tetraborate alkaline fusion and **mf** : result obtained after metaborate alkaline fusion for the i oxide analyzed).

The study of the Ki curves obtained for three chemical elements (K, Na, Si) typical of alteration of sandstones in function of the depth permits to show that the variations of the Ki curves was able to locate precisely the alteration levels of the different minerals. So, sodium from albite is the first released at a quite deep level of the profile. It is followed by the potassium from potassic feldspars. We have also showed that, according to the positive or negative sign positive of Ki variations, the chemical element released will integrate more or less refractory mineral structures. All of those results have been confirmed by the study of the X-ray diagrams of the same weathering profile. So, in case of arkosic sandstone our method would permit to locate with precision the weathering front on the profile. This method might be used for the study of other kind of rocks.

Mots clés : altération, grès, Inkisi, géochimie, Congo, métaborate, tétraborate

Keywords: weathering, sandstone, Inkisi, geochemistry, Congo, metaborate, tetraborate

INTRODUCTION

Les recherches sur les altérations des roches sont essentiellement menées suivant une approche géochimique (Millot et Bonifas, 1955 ; Keller, 1962 ; Sounga, 1982 ; Noack, 1985 ; Nahon, 1991 ; White et al, 2001; Wilson, 2004). Cette approche consiste à comparer les compositions chimiques des différents niveaux du profil d'altération. Elle s'appuie donc sur les résultats des analyses chimiques des différents échantillons prélevés. Ces analyses nécessitent une fusion des échantillons solides car elles s'effectuent sur des solutions. A cet effet, deux méthodes de fusion alcaline sont essentiellement utilisées: par tétraborate de lithium ou par métaborate de lithium.

En analysant les différents niveaux des profils d'altération des grès de l'Inkisi, formation située au sud de Brazzaville (Congo), nous avons constaté que ces deux méthodes de fusion aboutissent à des résultats analytiques différents. En effet, pour la plupart des éléments chimiques, les teneurs obtenues après fusion alcaline des échantillons au tétraborate sont différentes de celles obtenues après fusion alcaline au métaborate.

Dans un premier temps nous avons pensé que ces différences étaient dues à un broyage insuffisant des échantillons. Mais après un broyage plus prolongé, ces différences ont persisté.

Le principal objectif de ce travail est d'interpréter ces différences quantitatives constatées entre les deux méthodes de fusion alcaline, en établissant des corrélations éventuelles avec les processus d'altération de ces roches, notamment avec les évolutions minéralogiques.

CADRE DE L'ETUDE

La zone de l'étude est localisée au sud de Brazzaville, capitale de la République du Congo (Figure 1). Le profil d'altération analysé se situe sur le site 1. Ses coordonnées GPS sont:

Latitude	Longitude	Altitude
S 04° 18,461'	E 015° 13,683'	246 m

Du point de vue pétrographique, la roche mère du profil d'altération est un grès arkosique constitué, selon la méthode de comptage de points, de grains de quartz (68 à 78 %), de feldspaths, essentiellement de microcline (18 à 30 %), de fragments lithiques principalement quartzitiques (2 à 12%). A cela s'ajoutent des paillettes de micas, notamment de muscovite (2 à 5%). Le ciment est ferrugineux (hématite) et argileux (illite, smectite, chlorite). La texture générale est jointive.

Du point de vue géologique, cette roche mère fait partie de la "formation de l'Inkisi", ensemble géologique d'age protérozoïque (Dadet, 1969) qui affleure largement en Afrique centrale, sur une aire s'étendant du Congo en Angola.

La zone d'étude est soumise à un climat de type bas-congolais (Samba-Kimbata, 1978) caractérisé par :

- une température élevée oscillant autour de 25°C, relativement constante toute l'année, avec un léger pic en avril (26,7°C) et un fléchissement en juillet (21,9°C);
- une pluviométrie annuelle importante (près de 1400 mm en moyenne), concentrée sur une saison très pluvieuse continue de 8 mois, d'octobre à mai, avec des pics mensuels de plus de 200 mm en moyenne, en avril et en novembre et un fléchissement en février (126 mm). Cette longue saison pluvieuse contraste fortement avec la saison sèche très marquée de 4 mois (de juin à septembre), avec une pluviométrie pouvant descendre à 0 mm.

De telles conditions climatiques favorisent une altération géochimique intense de type ferrallitique (Chatelin, 1974).

La végétation est une savane arbustive peu dense, à tapis herbacé bas, clairsemé, à cycle végétatif court.

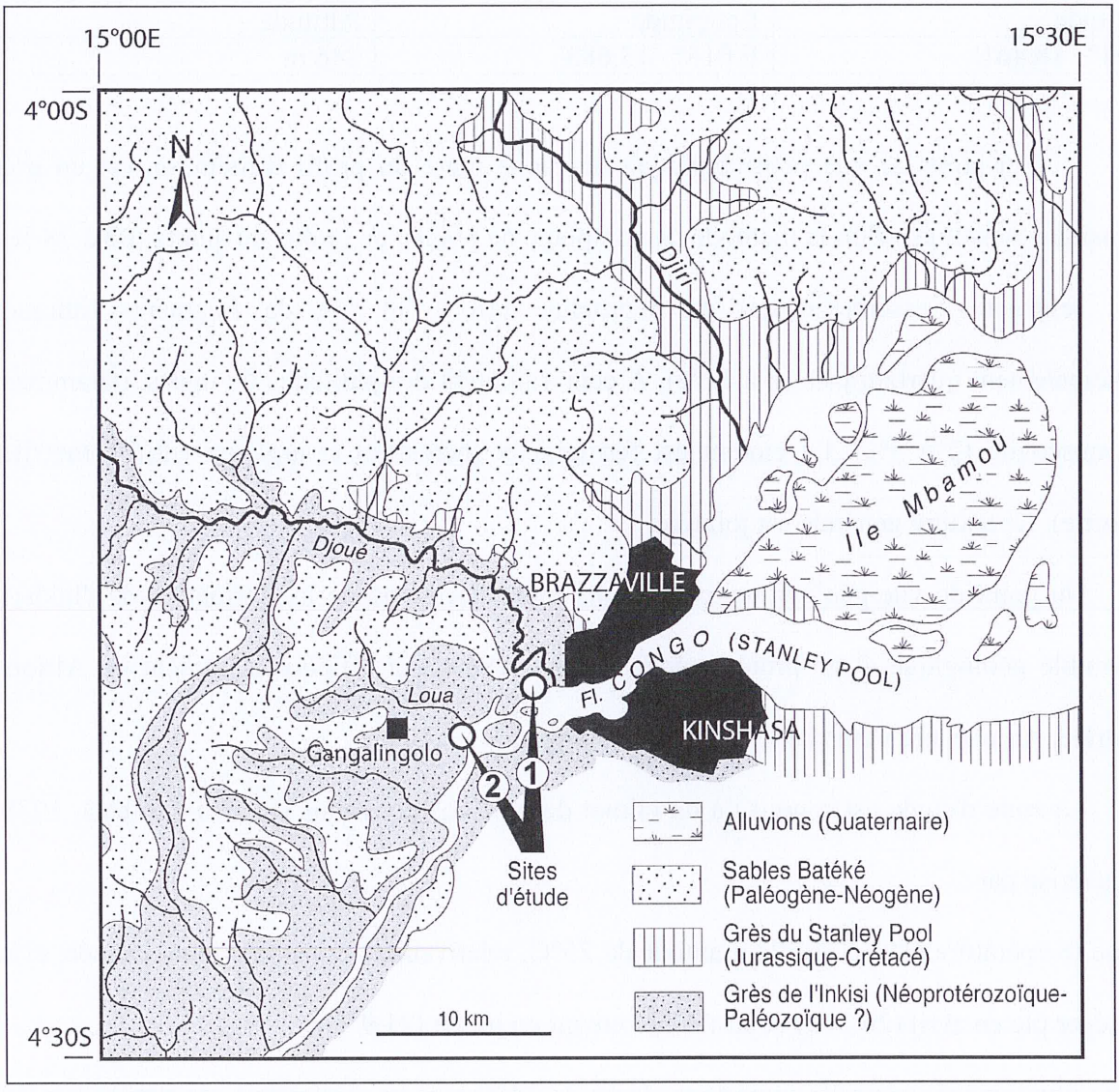

Figure 1: Situation géographique et environnement géologique de la zone d'étude (complétée à partir de la carte de Dadet ,1969).

METHODOLOGIE

- Etude de terrain

Après avoir effectué une étude pédologique de reconnaissance de la zone d'étude, nous avons retenu, sur le site 1, un profil type d'altération sur lequel se sont focalisés nos travaux. La description du profil a été réalisée de la base au sommet selon la méthodologie classique (Baize, 1990) comportant les étapes suivantes : rafraîchissement du profil, distinction des différents horizons, description horizon par horizon en commençant par la roche mère, échantillonnage systématique tous les 20 ou 30 cm.

