



**HAL**  
open science

# Caractéristiques pétrographiques et géochimiques et évolution diagénétique des bassins silicoclastiques mésoprotérozoïques intracontinentaux : Implications sur la genèse des gisements d'uranium de type discordance

Ahlam Ibrahim

## ► To cite this version:

Ahlam Ibrahim. Caractéristiques pétrographiques et géochimiques et évolution diagénétique des bassins silicoclastiques mésoprotérozoïques intracontinentaux : Implications sur la genèse des gisements d'uranium de type discordance. Sciences de la Terre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2007. Français. NNT : 2007NAN10086 . tel-01748255

**HAL Id: tel-01748255**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748255>**

Submitted on 29 Mar 2018

**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.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Ecole Doctorale **RP2E** : Ressources Procédés Produits Environnement  
Laboratoire **G2R** : Géologie et Gestion des Ressources Minérales et Energétiques

---

Faculté des Sciences & Techniques

UMR CNRS 7566

## THÈSE

*Présentée par*

**Ahlam IBRAHIM**

*(Assistante à l'Université de Tishreen – Lattaquié – Syrie)*

*En vue d'obtenir le titre de*

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY-I

*Spécialité : Géosciences*

---

### **CARACTERISTIQUES PETROGRAPHIQUES ET GEOCHIMIQUES ET EVOLUTION DIAGENETIQUE DES BASSINS SILICOCLASTIQUES MESOPROTEROZOÏQUES INTRACONTINENTAUX. IMPLICATIONS SUR LA GENESE DES GISEMENTS D'URANIUM DE TYPE DISCORDANCE**

---

*Soutenance publique le 13 Novembre 2007*

#### **MEMBRES DU JURY :**

Rapporteurs	<b>M. Maurice Pagel</b> : Professeur, Université d'Orsay Paris Sud <b>M. François Gauthier Lafaye</b> : Directeur de Recherche CNRS, UMR 7517, Strasbourg
Directeur de thèse	<b>M. Michel Cuney</b> : Directeur de Recherche, CNRS, UMR G2R, Nancy
Examineurs	<b>M. Michel Cathelineau</b> : Directeur de Recherche CNRS, UMR G2R, Nancy <b>M. Erkki Vanhanen</b> : AREVA, Service Géologique de Finlande <b>Mme. Luminita Grancea</b> : Ingénieur, AREVA

---

UMR CNRS 7566 G2R Géologie et Gestion des Ressources Minérales et Energétiques  
Université Henri Poincaré Nancy I, Faculté des Sciences, BP 239, 54506 Vandœuvre-Lès-Nancy Cedex



## **AVANT-PROPOS**

Ce travail entre dans le cadre d'une collaboration scientifique internationale entre la Syrie (mon cher pays), qui a financé ma bourse d'étude, et la France, qui depuis déjà 5 ans, me procure un grand épanouissement grâce à son peuple si accueillant et si chaleureux.

Je suis très reconnaissante envers tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au CREGU, dirigé par Monsieur **Pierre SCHUHMACHER**, pour leur gentillesse et pour m'avoir accueilli et donné les possibilités de réaliser ce travail.

Je veux exprimer mes plus sincères remerciements à tous les membres qui composent le jury et qui ont accepté de juger ce travail :

Monsieur **Michel CUNEY**, Directeur de Recherches au CNRS, qui a dirigé mes travaux de recherches pendant ces trois années de thèse (ainsi que mon DEA). C'est une expérience exceptionnelle d'avoir pu bénéficier de ses connaissances étendues, je m'estime chanceuse de travailler avec lui, j'ai apprécié son humanisme, sa patience, son enthousiasme et sa présence et suivie tout au long de cette thèse, je lui suis infiniment reconnaissante.

Monsieur **Maurice PAGEL**, Professeur à l'Université d'Orsay, et Monsieur **François GAUTHIER - LAFAYE**, Directeur de Recherche CNRS, pour leur aimable accord de participer à l'évaluation de ma thèse en tant que rapporteurs.

Monsieur **Michel CATHELINÉAU**, Directeur de Recherche CNRS et directeur de l'UMR G2R, d'abord pour sa gentillesse de m'avoir accueilli dans cet établissement et donné les possibilités de réaliser ce travail, et puis pour m'avoir donné l'honneur d'accepter la présidence du jury.

Madame **Luminita GRANCEA**, Ingénieur à AREVA, et Monsieur **Erkki VANHANEN**, Service Géologique de Finlande - AREVA, pour avoir accepté de juger ce travail en tant qu'examineurs.

Je dois un spécial remerciement à Monsieur **Marc BROUAND**, Géologue Pétrographe - Géochimiste, pour la contribution, de toute première importance, qu'il a amené à la réalisation de ce travail. Je lui exprime, ici, ma vive gratitude.

Je dois, également, un grand merci à Monsieur **Patrice BRUNETON**, Ingénieur à AREVA, d'avoir réalisé l'échantillonnage en Australie (bassin de Cariewerloo), et à Monsieur **Olli AIKAS**, Ingénieur au Service Géologique de Finlande d'avoir réalisé l'échantillonnage en Finlande (bassins de Satakunta et Muhos).

Je remercie infiniment tous les **G2Riens** de tous les niveaux qui sont collectivement responsables de l'ambiance familiale dont j'avais vraiment besoin :

A Soussou, ma collègue du bureau et ma petite sœur adorée, un grand merci pour tous les gestes sympathiques qui m'ont, pas mal de fois, profondément touché...et j'en suis reconnaissante.

A Jesse., amie très proche de mon cœur, qu'elle m'a fait découvrir des côtés de la vie française que je ne connaissais pas, merci!

A Anne Sylvie ANDRE, Régine MOSSER-RUCK, Marie-Christine BOIRON, Laurent RICHARD, Elsa PUIPIER, Thérèse LHOMME, Olivier VANDERHAEGHE, Chantal PEIFFERT, Laurence MANSUY, Danielle BARTIER, Roland MAIRET, Marie-Odile CAMPADIEU, Laurence MOINE, Christine LEONARD, Patrick LAGRANGE, Cédric DEMEURIE, Cédric MENETRIER, Jean Luc LEMINEUR, Olinda GIMELLO, Gilles BESSAQUES, Aurélien RANDI, vous tous qui m'avez soutenu pendant toutes ces années et m'avez aidé comme vous le pouviez, merci!

Je souhaite bon vent à mes compagnons thésards : Julien BOURDET, Olivier CARDON, Laurent, Alexandre et Alexei pour leur dernière ligne droite, Sandrine, Isabelle, Julien MERCADIER, Luc, David, Christophe, Olivier BELCOURT, Jérémy, Antonin, Stéphane et Gaëtan qui suivront.

Ma reconnaissance spéciale va à Lati, l'être le plus chère pour moi, merci pour tous les moments de bonheur qu'on a partagé. Sois sûre qu'ils resteront gravés dans ma mémoire et mon cœur à jamais...

Pour finir, et ce ne sont pas les moins chaleureux, j'adresse mes remerciements à mes chers amis, qui compte énormément pour moi, et qui étaient toujours là (Muhanned, Johnny, Mireille, Kassem, Naddouch et Fattoun). Rester surtout comme vous êtes.

*Ce travail,  
est particulièrement dédié à ma famille, si loin si proche...*



## **RESUME**

Une étude pétrographique, minéralogique et géochimique des bassins sédimentaires silicoclastiques intracontinentaux protérozoïques de Waterberg (Craton de Kaapvaal, Afrique du Sud), Cariewerloo (Craton de Gawler, Sud de l'Australie), Satakunta et Muhos (Bouclier Fennoscandien, Finlande), reposant en discordance sur un socle paléoprotérozoïque à archéen, a été réalisée. Une comparaison avec d'autres districts du monde d'âge et de lithologie semblables (le bassin d'Athabasca au Canada, le bassin de Kombolgie en Australie et le bassin de Pasha-Ladoga en Russie) auxquels sont associés les gisements d'uranium de type discordance les plus importants.

Les études réalisées ont permis de reconstituer la nature des phases détritiques et leur évolution au cours de la diagenèse et des événements hydrothermaux, afin d'évaluer l'intérêt que représentent les sédiments de ces bassins pour l'exploration d'uranium par comparaison avec les bassins fortement minéralisés de l'Athabasca et de Kombolgie.

Cette étude montre que les sédiments clastiques de tous ces bassins sont caractérisés par une forte immaturité des matériaux sédimentaires, une forte oxydation, ainsi qu'une diagenèse ou un métamorphisme de haute température. Ces sédiments riches en feldspath potassique et plagioclase avec fréquemment des clastes anguleux résultent d'un transport court depuis une zone source peu soumise à l'altération pédogénétique dans un contexte tectonique très actif, contrairement aux sédiments de l'Athabasca et de Kombolgie. Toutefois, des circulations importantes de fluides ont été mises en évidence au toit des socles des bassins de Cariewerloo et à un degré moins important à Satakunta et à Muhos, comme l'indique l'altération argileuse de ces roches. Cette altération étant toutefois modérée par rapport à celle observée dans les bassins de l'Athabasca et de Kombolgie. Ces circulations de fluides ont conduit à l'altération de zircon, ainsi qu'à la formation de chlorites ferrifères et de carbonates.

Mots clés : Waterberg, Cariewerloo, Satakunta, Muhos, Uranium, Discordance, Maturité de grès, Bassin Protérozoïque, Altérations hydrothermales.

## **ABSTRACT**

A mineralogical, petrographic and geochemical study of the proterozoic siliciclastic sedimentary intracontinental basins of Waterberg (Kaapvaal Craton, South Africa), Cariewerloo (Gawler Craton, South Australia), Satakunta and Muhos (Fennoscandian Shield, Finland), unconformably overlying archaean and paleoproterozoic basement, have been characterized and compared with other districts throughout the world similar in age and lithology (the basin of Athabasca in Canada, the basin of Kombolgie in Australia, and the basin of Pasha-Ladoga in Russia) which are associated with uranium ore deposits.

The realized study made it possible to reconstitute the nature of the detrital phases and their evolution during diagenesis and hydrothermal events, in order to evaluate the interests that represent the sediments of these basins for the exploration of uranium by reference to strongly mineralized Athabasca and Kombolgie basins.

This study shows that the clastic rocks of all of these basins are characterized by a high immaturity of sedimentary materials, a strong oxidation, as well as a diagenesis or a metamorphism of high temperature. These sediments, rich in potassic feldspar and plagioclase with frequently angular clasts, were transported over a short distance from the source area and subjected to a limited pedogenic alteration in a very active tectonic context, contrary to the sediments of the Athabasca and Kombolgie basins. However, significant fluid circulations took place as shown by the presence of an argillaceous alteration on the roof of the basement of the Cariewerloo, Satakunta and Muhos basins, as the argillaceous alteration. This alteration remains however moderate compared to that observed in the Athabasca and Kombolgie basins. These fluid circulations are related to zircon alterations, and essentially to the formation of Fe-chlorite and carbonate.

Key words: Waterberg, Cariewerloo, Satakunta, Muhos, Unconformity related deposits, Maturity of Sandstone, Proterozoic Basin, hydrothermal alterations.

---

*SOMMAIRE GENERAL*

---



**SOMMAIRE GÉNÉRALE**

AVANT PROPOS.....	3
RESUME ET ABSTRACT.....	7
SOMMAIRE GÉNÉRALE.....	11
LISTE DES FIGURES.....	19
LISTE DES TABLEAUX.....	27

**CHAPITRE I :**

LISTE DES FIGURES .....	32
LISTE DES TABLEAUX .....	32
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	33
METHODOLOGIE .....	39
i. Echantillonnage .....	39
ii. Etudes pétrographiques et minéralogiques .....	40
iii. Analyse des minéraux à la microsonde électronique .....	40
iv. Etude des inclusions fluides (IF) .....	41
v. Analyses chimiques en roche totale .....	43
vi. Diffraction des rayons X (DRX) .....	46
vii. Séparation des minéraux .....	47
viii. Datation par la méthode K – Ar .....	48
REFERENCES .....	50

**CHAPITRE II :**

TABLE OF FIGURES .....	60
LIST OF TABLE.....	61
ARTICLE I .....	62
Mineralogy, geochemistry and diagenetic evolution of the continental clastic Mesoproterozoic basin of Waterberg (Kapaal Craton, South Africa) Inferences on the genesis of unconformity related uranium deposits .....	62
Abstract .....	62