- Analyses chimiques

Toutes les opérations d'analyses chimiques ci-après ont été réalisées au laboratoire du CEREGE (Centre Européen de Recherches et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement) d'Aix en Provence en France.

*** Préparation des échantillons:** les échantillons ont été broyés dans un mortier d'agate. La masse initiale (m_i) prélevée a été de 250 mg dans le cas de la fusion au métaborate et de 100 mg dans le cas du tétraborate, ceci après une pesée sur une balance de précision dans un creuset en porcelaine.

*** Détermination de l'eau libre:** nous avons suivi la méthode classique qui consiste à chauffer l'échantillon 1/2 heure à 110°C puis à le refroidir dans un dessiccateur. Une pesée différentielle est ensuite effectuée avec la masse initiale (m_i). Le pourcentage de l'eau libre est déterminé de la manière suivante: % eau libre = $100*(m_i - (m>110°C))/m_i)$, avec mi = masse initiale prélevée de l'échantillon, m>110°C = masse de l'échantillon après chauffage à 110°C.

*** Détermination de la perte au feu (LOI):** nous avons utilisé la méthode Dean (1974): l'échantillon est chauffé 1 heure à 850°C puis refroidi dans un dessiccateur, suivi d'une pesée différentielle avec la masse après détermination de l'eau libre. Le pourcentage de la perte au feu est calculé sur la base de la formule suivante: $\% LOI = 100*((m>110°C)-(m>850°C))/m_i$

La perte à 550°C correspond à la matière organique.

*** Fusion alcaline:** elle a été réalisée suivant les étapes ci-après: ajout, dans le creuset en porcelaine contenant l'échantillon, du fondant: 500 mg de métaborate de lithium broyé ($LiBO_2$, Sigma-Aldrich, pureté>99,9%) ou de tétraborate de lithium ($Li_2B_4O_7$, Sigma-Aldrich, pureté>99,9%), réalisation d'un mélange homogène du fondant et de l'échantillon, polissage du fond d'un creuset en graphite à fond plat (Carbone Lorraine), transvasement du mélange dans ce creuset en graphite, fusion à 1010°C dans un four à moufles pendant 25 minutes (Germanique, 1994), trempe dans 50 ml d'acide chlorhydrique 2,4 N placés dans un bécher haut de 120 ml, dilution finale dans une fiole jaugée de 100 ml avec de l'eau bi-distillée afin d'obtenir une solution finale 1,2 N.

On procède de la même façon pour les échantillons que pour les géostandards connus choisis pour réaliser l'étalonnage. L'erreur est évaluée par rapport à un basalte connu (BHVO-1) pour la fusion au métaborate et par rapport à un granite connu (G-2) pour la fusion au tétraborate.

*** Méthode d'analyse:** les analyses chimiques proprement dites ont été effectuées par la méthode ICP-AES (Inductive Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy). Elles ont porté uniquement sur les éléments majeurs. L'appareil utilisé est le modèle Horiba Jobin Yvon type Ultima C (2000), haute résolution. La calibration a été effectuée avec des géostandards internationaux (Murray et al., 2000).

- Déterminations minéralogiques

Elles ont été réalisées par microscopie optique et par diffraction RX aussi bien pour le suivi de l'évolution des minéraux primaires (diffraction RX sur la poudre totale) que pour la détermination des minéraux secondaires (diffraction RX sur la fraction fine).

RESULTATS AND DISCUSSION

- Structuration du profil d'altération

Le profil d'altération type est constitué, de la base au sommet, de trois horizons: un horizon C ou altérite, très épais, un horizon B et un horizon A (figure 2)

* **Altérite :** Il s'étend de 1000 à 350 cm de profondeur, soit une épaisseur de 750 cm; ce qui représente les deux tiers du profil. Sur le terrain, nous l'avons subdivisé en 3 sous altérites en fonction du degré de friabilité du matériau.

- **Sous altérite 1**: Il s'étend de 1000 à 800 cm. Il est consistant. Sa couleur est lie-de-vin, notée 5YR 5/2 au code Munsell (version 2009 révisée). Sa structure est fortement massive avec une tendance polyédrique grossière vers le sommet. La transition est nette et ondulée avec la roche mère sous jacente. La texture de la roche mère y est parfaitement conservée. L'évolution minéralogique est marquée par le début de l'altération des feldspaths, d'abord des plagioclases à la base du sous altérite (980 m), puis des microclines au sommet (860 m). Ces feldspaths sont altérés en smectite. Les biotites sont partiellement chloritisées et souvent fortement déferuginisées et exfoliées; ceci dès la base du sous altérite. Les quartz paraissent encore intacts. Cependant, de petites encoches de dissolution commencent à apparaître sur leur pourtour.

- **Sous altérite 2** : Il s'étend de 800 à 650 cm. Contrairement au sous altérite précédent, ici le matériau devient friable et acquiert une couleur rose (5YR 7/4) avec

des ponctuations beiges (2,5Y 9,5/2). La texture est argilo-sableuse et la structure fragmentaire dominante avec des agrégats polyédriques grossiers. La transition est peu nette et progressive avec le sous altérite 1 sous jacent. La texture de la roche reste encore bien conservée. L'altération des feldspaths entamée dans le sous altérite 1, se poursuit et s'accentue. Les petites encoches de dissolution observées sur les grains de quartz dans le sous altérite précédent se sont transformés en profonds golfes de dissolution.

- **Sous altérite 3** : Il s'étend de 650 à 350 cm. La friabilité du matériau augmente. La couleur devient jaune rougeâtre (5YR 7/6), la texture argilo-sableuse et la structure plus nettement polyédrique. La transition est progressive et irrégulière avec le sous altérite 2. La texture de la roche n'est plus que localement conservée. Ce sous altérite est marqué par la kaolinitisation presque totale des feldspaths. Les biotites sont déferuginisées et presque totalement transformées en kaolinite. Cette kaolinitisation conserve la structure en feuillet des biotites. La dissolution des quartz s'accentue. Ils sont disloqués en petits individus qui gardent encore le même angle d'extinction, preuve d'une pédoturbation non encore active. Le ciment qui constituait un liseré biréfringent continu entre les grains devient localement diffus, lâche et très faiblement biréfringent (Photos 1 et 2, Planche 15). Ces deux processus, dissolution-dispersion du ciment et dissolution-fragmentation des grains de quartz, minéral qui constitue près de 90% de la roche, vont entraîner des modifications importantes de la texture primaire qui n'est plus que localement conservée.

* **Horizon B (350 – 50 cm)** : Il est frais, de couleur brun jaunâtre (10 YR 5/6) à brun rouge (7,5 YR 6/6) et à texture sablo-argileuse. La structure devient fragmentaire nette avec des agrégats polyédriques moyennes et grossières. La transition est nette et ondulée avec l'altérite.