1. Introduction .....	63
2. Methodology .....	64
3. Regional overview .....	64
4. Characteristics of the sediments .....	67
5. Characteristics of the dolerite .....	70
6. Sandstone geochemical characteristics .....	70
6.1. Geochemistry of the major elements .....	70
6.2. Geochemistry of the trace elements .....	73
Zircon in the Waterberg basin .....	77
Monazite in the Waterberg basin .....	79
6.3. Cristalochimie of the clay minerals .....	80
7. Fluid inclusions (FI) study .....	83
8. Discussion and conclusions .....	83
8.1. Characteristics of the diagenetic evolution of the sediments .....	83
8.2. Degree of maturity of the sediments .....	84
8.3. pH conditions .....	85
8.4. Redox conditions .....	85
8.5. P-T conditions of the thermal events .....	85
8.6. Evidence of hydrothermal alteration .....	85
8.7. Global favourability of the basin for the presence of U mineralization .....	85
REFERENCES .....	87

### **CHAPITRE III :**

TABLE OF FIGURES .....	97
LIST OF TABLES .....	99
ARTICLE II .....	100
Mineralogy, geochemistry and diagenetic evolution of the continental clastic Mesoproterozoic basin of Cariewerloo (Gawler Craton, South Australia). Inferences on the genesis of unconformity related uranium deposits .....	100
Abstract .....	100
1. Introduction .....	102
2. Methodology .....	102
3. Regional overview .....	105

4. Petrographic and mineralogical characteristics of the basement .....	107
4.1. Metamorphic basement .....	107
4.2. Hiltaba granitoids .....	109
4.3. Gawler Range Volcanics .....	109
5. Petrographic and mineralogical characteristics of the sediments .....	112
5.1. The Pandurra Formation .....	112
5.2. Blue Range Formation .....	118
6. Sandstone geochemical characteristics .....	121
6.1. Geochemistry of the major elements .....	121
6.2. Geochemistry of the trace elements .....	123
Zircon alteration in the Cariewerloo basin .....	128
6.3. Evolution of the geochemical parameters along the lithostratigraphic column...130	
6.4. Chemistry of the clay minerals .....	133
7. Fluid inclusions (FI) study .....	137
8. Discussion and conclusions .....	139
8.1. Nature of the clastic material and conditions of sedimentation .....	139
8.2. Importance of diagenesis and permeability of the sediments .....	139
8.3. pH conditions .....	140
8.4. Redox conditions .....	140
8.5. Evidence of evaporites .....	141
8.6. P-T conditions of the thermal events .....	142
8.7. Evidence of hydrothermal alteration .....	142
8.8. Diagenetic/hydrothermal alteration of accessories .....	142
8.9. The basin and/or basement as a uranium source .....	143
8.10. Nature and favourability of the basement lithologies as uranium sources.....144	
REFERENCES .....	145

#### **CHAPITRE IV :**

TABLE OF FIGURES .....	152
ARTICLE III .....	155
Mineralogy, geochemistry and diagenetic evolution of the continental clastic Proterozoic basins. The example of the Jotnian in the Fennoscandian shield. Implications on the genesis of unconformity related U- deposits .....	155

Abstract .....	155
1. Introduction .....	157
2. Methodology .....	158
3. Geological setting .....	160
4. Characteristics of the basement .....	163
5. Characteristics of the sediments .....	165
6. Sandstone geochemical characteristics .....	173
Zircon in the Satakunta basin .....	177
Monazite in the Satakunta basin .....	182
7. Cristalochimie of argillaceous minerals .....	183
8. K - Ar analyses on potassic feldspars .....	188
9. Fluid inclusions (FI) study .....	188
10. Discussion and conclusions .....	190
10.1. Characteristics of the diagenetic evolution of the sediments .....	190
10.2. Degree of maturity of the sediments .....	191
10.3. pH conditions .....	191
10.4. Redox conditions .....	191
10.5. P-T conditions of the thermal events .....	192
10.6. Evidence of hydrothermal alteration .....	192
Perspectives .....	193
REFERENCES .....	194

## **CHAPITRE V :**

SYNTHESE ET DISCUSSION .....	204
1. Nature du matériel sédimentaire et des conditions de sédimentation .....	205
2. Caractéristiques de l'évolution diagénétique et de la perméabilité des sédiments .....	209
3. Les bassins comme source d'uranium .....	210
➔ <i>Abondance des minéraux accessoires porteurs d'uranium</i> .....	210
➔ <i>Lessivage des terres rares lourdes et rapports HoN/Ho*</i> .....	211
➔ <i>Altération de la monazite et rapports Th/La</i> .....	212
➔ <i>Teneurs en uranium et rapports Th/U</i> .....	213
➔ <i>Altération des zircons et rapports Zr/Y</i> .....	215
4. Conditions de pH .....	217



5. Conditions de fO <sub>2</sub> .....	218
6. L'évidence d'une altération hydrothermale .....	219
7. Evolution pression - température des bassins .....	220
8. Composition des fluides diagénétiques .....	221
9. Favorabilités du socle en tant que source ou piège pour l'uranium .....	223
10. Contexte paléogéodynamique et paléolatitudes des bassins .....	224
11. Evaluation de la favorabilité relative des bassins étudiés .....	227
REFERENCES .....	233

**CHAPITRE VI :**

CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	239
----------------------------	-----



---

*LISTE DES FIGURES*

---



## LISTE DES FIGURES

**CHAPITRE I :**

- Figure I. 1: Diagramme chimico - minéralogique de quartz - indice de peraluminosité (dérivé de Debon et Le Fort, 1983, 1988) avec quartz, feldspath et les minéraux principaux d'altération.....44
- Figure I. 2 : Diagramme chimico - minéralogique  $Na + K / (Al - (Na + K)) / 2 / (Mg + Fe + Mn) / 3$  pour la discrimination argiles - feldspaths.....45
- Figure I. 3 : Diagramme chimico - minéralogique de  $Na/Al - K/Al$  pour discriminer les proportions de plagioclase - feldspath (K) – argiles.....45