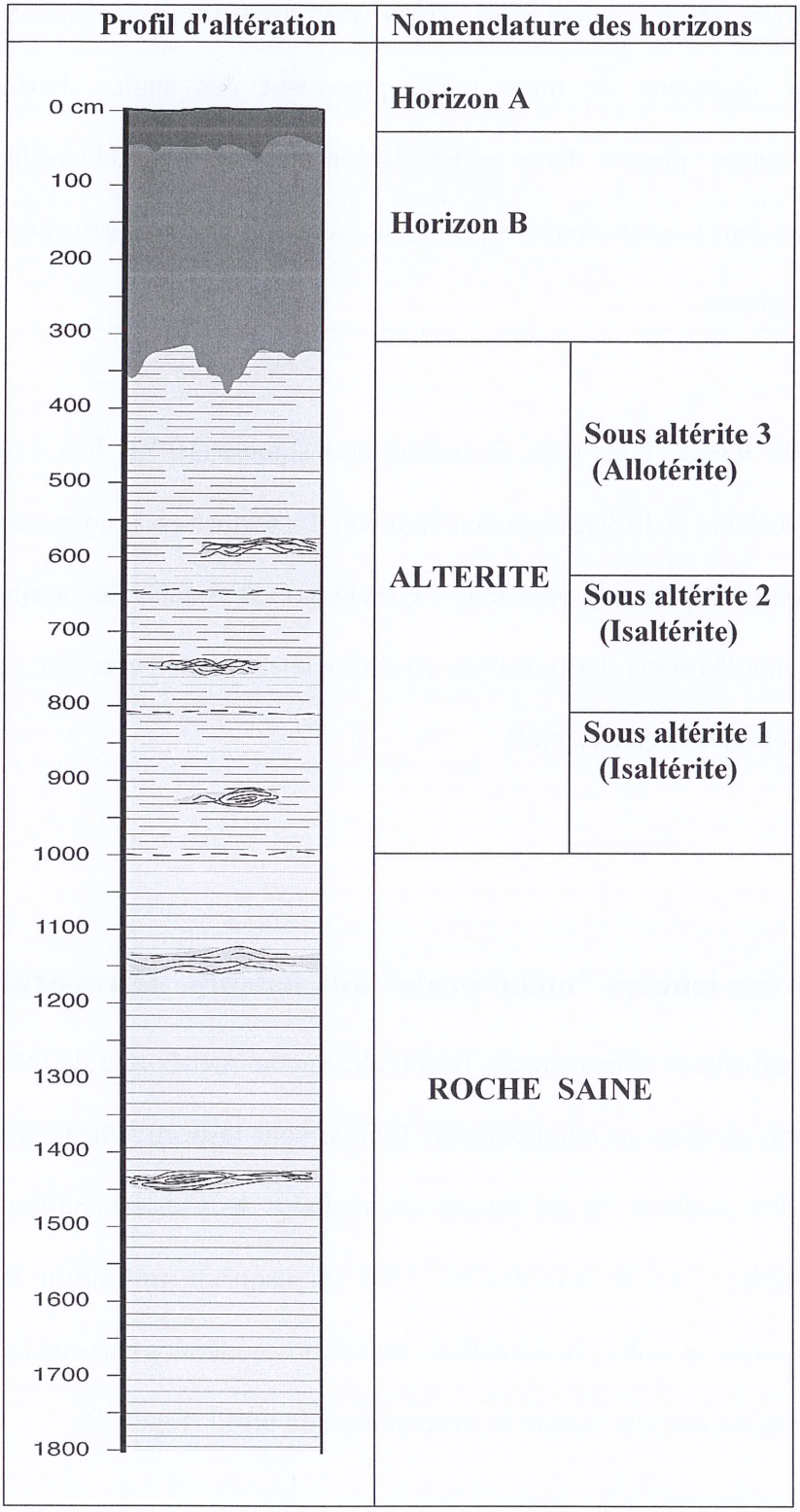

Figure 2 : Structuration générale et nomenclature des horizons du profil type d'altération des grès de l'Inkisi

La texture de la roche a complètement disparu, laissant place à une texture purement pédologique constituée d'un plasma rouge dans lequel sont dispersés des éléments d'un squelette essentiellement quartzeux de toute taille, présentant des angles d'extinction différents les uns des autres, preuve d'une pédoturbation intense. Les feldspaths déjà complètement kaolinitisés dans le sous altérite 3 précédent, vont être progressivement digérés par un plasma rouge ferrugineux.

* **Horizon A (50 – 0 cm)** : Il est frais, de couleur brun sombre (10 YR 3/2), à matière organique directement décelable et diffuse dans tout l'horizon. La texture est limono-sableuse. La structure est grumeleuse moyenne et grossière. Le matériau est friable. De nombreuses racines fines parcourent tout l'horizon. La transition est distincte et ondulée avec des trainées de matière organique pénétrant dans l'horizon B.

-Comparaison des teneurs "métaborate" aux teneurs "tétraborate"

Les résultats analytiques obtenus après fusion alcaline au metaborate de lithium et ceux obtenus après fusion alcaline au tétraborate de lithium sont respectivement présentés dans les tableaux I et II. Les analyses ont été uniquement réalisées dans les échantillons de la roche mère et du sous altérite 1, soit de la profondeur 1500 cm jusqu'à la profondeur 780 cm. C'est, en effet, à ce niveau que se réalise l'essentiel des évolutions minéralogiques au cours de l'altération de ces grès, comme nous l'a montré la structuration du profil (Figure 2).

Tableau I: Teneurs ICP-AES après fusion alcaline au métaborate de lithium ($LiBO_2$)

Prof (cm)	110°C	550°C	850°C	TENEURS ICP-AES APRES FUSION ALCALINE AU METABORATE (LiBO2)										
	% $H2O^-$	% MO	% (LOI-MO)	Al_2O_3 %	CaO %	Fe_2O_3 T %	K_2O %	MgO %	MnO %	Na_2O %	P_2O_5 %	SiO_2 %	TiO_2 %	S (%)
780	0,00	4,76	0,69	11,20	0,19	1,68	1,32	0,31	0,02	<LD	0,05	83,78	0,15	104,16
790	0,30	2,66	0,07	6,44	0,10	1,23	<LD	0,11	0,01	0,06	0,03	66,06	0,16	77,23
810	0,70	3,80	0,10	8,31	0,09	1,43	0,13	0,21	0,005	0,08	0,03	57,66	0,16	72,71
830	0,94	4,90	0,28	11,29	0,08	4,72	0,57	0,48	0,02	0,08	0,05	75,62	1,20	100,23
835	1,21	4,03	0,50	12,64	0,19	2,67	0,88	0,42	0,01	<LD	0,08	77,38	0,35	100,35
840	0,20	1,10	0,23	5,44	0,19	0,92	1,60	0,05	0,004	0,28	0,02	67,85	0,13	78,04
845	0,56	3,94	0,26	9,32	0,23	1,95	0,32	0,29	0,005	0,07	0,04	69,99	0,27	87,24
860	0,81	3,74	0,40	9,37	0,19	2,17	2,38	0,39	0,01	<LD	0,04	82,17	0,21	101,89
870	0,00	1,07	0,49	6,83	0,21	1,04	3,10	0,17	0,02	<LD	0,04	90,06	0,10	103,11
880	0,00	0,91	0,40	6,27	0,22	0,94	3,09	0,18	0,06	0,07	0,05	84,19	0,05	96,42
900	0,50	0,50	0,50	6,70	0,22	0,88	2,97	0,18	0,01	0,31	0,04	91,71	0,10	104,61
910	0,00	1,00	0,50	7,24	0,26	1,59	3,19	0,25	0,02	0,20	0,05	88,34	0,23	102,86
920	0,00	0,90	0,70	7,18	0,22	1,17	3,13	0,22	0,01	0,55	0,04	89,56	0,10	103,78
930	0,00	0,60	1,01	6,75	0,21	0,99	2,96	0,18	0,02	0,31	0,04	89,97	0,07	103,11
940	0,70	1,49	0,60	8,89	0,28	1,83	4,05	0,53	0,01	0,40	0,12	83,46	0,20	102,55
1200	0,36	1,04	0,00	7,51	0,32	1,45	2,83	0,41	0,01	1,31	0,05	75,02	0,21	90,53
1350	0,31	0,51	0,51	9,12	0,33	3,08	2,78	0,47	0,01	2,15	0,05	75,21	0,27	94,80
1500	0,00	0,97	1,07	9,61	0,35	3,74	3,54	1,21	0,02	1,24	0,12	76,42	0,63	98,91
Erreur (%)				1,45	1,88	1,18	13,53	4,31	2,11	1,00	2,47	1,09	2,89	4,30
LD (ppm)				764	57,9	153	60,5	8,36	2,72	140	28,10	508	52,2	

Tableau II: Teneurs ICP-AES après fusion alcaline au tétraborate de lithium ($Li_2B_4O_7$)

Prof (cm)	110°C	550°C	850°C	TENEURS ICP-AES APRES FUSION ALCALINE AU TETRABORATE ($Li_2B_4O_7$)										
	% $H2O^-$	% MO	% (LOI-MO)	Al_2O_3 %	CaO %	Fe_2O_3 T %	K_2O %	MgO %	MnO %	Na_2O %	P_2O_5 %	SiO_2 %	TiO_2 %	S (%)
780	0,00	4,76	0,69	11,13	<LD	1,62	0,99	0,31	0,02	<LD	0,03	76,89	0,17	96,62
790	0,30	2,66	0,07	6,50	0,10	1,41	0,18	0,18	0,01	0,06	0,05	81,11	0,15	92,76
810	0,70	3,80	0,10	8,95	0,09	1,59	0,32	0,27	0,004	0,08	0,04	76,36	0,18	92,49
830	0,94	4,90	0,28	11,71	0,14	4,45	0,85	0,47	0,02	0,15	0,05	76,49	1,34	101,77
835	1,21	4,03	0,50	12,28	0,02	2,76	1,11	0,45	0,01	0,44	0,06	78,25	0,47	101,60
840	0,20	1,10	0,23	6,09	0,19	1,19	1,60	0,14	0,003	0,29	0,02	89,63	0,13	100,83
845	0,56	3,94	0,26	9,86	0,23	2,05	1,67	0,37	0,002	0,07	0,05	80,05	0,30	99,43
860	0,81	3,74	0,40	9,24	0,05	2,15	2,26	0,40	0,01	<LD	0,03	81,25	0,25	100,59
870	0,00	1,07	0,49	6,53	0,86	1,11	2,81	0,21	0,02	0,84	0,01	85,99	0,12	100,04
880	0,00	0,91	0,40	6,25	0,25	0,89	3,56	0,19	0,06	1,03	0,02	85,73	0,09	99,37
900	0,50	0,50	0,50	6,01	0,11	0,83	2,39	0,17	0,01	0,89	0,00	83,56	0,12	95,59
910	0,00	1,00	0,50	6,72	0,11	1,59	2,90	0,24	0,02	1,07	0,01	85,72	0,27	100,15
920	0,00	0,90	0,70	6,93	<LD	1,14	2,82	0,21	0,01	1,40	0,01	85,88	0,13	100,13
930	0,00	0,60	1,01	6,16	0,27	0,94	2,46	0,17	0,01	1,09	0,01	87,41	0,10	100,22
940	0,70	1,49	0,60	8,48	0,27	1,85	3,86	0,57	0,02	1,18	0,02	81,28	0,38	100,71
1200	0,36	1,04	0,00	7,64	0,32	1,61	3,79	0,43	0,01	1,31	0,05	82,37	0,21	99,15
1350	0,31	0,51	0,51	9,08	0,16	2,77	3,43	0,46	0,01	2,30	0,06	80,28	0,28	100,16
1500	0,00	0,97	1,07	9,31	0,41	3,65	3,40	1,21	0,02	1,76	0,08	73,45	0,62	95,93
Erreur (%)				1,45	1,88	1,18	13,53	4,31	2,11	1,00	2,47	1,09	2,89	1,25
LD (ppm)				712	283	34,9	213	13,7	6,31	193	20,4	335	32,9	