**CHAPITRE II :**

- Figure II. 1: Map of Waterberg basin in South Africa, with the locality of the studied borehole RH1/72. .... 66
- Figure II. 2: Silicified sandstones with quite visible overgrowths in the basin of Waterberg (212.3 - 1375.9 m). Carbonates and chloritic neo-formations are frequent in the matrix (1012 - 1375.9 m) or in fractures (724 m). Potassic feldspars are sometimes quite altered (1330.5 m). .... 68
- Figure II. 3: Silicified sandstones with quite visible overgrowths in the basin of Waterberg (212.3 - 1375.9 m). Carbonates and chloritic neo-formations are frequent in the matrix (1012 - 1375.9 m) or in fractures (724 m). Potassic feldspars are sometimes quite altered (1330.5 m). .... 68
- Figure II. 4: Mineral paragenesis established in Waterberg sandstones. The diagram represents successively detritic minerals deposition, diagenesis or metamorphism stages. ....69
- Figure II. 5: The dolerites are characterized by: I. of twinned clinopyroxenes, II. of the myrmekitic structures of feldspars, III. Chloritized augite, IV & V. pyroxenes replaced partially by amphibole and feldspars, VI, VII & VIII. Plagioclase twinned, biotite, and magnetite. .... 70
- Figure II. 6: Sediments of Waterberg in the quartz - peraluminous index diagram. .... 71
- Figure II. 7: Pyroxene composition of sample 1411.6 m in the triangular diagram of clinopyroxene. .... 71

Figure II. 8: Relative proportions of feldspars - clays - micas (independently of the quantity of quartz) diagram for the sediments of Waterberg. ....	72
Figure II. 9: Na/Al versus K/Al diagram allows discriminating the relative proportions of plagioclase, potassic feldspar and clays in the sediments of the Waterberg basin. ....	72
Figure II. 10: Trace elements abundances of the sandstones of Waterberg normalized to the sandstones of Erica 1 drill core (Athabasca). ....	73
Figure II. 11: Th – La (ppm) diagram for the sediments of Waterberg. ....	74
Figure II. 12: Th - U diagram for the sediments of Waterberg basin. ....	74
Figure II. 13: Th/U-Th/La diagram for the sediments of Waterberg. ....	75
Figure II. 14: Th/La - Ho (N)/Ho* diagram for the sediments of Waterberg. ....	76
Figure II. 15: K - Rb diagram for the sediments of Waterberg. ....	76
Figure II. 16: Zr - Y diagram for the sediments of Waterberg. ....	77
Figure II. 17: Evolution of Th and U concentrations, and Th/La, Th/U, Zr/Y, Ho (N)/Ho* ratios with the depth in the basin of Waterberg. ....	77
Figure II. 18: Xenotime replacing zircon (i), generally well developed primary zoning (ii, iii) with a slight alteration (ii-iii-iv-v-vi), sometimes inclusions of apatite, monazite and quartz (vi). Detrital monazite crystals are common (vii-viii) in the sediments of Waterberg. ....	78
Figure II. 19: Substitution of Zr + Si + Hf by U in zircons from the sandstone of Waterberg.....	78
Figure II. 20: Substitution of Zr + Si + Hf by Al + P + Ca + Fe + Y + U in zircons from the sandstone of Waterberg. ....	79
Figure II. 21: Substitution of P + REE by Si + Ca + Th + U + Y in detrital monazites from the Waterberg sandstones. ....	79
Figure II. 22: Classification of white micas of Waterberg in a diagram Si - Al - (Fe + Mg) ( <i>Monier, 1985</i> ). ....	80
Figure II. 23: Characterisation of types of micas of Waterberg in the diagram of <i>Velde (1977)</i> . ....	81
Figure II. 24: Nature of chlorites of Waterberg in the diagram of <i>Foster (1962)</i> . ....	81
Figure II. 25: Classification of chlorites of Waterberg in triangular diagram Al (VI) – Mg – Fe (Chlorites of Athabasca in <i>Lorilleux, 2001</i> as a reference). ....	82
Figure II. 26: Diagram Al (VI) - Al (IV) applied on studied chlorites in the Waterberg samples. ....	82

**CHAPITRE III :**

Figure III. 1: Distribution of Mesoproterozoic rocks in the Gawler craton (South Australia), with localization of studied drill holes. (Department of Minerals and Energy South Australia). .....	103
Figure III. 2: Stratigraphic column in studied drill cores in Cariewerloo basin. Pandurra formation is composed of four units: .....	104
Figure III. 3: Lithostratigraphic section of the Eastern Gawler Craton (Mesoproterozoic). .	106
Figure III. 4: Stratigraphic column in studied drill cores in the basement under Cariewerloo basin. ....	107
Figure III. 5: In CSD1 (9321), at 1155.7 m: fine fractures are filled by small crystals of tourmaline, chloritic neoformations are abundant. At 1183.2 m: a fracture with sulphures: chalcopyrite then position of pyrite. At 842.75 m: euhedral brown and green or yellowish garnet. ....	108
Figure III. 6: Figure III. 6: In PYI (9322) drill hole, microdolerite, with vesicules filled by carbonates, fluorite, hematite, quartz, chlorite and tourmaline. ....	110
Figure III. 7: In PYI (9322) drill hole, at 613.55 m, corroded, rounded grains of quartz, with silicifications are surrounded by iron oxides. There are potassic feldspar overgrowths. In DRD1 drill hole, at 1066.9 m fractures are filled by iron oxides and neoformed chlorite. ....	113
Figure III. 8: In PY 1 drill hole: detrital quartz grains are rounded or corroded, weakly deformed, of different size. In ASD 2 drill hole strong silicifications are present. ...	114
Figure III. 9: In ASD2 (9312) drill hole, corroded grains of quartz with weak silicifications, carbonated or sericitic matrix. Accessory minerals are abundant (ex. zircon). ....	115
Figure III. 10: In ASD2 (9312) drill hole, titanium dioxides are abundant, chloritic neoformation, clasts of schist are abundant; plates of muscovites are abundant. ....	116
Figure III. 11: In ASD2 (9312) drill hole, globules of carbonaceous matter (sometimes surrounded by titanium dioxides); carbonates associated with pyrite and sulphates. ....	116
Figure III. 12: In PYI (9322) drill hole, at 167.8 m: quartz grains are corroded deformed, of different size. .In CSD1 (9321) drill hole, at 401.4 m: neoformations of chlorite replace rounded minerals and surrounded by carbonates. At 646 m there are two generations of silicification. In ASD2 (9312) drill hole, at 812.9 m: a fracture is filled by carbonates and anhydrites. At 817 m neoformations of chlorite are abundant in	