En comparant ces deux tableaux, il ressort des différences assez significatives entre les résultats analytiques obtenus par les deux méthodes de fusion. Les résultats après fusion au tétraborate (tableau II) bouclent plus près de 100% que ceux obtenus après fusion au métaborate (tableau I). Ainsi par exemple, les niveaux 840, 845, 810 et 790 cm bouclent respectivement à 100,82%, 99,43%, 92,49% et 92,76% contre 78,04%, 87,24%, 72,71% et 77,23% pour le métaborate. Ces différences sont de plus en plus importantes dans les horizons supérieurs du profil d'altération.

Le comportement vis-à-vis des deux fondants varie en fonction de l'élément chimique considéré. Nous avons étudié ce comportement, pour Al_2O_3, K_2O, SiO_2 et Na_2O sur des graphiques "tetraborate/metaborate"(Figures 3, 4, 5 et 6)

- pour Al_2O_3 (Figure 3), les différences obtenues par les deux méthodes de fusion sont faibles. Ainsi la distribution des points donne une corrélation quasi-parfaite avec une pente très proche de la droite théorique de 1 (en tireté rouge). Pour cet élément, les deux méthodes semblent équivalentes et les différences toujours inférieures à 10% peuvent être attribuées à la précision des analyses.

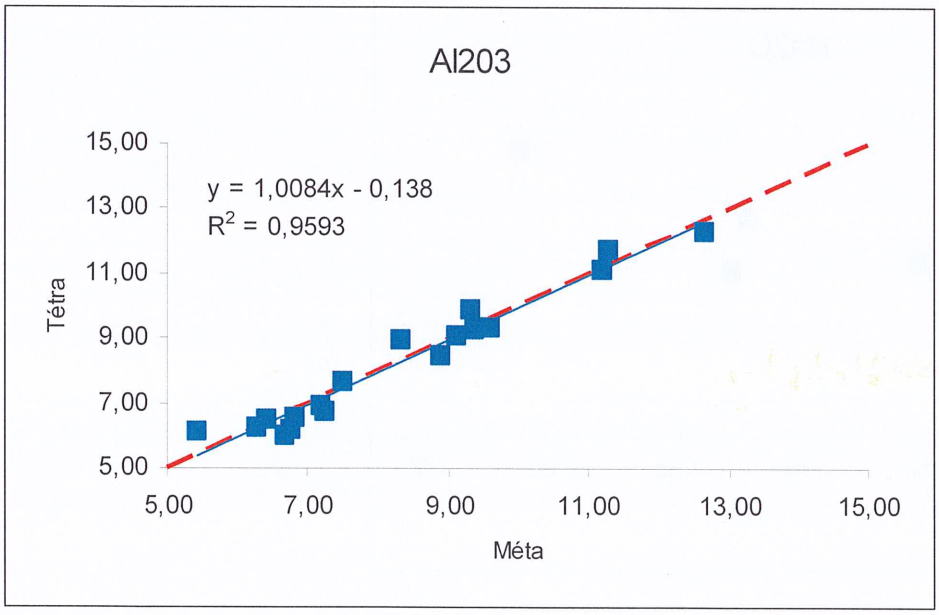

Figure 3: Graphique "Tétraborate/Métaborate" de Al_2O_3

-pour K_2O (Figure 4), la dispersion est plus grande, avec des points au dessus et d'autre en-dessous de la droite théorique de 1 (en tireté rouge)

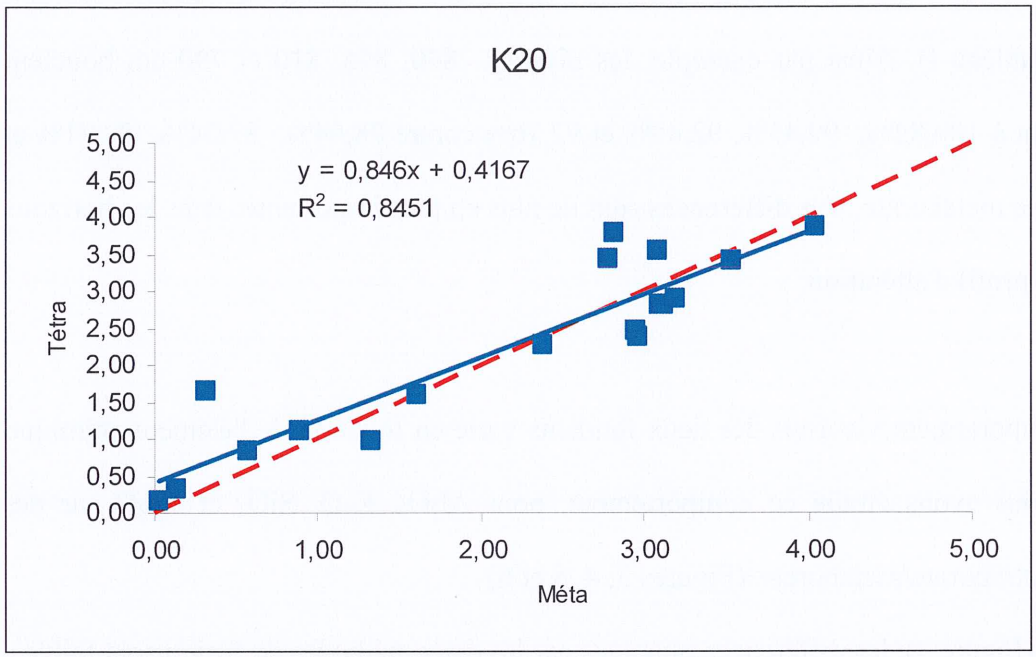

Figure 4: Graphique "Tétraborate/Métaborate" de K_2O

- pour Na_2O, la méthode tétraborate est toujours soit équivalente, soit plus efficace que la méthode métaborate

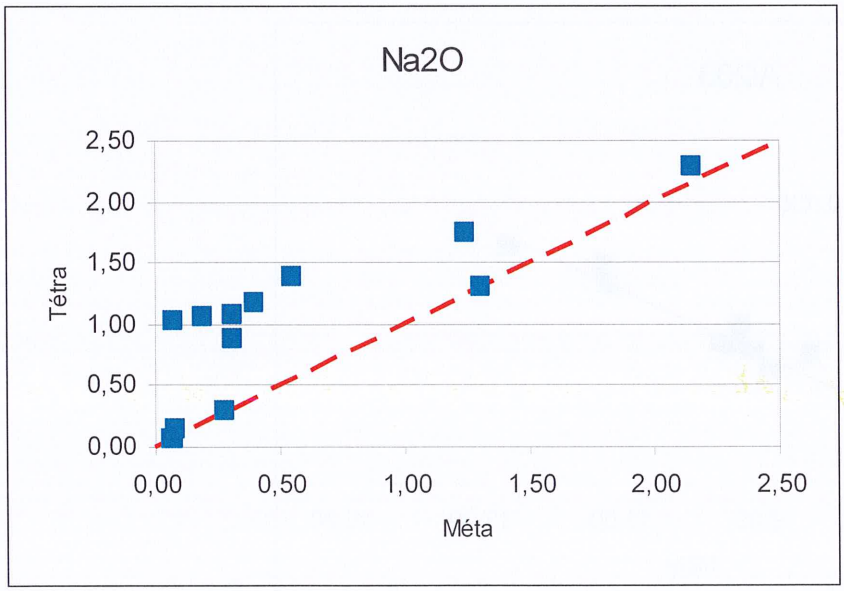

Figure 5: Graphique "Tétraborate/Métaborate" de Na_2O

- pour SiO_2 (Figure 6), la dispersion des points autour de la droite théorique de 1 (tireté rouge) est plus grande. Tantôt c'est la fusion métaborate, tantôt c'est la fusion tétraborate qui est efficace.

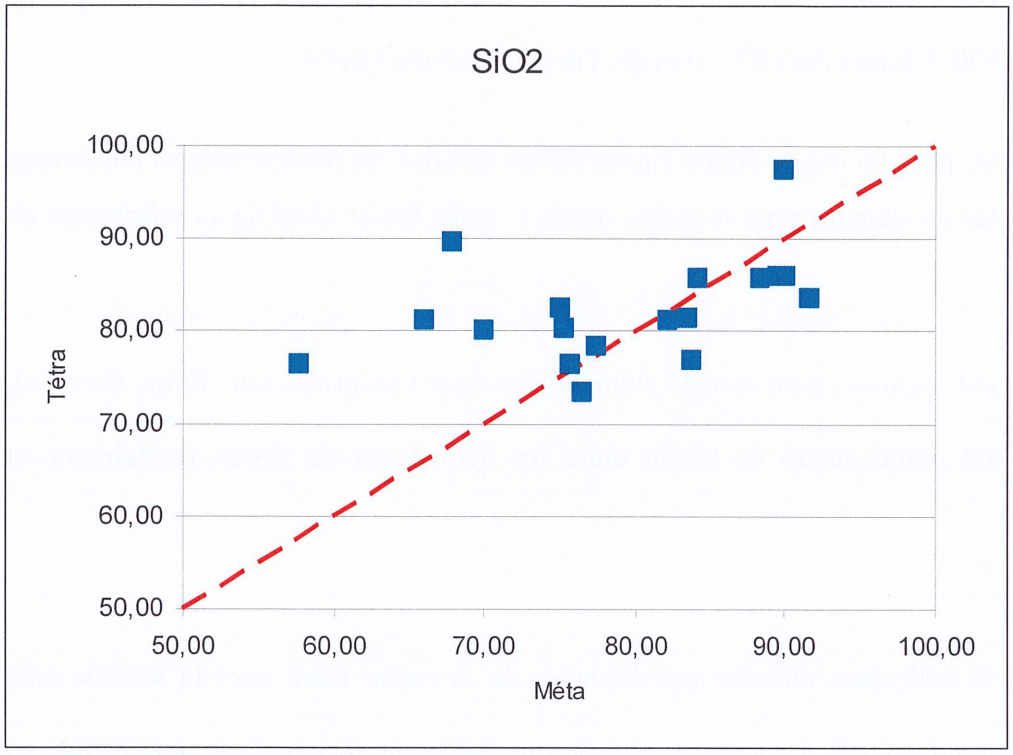

Figure 6: Graphique "Tétraborate/Métaborate" de SiO_2

Dans le but de mieux apprécier ces différences de teneurs le long du profil d'altération, nous avons conçu un coefficient de variation Ki.

- Coefficient de variation Ki

Il est déterminé de la manière suivante:

$$K_i\,(\%) = 100 * ((\text{oxyde}_i\,(tf) - \text{oxyde}_i\,(mf)) / \text{oxyde}_i\,(mf))$$

(**tf** : teneur obtenue pour un oxyde donné i après fusion alcaline de l'échantillon au tetraborate de lithium; **mf** : teneur obtenue pour le même oxyde i après fusion alcaline au métaborate de lithium).

Ce coefficient exprime, pour chaque élément chimique i (exprimé sous forme d'oxyde), les différences (en pourcentage) de teneur entre les deux types de fusion (métaborate et tétraborate).

Les valeurs du K_i, calculées élément par élément, de la roche mère vers la surface sont présentées dans le tableau III. Le signe + signifie que l'élément concerné est plus fusible au tétraborate qu'au metaborate. Par contre, les valeurs précédées d'un signe - expriment le comportement contraire c'est-à-dire une fusion plus importante au metaborate qu'au tétraborate

Tableau III: Coefficient de variation K_i (%) pour chaque oxyde en fonction de la profondeur (cm).

Prof (cm)	Coefficient de variation Ki(%)										
	Al_2O_3 %	CaO %	Fe_2O_3 T %	K_2O %	MgO %	MnO %	Na_2O %	P_2O_5 %	SiO_2 %	TiO_2 %	S (%)
780	-0,65		-3,12	-25,26	+0,00	+0,00		-47,57	-8,22	+16,56	-7,23
790	+0,92	-0,27	+13,80		+66,39	-24,60	+0,13	+42,47	+22,78	-5,12	+20,11
810	+7,66	-0,31	+10,97	+144,12	+30,85	-16,41		+33,35	+32,44	+11,05	+27,20
830	+3,74	+75,24	-5,77	+48,33	-2,65	+4,95	+75,10	+6,64	+1,14	+10,83	+1,53
835	-2,81	-87,30	+3,41	+26,33	+7,86	+12,50		-25,72	+1,13	+36,16	+1,25
840	+11,97	+0,14	+29,58	+0,00	+158,19	-29,11	+2,79	-24,59	+32,09	+1,58	+29,20
845	+5,85	-0,09	+5,29	+220,07	+29,04	-50,19	+0,20	+26,29	+14,39	+13,22	+13,97
860	-1,47	-73,96	-0,83	-5,12	+4,66	+0,00		-40,89	-1,11	+18,17	-1,27
870	-4,33	+303,76	+6,94	-9,33	+21,64	-5,26		-85,19	-4,51	+28,88	-2,97
880	-0,32	+17,21	-6,04	+15,12	+6,18	+1,69	+1 291	-58,78	+1,83	+62,99	+3,05
900	-10,28	-50,23	-5,25	-19,64	-3,87	-8,33	+183,12	-90,52	-8,89	+22,45	-8,63
910	-7,19	-55,98	+0,19	-9,15	-3,97	+0,00	+243,37	-81,62	-2,96	+18,51	-2,64
920	-3,55		-2,40	-9,69	-2,75	-9,09	+151,81	-63,09	-4,12	+34,50	-3,51
930	-8,83	+24,88	-4,45	-16,86	-5,71	-45,00	+249,52	-70,79	-2,85	+40,94	-2,80
940	-4,51	-1,81	+0,82	-4,55	+6,95	+7,14	+195,26	-83,93	-2,60	+95,62	-1,80
1200	+1,77	+0,03	+10,90	+33,92	+4,35	-30,46		+2,09	+9,80	+1,23	+9,53
1350	-0,45	-49,94	-9,91	+23,27	-2,23	-8,17	+6,88	+6,40	+6,73	+5,27	+5,65
1500	-3,12	+17,87	-2,64	-3,73	+0,33	-11,11	+41,19	-33,79	-3,89	-1,60	-3,01

Il ressort de ce tableau III que les valeurs et le signe (+ ou -) du Ki varient selon l'élément chimique et selon la profondeur du profil. Pour tous les éléments chimiques, le Ki change plusieurs fois de signes le long du profil d'altération. Pour mieux suivre cette évolution nous avons exprimé ces résultats sous forme de courbes de variation du Ki en fonction de la profondeur.

- Courbes de variation du Ki en fonction de la profondeur

Ces courbes ont été établies pour trois éléments: Si, K, Na. L'Al n'a pas été pris en compte car, comme nous l'avons déjà signifié, la figure 3 montre que, pour cet élément, les deux méthodes sont équivalentes et que les variations du Ki, toujours inférieures à 10% sont dans l'intervalle de précision des analyses. Les trois éléments retenus sont, avec l'Al, les éléments les plus abondants dans les grès de l'Inkisi. Ce sont également les principaux constituants des feldspaths, minéraux les plus vulnérables à l'altération dans les grès de l'Inkisi. Ainsi, leur comportement pourrait nous donner une indication sur les évolutions minéralogiques.

** Courbe Ki du sodium (Ki (Na_2O))*

La courbe Ki du sodium (figure 7) ainsi que le tableau 3 montrent que, de la profondeur 1500 à 1200 cm, c'est-à-dire dans le grès sain, le Ki du sodium est relativement faible, compris entre 0 et 50%. Par contre, dans l'altérite, de 940 à 880 cm (l'étude s'est limitée ici au sous altérite 1), le Ki augmente fortement pour atteindre des valeurs positives supérieures à 150 % avec un maximum de 249 % à 930 cm de profondeur. Ensuite au sommet du sous altérite 1, de 870 à 780 cm de profondeur, on note une forte diminution du Ki sodium à des valeurs positives essentiellement de l'ordre de 2 %.