grains of altered potassic feldspar. In DRD 1 (9326) drill hole, at 391.1 m, silicifications are significant. ....	118
Figure III. 13: Mineral paragenesis established in Cariewerloo and Itiledoo sandstones. The diagram represents successively detritic minerals deposition, diagenesis or metamorphism stages. ....	120
Figure III. 14: Diagram of quartz versus peraluminosity index for the sediments of the Cariewerloo basin allowing the determination of the relative proportions quartz – clay minerals – feldspars – carbonates from whole rock geochemical analyses. ....	121
Figure III. 15: Diagram discriminating the relative proportions of feldspars-clay minerals-micas (independently of the quantity of quartz) for the sediments of Cariewerloo. ..	122
Figure III. 16: Na/Al versus K/Al diagram allowing discriminating the proportions of plagioclases - potassic feldspars - clay in the sediments of the Cariewerloo basin. ..	123
Figure III. 17: Th - U diagram for the sediments of Cariewerloo. ....	124
Figure III. 18: Diagram Th - La for the sediments of Cariewerloo. ....	125
Figure III. 19: Th/U - Th/La diagram for the Cariewerloo sediments. ....	126
Figure III. 20: Partial U – Total U diagram for the sediments of Cariewerloo. It allows determining the proportion of mobile U in the samples. ....	126
Figure III. 21: Rare Earth Elements patterns normalized to CI chondrites (Orgueil). ....	127
Figure III. 22: Zr - Y diagram for the Cariewerloo sediments. ....	128
Figure III. 23: (i): primary zoning is generally well developed in zircon crystals. Alteration of the crystals is also observed (ii-iii-iv-v- vi-vii). Inclusions of hematite, sulphate, and Ti-dioxides are common (v-vi) of the Cariewerloo sediments. ....	128
Figure III. 24: U versus P plot of unaltered (red square) and altered domains of zircons from the Cariewerloo sediments. ....	129
Figure III. 25: Substitution of Zr + Si + Hf by Al + P + Ca + Fe + Y +Th+ U in zircons from the sediments of Cariewerloo. ....	129
Figure III. 26: Variation of some geochemical parameters in the Pandurra formation of (drill core PY 1-9322), basin of Cariewerloo. Blue Fields = non-altered sediments. ....	130
Figure III. 27: Variation of the geochemical parameters in the Pandurra formation along the CSD 1 - 9321 drill core in the basin of Cariewerloo. ....	131
Figure III. 28: Variation of geochemical parameters in the formation of Pandurra along DRD 1 - 9326 drill core in of the basin of Cariewerloo. ....	132
Figure III. 29: Variation of geochemical parameters in the Pandurra formation along drill hole ASD 2-9312 in the Cariewerloo basin.....	132



Figure III. 30: Variation of geochemical parameters in the DDH 893-1-9316 drill core in the basin of Itiledoo. ....	133
Figure III. 31: Classification of white micas of Cariewerloo in a diagram Si - Al - (Fe + Mg). ( <i>Monier, 1985</i> ). ....	134
Figure III. 32: Characterisation of types of micas of Cariewerloo in the diagram of <i>Velde (1977)</i> . ....	135
Figure III. 33: Nature of chlorites of Cariewerloo in the diagram of Hey (1954). ....	135
Figure III. 34: Classification of chlorites of Cariewerloo in triangular diagram Al (VI)-Mg-Fe (Chlorites of Athabasca in <i>Lorilleux, 2001</i> ). ....	136
Figure III. 35: Diagram Al (VI)-Al (IV) applied on studied chlorites in the Cariewerloo samples. ....	136
Figure III. 36: Isochors of the different types of fluid inclusions found in the diagenetic overgrowths of detrital quartz from the basin of Cariewerloo. ....	137

#### **CHAPITRE IV :**

Figure IV. 1: Simplified geological map of Finland highlighting the Mesoproterozoic Phanerozoic rock units ( <i>Kohonen and Rämö, 2005</i> ). ....	161
Figure IV. 2: Geological map of the basin of Satakunta. 1-sandstone, 2-diabase 1260 ± 10 Ma, 3-rapakivi granite, 4-Paleoproterozoic rocks. (Geological Survey of Finland: GTK).....	162
Figure IV. 3: Geological map of the basin of Muhos. (Geological Service of Finland: GTK). Position of the drill cores (Tupos 001, MH39-001 and R 03). ....	163
Figure IV. 4: biotite and muscovite (R01/30 m); micaschists with plates of graphite in the micas (R06/39.50 m). Pegmatoid (R06/34.70 m). Iron oxides underline cleavages of white mica (R06/34.70). ....	164
Figure IV. 5: In Pori 1 drill hole, detritic micas at 619.00 m, sericitic/hematitic plages in Satakunta sandstone (219.50, 324.80 and 479.20 m). ....	166
Figure IV. 6: Laumontite between detritic grains (Pori 1/401.80 m), calcic matrix around detritic grains of quartz (Pori 1/236.50 m), microconglomerate with accessory minerals (especially zircon) (Pori 1/31.50 m). ....	167
Figure IV. 7: Silicified sandstones with overgrowths in Satakunta (Pori 1 drill hole). ....	168

Figure IV. 8: Concentrations of accessory minerals in Satakunta sandstone (Pori 1 drill hole).....	169
Figure IV. 9: disseminated accessory minerals in Satakunta sandstone: tourmaline (236.50 - 324.80 m), titanite (249 & 424.25 m), monazite (236.50 m), zircon (324.80 m).....	170
Figure IV. 10: In Muhos basin, silicified sandstone with overgrowths (R 03 drill hole / 85.50 and 54.10 m). Disseminated accessory minerals in sandstone and siltstone of Muhos: anatase-R03/85.50 m, titanite-Tupos1/975.00 m, tourmaline and monazite-R03/85.50 m. ....	171
Figure IV. 11: Neoformations of titanite and allanite on detrital rounded titanite and epidote in the Satakunta sandstones; drill core Pori 1. ....	172
Figure IV. 12: Mineral paragenesis established in the Satakunta sandstones. The diagram represents successively detritic minerals deposition, diagenesis or metamorphism stages. ....	173
Figure IV. 13: Satakunta and Muhos sediments in the quartz – peraluminous index diagram.....	174
Figure IV. 14: Satakunta and Muhos sediments in the feldspars – clays – micas diagram.....	175
Figure IV. 15: Satakunta and Muhos sediments in a Na/Al – K/Al diagram. ....	175
Figure IV. 16: Normalisation of trace elements of the sandstones of Satakunta and Muhos to the sandstones of Erica1 drill core (Athabasca). ....	176
Figure IV. 17: Th-U diagram for the sediments of Muhos (ringed symbols) and Satakunta. ....	178
Figure IV. 18: Th-La diagram for the sediments of Muhos and Satakunta. ....	178
Figure IV. 19: K - Rb diagram for the sediments of Muhos and Satakunta. ....	179
Figure IV. 20: Spectra of rare earth elements of sediments of Satakunta and Muhos basins Normalized to chondrites. ....	179
Figure IV. 21: Zr - Y diagram for the sediments of Muhos and Satakunta. ....	180
Figure IV. 22: Evolution of Th/La, Th/U, Zr/Y ratios and $\sum$ REE, Ho (N) /Ho*, Th, U values with depth in Pori 1 drill core. ....	180
Figure IV. 23: Substitution of Zr + Si + Hf by P + Ca + Fe + Y + U in zircons from the sandstone of Satakunta. ....	181