Il apparaît donc assez clairement que le début de l'altération des grès de l'Inkisi est marqué par une forte augmentation positive du Ki Sodium.

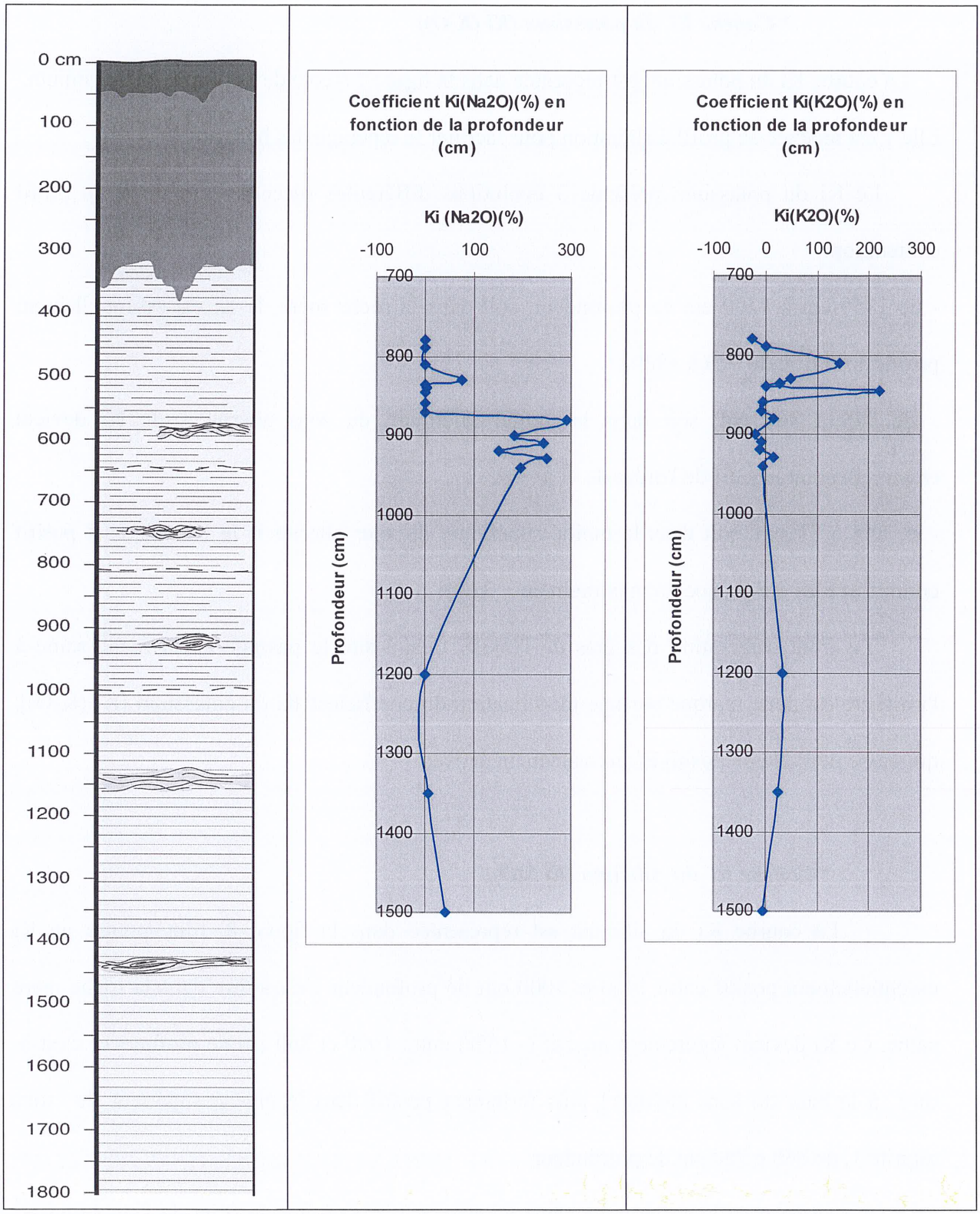

Figure 7 : Courbe Ki du sodium et du potassium en fonction de la profondeur (à droite) indexée au profil d'altération (à gauche)

** Courbe Ki du potassium (Ki (K_2O))*

La courbe Ki du potassium est présentée dans la figure 7 à coté de la courbe Ki du sodium. Elle y est indexée au profil d'altération pour faciliter le repérage des horizons.

Le Ki du potassium présente 3 évolutions différentes successives le long du profil d'altération:

- de 1350 cm à 1200 cm de profondeur, soit dans la roche mère, le Ki est essentiellement positif de l'ordre de +23 à +33%.
- de 940 à 860 cm, soit dans la moitié inférieure du sous altérite 1, le Ki devient essentiellement négatif de l'ordre de -4 à -9%.
- de 845 à 810cm, soit dans la moitié supérieure du sous altérite 1, le Ki redevient positif continu et plus élevé avec un maximum de + 220%.

Le front d'altération des grès de l'Inkisi, c'est-à-dire le passage de la roche saine à l'isaltérite est donc marqué par une modification du coefficient Ki du potassium [Ki (K_2O)], qui passe des valeurs positives aux valeurs négatives.

** Courbe Ki du silicium (Ki SiO_2)*

La courbe Ki du silicium est représentée dans la figure 8. Elle montre un Ki essentiellement positif entre 1450 et 1000 cm de profondeur c'est-à-dire dans la roche mère saine. Ce Ki devient légèrement négatif (- 15%) entre 1000 et 860 cm de profondeur c'est-à-dire à la base du sous altérite 1 puis fortement positif dans le niveau supérieur du sous altérite 1, de 860 à 790 cm de profondeur.

Le passage de la roche mère saine à l'altérite 1, c'est-à-dire le front de l'altération est donc marqué par le changement de signe du Ki de la silice qui devient négatif.

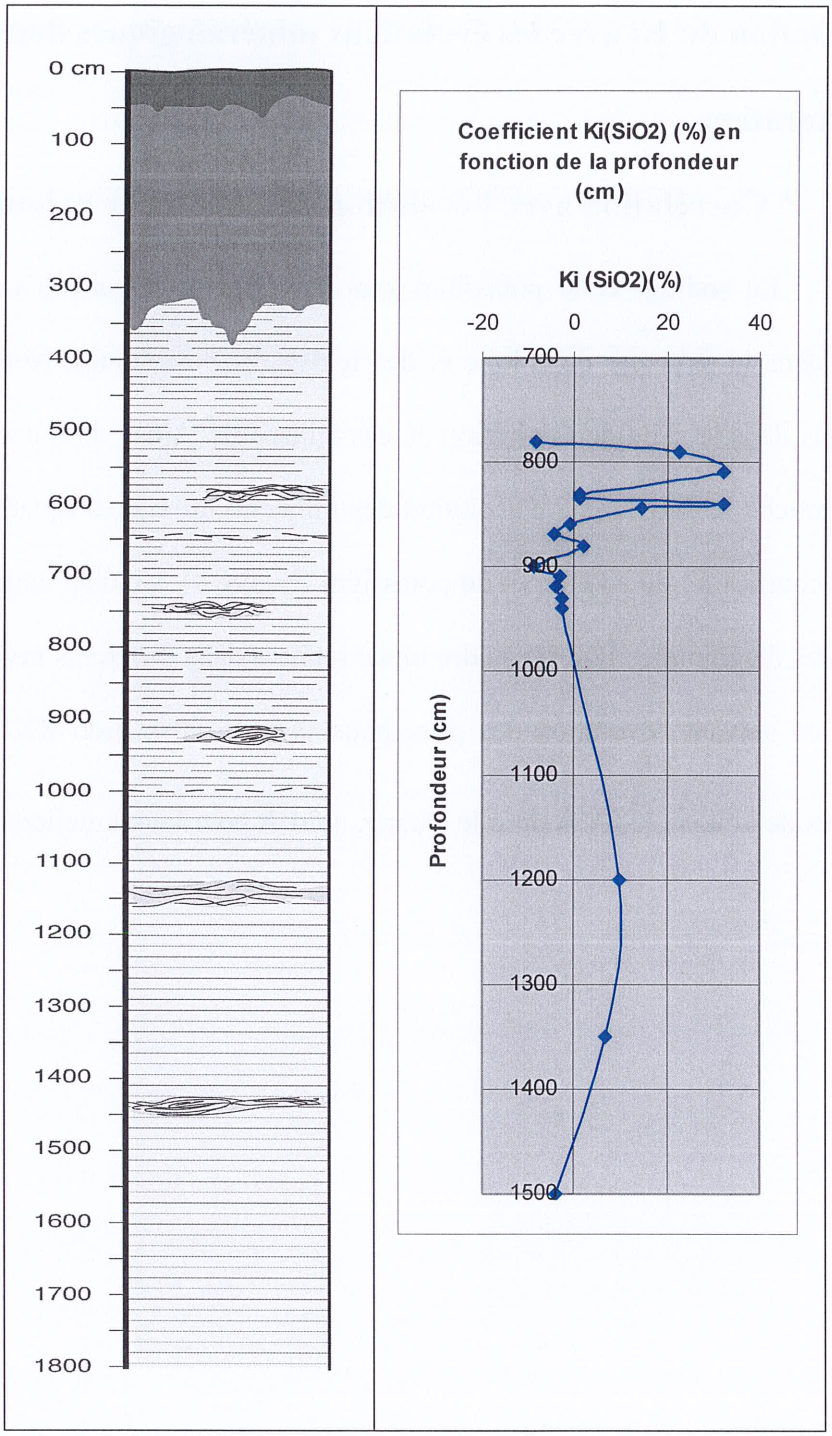

Figure 8 : Courbe Ki du silicium en fonction de la profondeur (à droite), indexée au profil d'altération (à gauche).