Figure IV. 24: Substitution of Zr + Si + Hf by U in zircons from the sandstone of Satakunta.....	182
Figure IV. 25: Substitution of P + REE by Si + Ca + Th + U + Y in detrital monazites from the conglomerates of R1 and R6 drill holes of Satakunta basin.....	183
Figure IV. 26: Classification of white micas of Satakunta and Muhos in a diagram Si – Al - (Fe + Mg) ( <i>Monier, 1985</i> ). .....	184
Figure IV. 27: Characterization of types of micas in the diagram of <i>Velde (1977)</i> . .....	184
Figure IV. 28: Nature of chlorites of Satakunta and Muhos in the diagram of <i>Foster (1962)</i> .....	185
Figure IV. 29: Classification of chlorites of Satakunta and Muhos in triangular diagram Al (VI)-Mg-Fe, (Chlorites of Athabasca in <i>Lorilleux, 2001</i> ). .....	186
Figure IV. 30: Diagram Al (IV)-temperature of crystallization applied on chlorites of Satakunta and Muhos. ....	186
Figure IV. 31: Diagram Al (VI)-Al (IV) applied on studied chlorites in the Satakunta and Muhos samples. ....	187
Figure IV. 32: Diagram Al versus (Ti + Fe + Y + Ce + Nd) for detrital titanites and their overgrowths in the sandstones of Satakunta. ....	187
Figure IV. 33: Fluid inclusions in the overgrowths of Satakunta sandstone. ....	189
Figure IV. 34: Isochore of the inclusion fluids found in diagenetic overgrowths of detrital quartz of Satakunta basin. ....	190

## **CHAPITRE V :**

Figure V. 1 : Distribution des sédiments des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos comparées à celles des sédiments du bassin de l’Athabasca (Rumple Lake sondage de référence non minéralisé), et McArthur (sondages dans l’environnement du gisement) (source : banque de données CREGU) dans un diagramme Quartz – indice de peraluminosité.....	207
Figure V. 2 : Diagramme K-Rb des sédiments des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos.....	208
Figure V. 3 : Normalisation des éléments en trace des grès de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et de Muhos à la moyenne des grès du sondage Erica 1 (Athabasca).....	211
Figure V. 4 : Diagramme Ho (N) / Ho* - Th / La pour les sédiments de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos.....	213

Figure V. 5: Diagramme Th - U pour les sédiments de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos.....214

Figure V. 6 : Diagramme Zr - Y des sédiments des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta, Muhos, Rumble Lake, et McArthur.....216

Figure V. 7 : Substitutions de Zr, Si et Hf par Al, P, Ca, Fe, Th, Y et U dans les zircons des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos.....216

Figure V. 8 : Solubilité des oxydes d'uranium IV, VI et  $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$  en fonction de pH à T = 25 °C, P = 0.1 MPa, d'après les données thermodynamiques de Guillaumont et al., (2003), de Rai et al., 1990 et de Yamamura et al., (1998), (calculé par Chinh Ngyen-Trung).....217

Figure V. 9 : Classification des chlorites de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et de Muhos dans le diagramme triangulaire Al VI-Mg-Fe.....218

Figure V. 10 : Diagramme  $T_{\text{mice}}/\text{Th}$  obtenu des surcroissances de quartz des grès des bassins de Cariewerloo, de Satakunta et de Kombolgie.....222

Figure V. 11 : Reconstruction de la supercontinent proposée Columbia (Zhao et al., 2002, 2004) avec la position des bassins Mésoprotérozoïques gréseux.....225

Figure V. 12 : Échelle de temps géologique avec les bassins gréseux Mésoprotérozoïques principaux. Les orogènes majeures sont également indiqués.....226

---

*LISTE DES TABLEAUX*

---



**LISTE DES TABLEAUX**

**CHAPITRE I :**

Tableau I. 1 : comparaison des caractéristiques des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec celles de l’Athabasca.....37

Tableau I. 2 : Liste des sondages échantillonnés dans le bassin de Cariewerloo.....40

Tableau I. 3 : Liste des liqueurs utilisées pour la séparation des feldspaths potassiques et des titanites.....48

**CHAPITRE II :**

Table II. 1: Summary of the previous fluid inclusion data obtained in diagenetic quartz of the Waterberg basin. .... 83

**CHAPITRE III :**

Table III. 1: characteristic of sediments of Cariewerloo and Itiledoo basins.....119

**CHAPITRE V :**

Tableau V. 1 : comparatif des caractéristiques des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec celles d’Athabasca.....205

Tableau V. 2 : comparatif des valeurs moyennes et écarts types des éléments : Th, U, La, Zr, Y, Nb, Ta, et  $\Sigma$ REE dans les bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec celles de l’Athabasca.....211

Tableau V. 3 : Les valeurs de la température de fin de fusion de glace, la température de l’eutectique, et température d’homogénéisation dans les inclusions fluides étudiées dans les bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Kombolgie.....222

Tableau V. 4 : Comparaison de degré de maturité, silicification, et altération entre les bassins étudiés (Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos) et les Bassins de l’Athabasca au Canada et Pasha Ladoga en Russie.....227





---

*CHAPITRE I*

*INTRODUCTION GENERALE*

---



**TABLE DE MATIERES**

LISTE DES FIGURES.....	32
LISTE DES TABLEAUX.....	32
INTRODUCTION GENERALE.....	33
METHODOLOGIE.....	39
i. Echantillonnage.....	39
ii. Etudes pétrographiques et minéralogiques.....	40
iii. Analyse des minéraux à la microsonde électronique.....	40
iv. Etude des inclusions fluides (IF).....	41
v. Analyses chimiques en roche totale.....	43
vi. Diffraction des rayons X (DRX).....	46
vii. Séparation des minéraux.....	47
viii. Datation par la méthode K – Ar.....	48
REFERENCES.....	50

**LISTE DES FIGURES**

Figure I. 1 : Diagramme chimico - minéralogique de quartz - indice de peraluminosité (dérivé de Debon et Le Fort, 1983, 1988) avec quartz, feldspath et les minéraux principaux d'altération. ....	44
Figure I. 2 : Diagramme chimico - minéralogique $Na + K / (Al - (Na + K)) / 2 / (Mg + Fe + Mn) / 3$ pour la discrimination argiles - feldspaths. ....	45
Figure I. 3 : Diagramme chimico - minéralogique de $Na/Al - K/Al$ pour discriminer les proportions de plagioclase - feldspath (K) - argiles. ....	45

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I. 1 : Comparaison des caractéristiques des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec celles de l'Athabasca. ....	37
Tableau I. 2 : Liste des sondages échantillonnés dans le bassin de Cariewerloo. ....	40
Tableau I. 3 : Liste des liqueurs utilisées pour la séparation des feldspaths potassiques et des titanites. ....	48

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le Paléoprotérozoïque qui s'étend de 2,5 à 1,6 Ma, est caractérisé par plusieurs orogènes majeurs dont certains ont fourni les matériaux sources pour la formation des bassins qui font l'objet de cette étude. Parmi ceux-ci nous citerons les orogènes Barramundi en Australie, Svécofennienne dans les pays scandinaves et au NW de la Russie et Trans-Hudson au Canada qui ont donné naissance au premier supercontinent bien caractérisé : la Nuna (*Bleeker, 2003*). Le Paléoprotérozoïque est une période remarquable dans l'histoire de la Terre car c'est au cours de celle-ci que survient une augmentation importante de la quantité d'oxygène dans l'atmosphère terrestre vers 2,2 Ga, donnant naissance aux formations silicoclastiques rouges remplissant les bassins intracratoniques que nous avons étudiés dans le cadre de ce mémoire. La fin du Paléoprotérozoïque et le début du Mésoprotérozoïque est une période post-orogénique qui représente donc une période de calme tectonique s'étendant sur une très longue période de plus de 500 millions d'années avec peu d'équivalents dans l'histoire de la Terre. C'est pendant cette période que de nombreux et vastes (plusieurs centaines de kilomètres d'extension et 5 à 7 km de puissance) bassins intracratoniques ont été formés et ont évolué.

A la transition Paléoprotérozoïque - Mésoprotérozoïque, des dépôts économiques d'uranium se sont formés à la base de tels bassins intracratoniques. Ils correspondent aux gisements associés aux discordances ou de type discordance (*Kyser et al., 2000*).

La base de ces bassins a été remplie par des formations rouges silicoclastiques très puissantes (de l'ordre de 1 à 1,5 km) composées de grès perméables, à grains moyens à grossiers et habituellement d'origine fluviale et généralement très riches en quartz. Les grès lacustres ou éoliens peuvent également être présents.

Les gisements d'uranium associés aux discordances protérozoïques représentent la ressource d'uranium ayant les teneurs moyennes de loin les plus élevées actuellement dans le monde (*Jefferson et al., 2003; Thomas et al., 2000*).

Ces gisements se localisent généralement au voisinage de la discordance entre un socle métamorphique et plutonique et des unités sédimentaires non déformées appartenant à un bassin plus jeune, discordant sur ce socle et d'âge Protérozoïque inférieur à moyen. La minéralisation, généralement d'aspect filonien, se localise soit dans les grès, soit dans le socle, soit encore à cheval sur la discordance. Les corps minéralisés sont plus

particulièrement contrôlés par des discontinuités tectoniques enracinées dans des formations graphiteuses appartenant au socle (*Ruzicka, 1995; Tourigny et al., 2001*).

Ce type de minéralisation est le mieux reconnu dans le bassin d'Athabasca au Canada, et le bassin de Kombolgie en Australie (*Ruzicka, 1995*). Les gisements ont généralement une teneur moyenne de quelques pourcents mais peuvent être très riches comme celui de McArthur River (teneur moyenne de 19 %  $U_3O_8$ , avec des zones atteignant plus de 50 %). L'uranium est associé à du nickel et de l'or. D'autres bassins présentent un potentiel uranium moins important tel que ceux du Thelon (Nunavut, Canada) et de Karku (Karélie, Russie). Ce type de gisement représente actuellement plus de 33 % de la production mondiale. Il a été reconnu pour la première fois lors de la découverte du gisement de Rabbit Lake en bordure NE du bassin Athabasca en 1968.

Dans le modèle le plus généralement admis pour les gisements d'uranium associés aux discordances protérozoïques et défini principalement à partir des études menées sur le bassin de l'Athabasca, le dépôt d'uranium résulte soit du mélange de saumures salines, oxydées, uranifères provenant du bassin gréseux avec un fluide réduit (méthane?) issu de zones des failles intersectant la discordance (*Kotzer et Kyser, 1995; Ruzicka, 1995; Fayek et Kyser, 1997*), soit de la réduction du fluide oxydé par interaction avec certaines lithologies du socle (schistes à graphite et sulfures) (*Lorilleux et al., 2003; Derome et al., 2004; Kister et al., 2003*).