En conclusion, nous pouvons retenir que le passage de la roche saine à l'altérite (front de l'altération) est marqué par un changement net du Ki des trois éléments chimiques étudiés (Na, K, Si), aussi bien en valeur qu'en signe.

- Corrélation du Ki avec les évolutions minéralogiques dans le profil d'altération

* Corrélation avec l'évolution des minéraux primaires

Le sodium et le potassium sont les principaux cations compensateurs, respectivement dans la structure de l'albite et des feldspaths potassiques. Nous avons donc utilisé ces cations dans le suivi de l'altération de ces feldspaths. Ainsi, dans cette corrélation, nous avons rapproché le diagramme d'évolution des minéraux primaires (quartz, microcline, albite) avec les courbes Ki du sodium et du potassium (Figure 9). Ce diagramme a été établi en superposant les diagrammes RX de poudre totale réalisés dans différents niveaux du profil d'altération et en suivant l'évolution des principaux pics de diffraction RX des minéraux primaires du grès de l'Inkisi. (3,34 Å pour le Quartz, 3,24 Å pour la microcline et 3,19 Å pour l'albite).

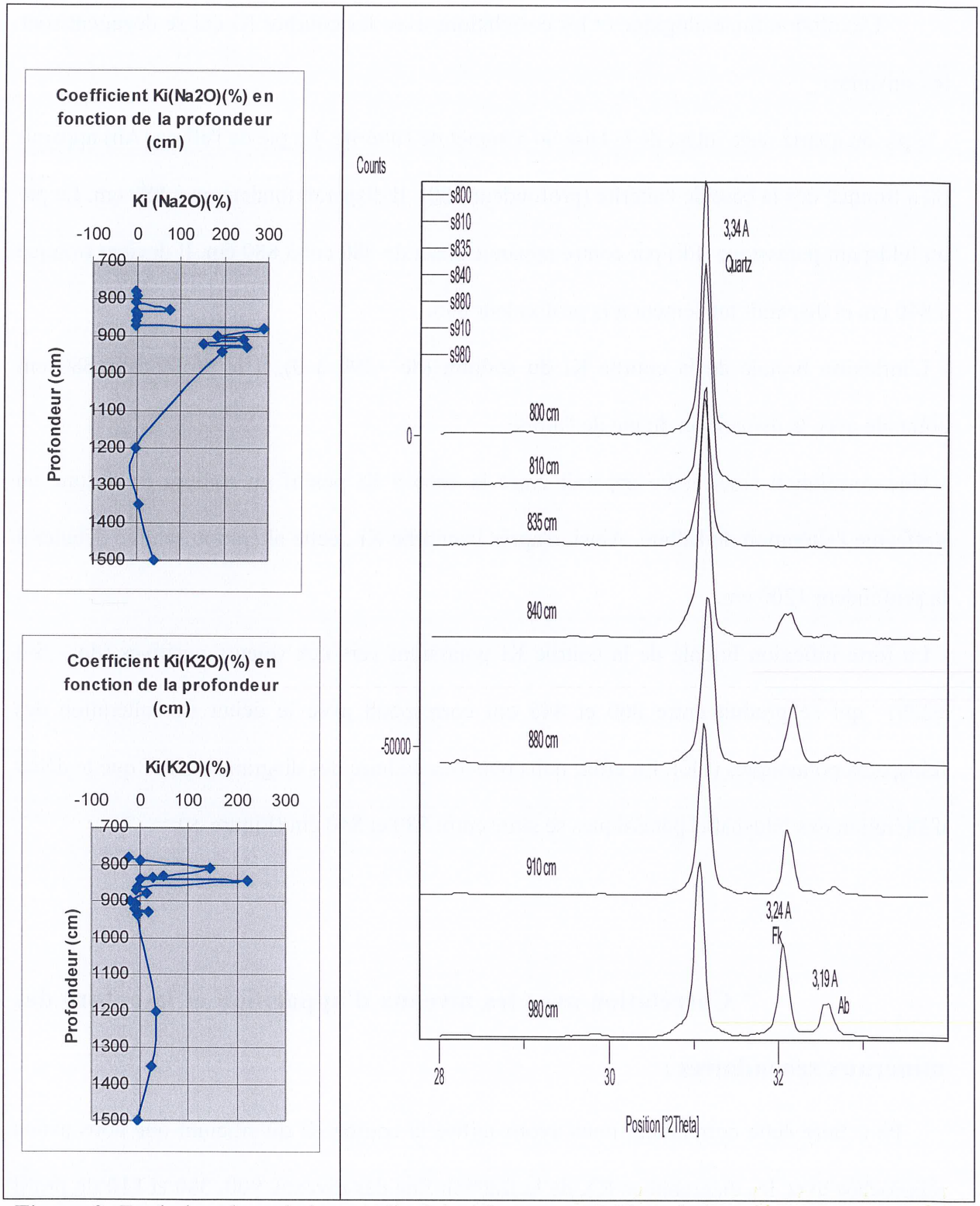

Figure 9: Evolution des minéraux primaires (diagramme RX) de la base au sommet du sous altérite 1 (à droite) comparé avec l'évolution du Ki du sodium et du potassium (à gauche)

L'évolution minéralogique et les corrélations avec les courbes Ki qui se dégagent sont les suivantes:

- le pic du quartz reste intact de la base au sommet de l'altérite. Le pic de l'albite (Ab) apparaît bien tronqué dès la base de l'altérite (profondeur 980). Il disparaît totalement à 880 cm. Le pic du feldspath potassique (Fk) par contre apparaît intact de 980 cm à 880 cm. Il devient tronqué à 840 cm et disparaît totalement à la profondeur 835.

- L'inflexion brutale de la courbe Ki du sodium (de +290 à 0), à la profondeur 880 cm coïncide avec la disparition du pic de l'albite.

- Une corrélation assez nette apparaît entre la zone à Ki positif du sodium et la zone où s'effectue l'altération de l'albite. Ainsi, d'après la courbe Ki , cette altération semble débuter à la profondeur 1200 cm.

- La forte inflexion brutale de la courbe Ki potassium vers des valeurs positives (de – 5 à +220) qui se produit entre 860 et 845 cm correspond avec le début de l'altération des feldspaths potassiques (FK). En effet, nous pouvons déduire des diagrammes RX que le début d'altération des feldspaths potassiques se situe entre 880 et 840 cm (Figure 9).

*** Corrélation avec les niveaux d'apparition et la nature des minéraux secondaires :**

Pour faire cette corrélation, nous avons utilisé la courbe Ki du silicium que nous avons rapprochée avec les diagrammes RX de la fraction fine des niveaux 900, 880 et 810 du profil d'altération (Figure 10). Le silicium constitue en effet l'un des principaux cations des minéraux argileux, minéraux secondaires les plus importants.

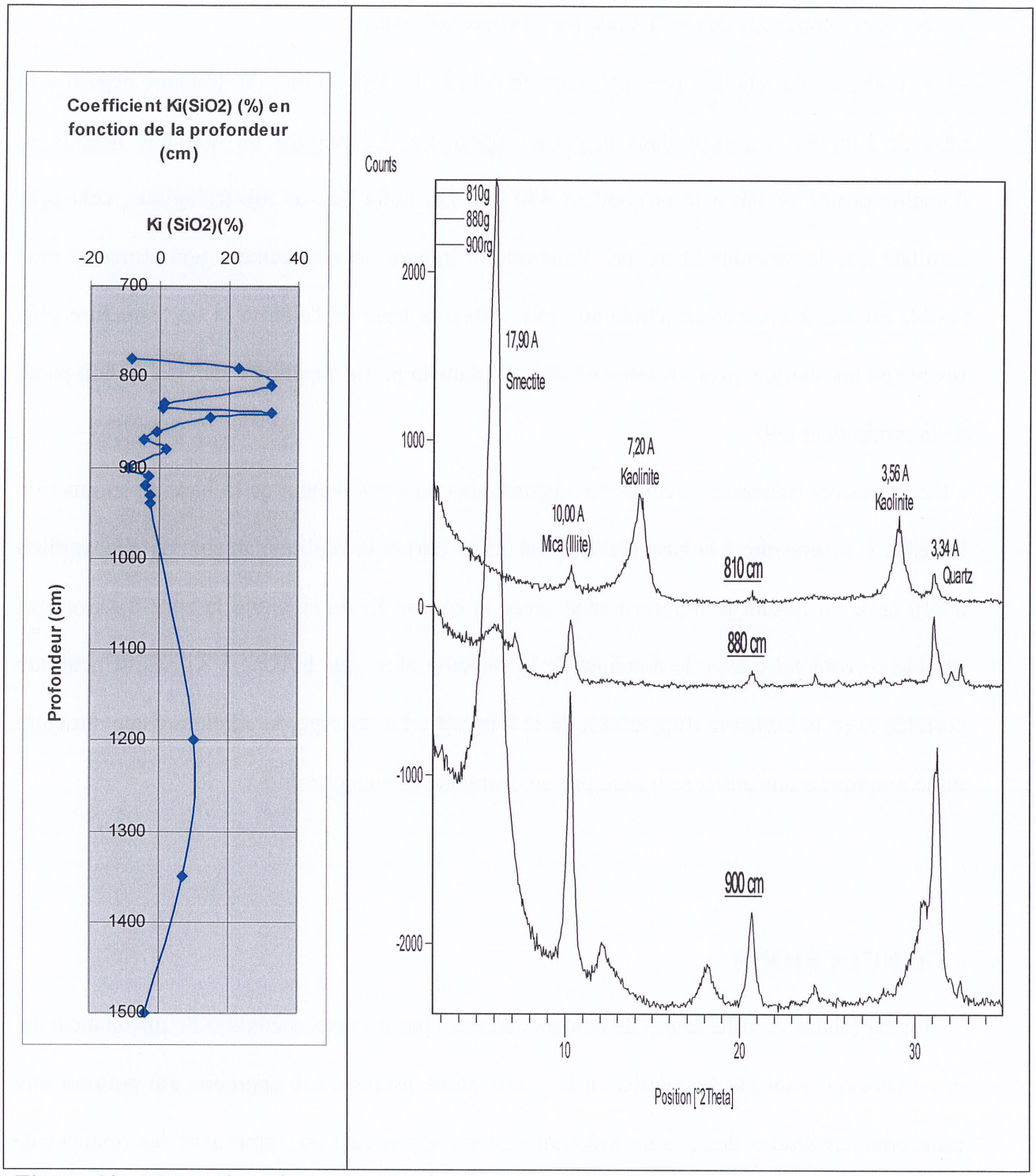

Figure 10 : Nature des minéraux secondaires obtenues par diffraction RX de la fraction fine de différents niveaux de l'altérite (à droite) comparée avec l'évolution de la courbe Ki du silicium (à gauche)

Nous pouvons tirer de ces figures, les résultats suivants:

- La courbe Ki du silicium présente, comme cela a été déjà notifié, un domaine négatif à la base de l'altérite et positif dans la partie supérieure. Le passage du domaine négatif au domaine positif se fait à la profondeur 840 cm. Du point de vue minéralogique, cela peut signifier que le silicium libéré par l'altération intègre successivement une structure plus fusible au métaborate qu'au tétraborate (Ki < 0) à la base de l'altérite et une structure plus fusible au tétraborate qu'au métaborate (Ki >0) dans la partie supérieure de l'isaltérite à partir de la profondeur 840.

- Deux espèces minérales secondaires apparaissent successivement de la base au sommet de l'altérite 1: la smectite à la base (échantillon à 900 cm) et la kaolinite au sommet (échantillon à 810 cm). En faisant le rapprochement avec la courbe Ki du silicium, la zone à Ki négatif semble correspondre avec le domaine de la smectite alors que la zone à Ki positif peut être corrélée avec le domaine d'apparition de la kaolinite. Le passage du silicium d'une structure minéralogique à une autre, se traduit par un changement du signe du Ki.

- CONCLUSIONS

En exploitant les différences de teneurs obtenues par les deux méthodes de fusion alcaline, et en les exprimant par le coefficient Ki, cette étude propose une approche qui pourrait être utile pour les études des profils d'altération des roches, ceci en appui avec les données de terrain et les autres données analytiques notamment la diffraction RX. En effet, le coefficient Ki que nous avons conçu donne de bonnes indications sur l'évolution des minéraux primaires et sur la nature des minéraux secondaires néoformés au cours de l'altération. Il pourrait permettre de suivre ou de confirmer la succession des différentes néogéneses minérales le

long du profil d'altération. Cette méthode peut ainsi permettre de localiser le front d'altération sur les profils, même quand il n'est pas bien perceptible sur le terrain.

L'intérêt de cette étude est aussi d'avoir montré que le tétraborate de lithium considéré comme un solvant plus puissant que le métaborate de lithium et qui est utilisé pour les échantillons très réfractaires (Germanique, 1994), ne l'est pas toujours. En effet dans le profil d'altération des grès de l'Inkisi étudié ici, certains niveaux ont été plus fusibles avec le métaborate qu'avec le tétraborate. Ce qui s'est exprimé par un Ki négatif. La réactivité des échantillons vis-à-vis de l'un ou l'autre solvant semble dépendre également de la nature des minéraux secondaires constitutifs de l'échantillon. Cette recherche mérite d'être poursuivie, dans cette perspective, en analysant, non pas des échantillons totaux, mais des minéraux isolés extraits de ces échantillons.

-Remerciements à l'Université Marien Ngouabi (Congo), au CEREGE, à l'Ambassade de France au Congo pour le soutien matériel, scientifique et financier.

-Thanks to Marien Ngouabi University (Congo), to CEREGE, to France Embassy in Congo for material, scientific and financial support.

REFERENCES

Baize D. et al., 1990 – Référentiel pédologique français. *3ème prop. AFES, INRA, Paris, 279p.*

Chatelin Y., 1974 – Les sols ferrallitiques. III. L'altération. *Office Rech. Sci. Techn. Outre-Mer (ORSTOM, Paris), Initiations, Doc. Techn. 24. 144p.*

Dadet P., 1969 – Notice explicative de la carte géologique du Congo Brazzaville au 1:500.000. *Mémoire BRGM 70, 103P. G de Bussac, Clermont-Ferrand.*

Dean W. E., JR, 1974,-Determination of carbonate and Organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. *Journal of Sedimentary, Petrology, **44**, No. 1, p 242-248.*

Germanique J. C., 1994, -Major, Trace and Rare-Earth Elements in fourteen GSJ Reference samples. Determination by X-Ray Fluorescence Spectrometry and Inductively Coupled Plasma Absorption Emission Spectrometry, *Geostandards Newsletter, **18**, No 1, p 91-100.*

Keller W.D. ,1962 -The principles of Chemical Weathering, *Univ. De Columbia, Lucas Brothers Publications Univ. Of Missouri, Columbia (Missouri).*

Millot G. et Bonifas M., 1955- Transformations isovolumetriques dans les phénomènes de latérisation et bauxitisation. *Bull. Serv. Carte Alsace-Lorraine, 8, p. 3-10.*

Munsell Colour, 1990 – Munsell Soil Colour Charts. *Koll Morgen Instruments, Maryland.*

Murray R. W., Miller D. J., and Kryc K. A., 2000, -Analysis of major and trace elements in rocks, sediments, and interstitial waters by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES), *ODP Technical Note, **29**.*

Nahon D., 2003 -Altérations dans la zone tropicale. Signification à travers les mécanismes anciens et/ou encore actuels. *Comptes-rendus Géoscience - Académie des Sciences Paris, 335/16 : 1109-1120.*

Noack Y., 1985 -Différentiation entre altération entre altération météorique et altération hydrothermale. Application aux matériaux ubiquistes : talc, chlorites, serpentine. Pétrologie, minéralogie, géochimie – *Thèse d'Etat, Univ. De Poitiers (1985) 200p (Thèse doct. Es Sci., Univ. Aix Marseille III, 156p.*

Samba-Kimbatsa M.j., 1978- Le climat du Bas-Congo. *Thèse 3è cycle, Univ. Dijon, Fac. Lettres.*

Sounga J. D., 1982 -Etude des différenciations structurales, géochimiques et minéralogiques dans une toposéquence de sols dérivés de roches ultrabasiques en Côte d'Ivoire. *Université Paris VII, UER des Sciences Physiques de la Terre., thèse 3e cycle, 135 p., multigr., 31 fig., 30 tabl., 8 planches photos.*

Wilson M. J. ,2004-Weathering of the primary rock forming minerals: processes, products and rates. *Clay Minerals, **39**, p 233-266.*