Cependant, il existe dans le monde de nombreux autres bassins présentant des âges et certaines caractéristiques similaires à ceux des bassins de l'Athabasca et de Kombolgie mais dans lesquels aucune minéralisation uranifère n'est connue. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi d'étudier plusieurs bassins protérozoïques déposés après l'oxy-atmoversion à des périodes plus ou moins éloignées de celle-ci, formés avant ou après la période orogénique à 1,8 Ga et sélectionnés dans trois régions différentes du monde :

- dans le Transvaal en Afrique du Sud avec le bassin de **Waterberg**, le plus proche de la période d'oxy-atmoversion, déposé entre 2,06 et 1,9 Ga, c'est à dire juste avant la période orogénique à 1,8 Ga précédent les dépôts des bassins fortement minéralisés de l'Athabasca et de Kombolgie;
- le sud de l'Australie avec les bassins de **Cariewerloo** et **d'Itiledoo** dont les formations ont été déposées entre 1,58 et 1,45 Ga, après la formation de la plupart des gisements d'uranium associés au bassin de Kombolgie localisé à quelques

milliers de km (~ 2400 km) plus au nord et pendant la formation des gisements d'uranium les plus anciennement datés du bassin de l'Athabasca;

- l'ouest de la Finlande avec les bassins de **Satakunta** et de **Muhos**, reliques sur le continent d'un bassin beaucoup plus large existant sous le golfe de Bothnie et un peu plus jeune que le bassin de Cariewerloo, avec une période de dépôt comprise entre 1,56 et 1,30 Ga.

**Le bassin de Waterberg** (Fig. II. 1) représente une succession sédimentaire silicoclastique rouge très épaisse (> 1500 m) et très vaste d'âge Paléoprotérozoïque. Il est préservé dans le centre et le nord-ouest du Transvaal en Afrique du Sud ainsi que dans la région orientale du Botswana, sur une surface d'approximativement 60 000 km<sup>2</sup>. Il est déposé en discordance sur les formations métamorphiques et plutoniques archéennes et paléoprotérozoïques du Craton du Kaapvaal (*Hanson et al., 2004*). Le dépôt des sédiments du bassin de Waterberg aurait commencé pendant la mise en place des roches felsiques du complexe de Bushveld aux environs de 2,06 Ga (*Allsopp et al., 1989*). **La formation de Mogalakwena** de 1250 à 1500 m d'épaisseur (*Callaghan et al., 1991*), est localisée au nord et nord-est du bassin principal de Waterberg. Elle passe latéralement en transition avec la formation de Makgabeng. Là où cette dernière n'est pas développée, la formation de Mogalakwena recouvre en discordance des roches pré-Waterberg. Ces formations se sont déposées dans un contexte de grandes rivières anastomosées en tresse (*Tickell, 1975*) et provenant de montagnes localisées au nord nord-est. La formation de Mogalakwena est pénétrée par des corps irréguliers, sills et des dykes de dolérite. L'âge U-Pb de ces intrusions qui est de ~ 1,879 Ga (*Hanson et al., 2004*) contraint l'âge maximum de dépôt de la formation Mogalakwena et des unités sous-jacentes du bassin de Waterberg.

**Les bassins** mésoptérozoïques **de Cariewerloo** et **d'Itiledoo** (Fig. III. 1) se sont déposés sur le **Craton de Gawler** en Australie du Sud. Ils sont remplis respectivement par **la formation de Pandurra** et de **Blue Range Beds**. Ces sédiments clastiques fluviaux très épais sont mal triés et non déformés. Leur dépôt a commencé peu de temps après une phase volcano-plutonique majeure (1595 - 1585 Ma) correspondant aux plutons calcalcalins fortement potassiques de la suite Hiltaba et aux volcanites de Gawler Range de même nature géochimique et de même âge, et a continué jusque vers 1450 Ma.

**Le bassin de Cariewerloo** ne fait que 120 km de large mais est allongé vers le nord-ouest sur environ 450 km. Il s'agit d'un demi-graben avec une inclinaison régionale vers le nord-est. Il est limité par des failles principales de direction nord-ouest encadrant la haute partie du socle près d'Olympic Dam et de Mount Gunson. Des failles de direction nord-est, plus récentes, perturbent la marge orientale. Pour *Cowley (1993)*, le dépôt de ces formations silicoclastiques a, en grande partie, précédé les failles responsables du demi-graben. Des failles syn-dépositionnelles peuvent être impliquées localement près de la marge nord-est.

**Les bassins Satakunta et Muhos** en Finlande (Fig. IV. 1) sont des bassins silicoclastiques Mésoprotérozoïques (appelés jotniens dans cette région) situés en discordance sur un socle paléoprotérozoïque déformé et métamorphisé pendant l'orogénèse svécofennienne : 1,9 - 1,8 Ga.

**Le bassin de Satakunta**, situé à l'ouest de la Finlande, au sud de la province de Pori, est orienté SE-NW. Il ne s'étend que sur 100 km pour une largeur de 20 km sur le continent, mais se poursuit plus largement sous le golfe de Bothnie (Fig. IV. 1; 2). Il est bordé dans sa partie sud par le massif de granite rapakivi de Laitila daté vers 1570 Ma (*Vaasjoki, 1977*). Il est recoupé par de nombreux sills et filons de diabase ( $1,26 \pm 10$  Ga; *Suominen, 1991*). Des filons de diabase plus anciens que le granite (1,65 Ga; *Pihlaja, 1987*) ont également été observés. Le dépôt des grès est donc compris entre au plus 1,5 Ga et au moins 1,3 Ga (*Simonen, 1980*). Selon un modèle gravimétrique, l'épaisseur de grès atteindrait un maximum de 1800 m au NW de Pori (*Elo, 1976*).

**Le bassin de Muhos** (MuF), localisé au NW de la Finlande, est allongé en EW de Muhos à l'île de Hailuoto (il s'étend sur ~ 50 km) et se poursuit aussi sous le golfe de Bothnie. Il est presque totalement couvert de dépôts quaternaires (*Kousa et Lundqvist, 2000*). Sa plus grande épaisseur observée est de 895 m. La formation de Muhos a été corrélée avec les grès de Satakunta sur la base de datations  $^{40}\text{K} - ^{40}\text{Ar}$  des micas des grès qui indiquent une diagenèse vers 1,3 Ga (*Simonen, 1960*). A l'ouest de l'île Hailuoto, les sédiments ont une épaisseur probable de moins de 300 m (*Veltheim, 1969*) avec une unité basale reposant sur le socle svécofennien. L'unité inférieure est corrélée avec la formation de Muhos (*Veltheim 1969*) et l'unité supérieure (Hailuoto Formation : HIF) serait vendienne, d'après les microfossiles (*Tynni et Donner, 1980*).



Les trois bassins sélectionnés présentent tous un remplissage prédominant par des sédiments silicoclastiques fortement oxydés et déposés essentiellement en milieu intracontinental (Tableau I. 1). Ils permettent de couvrir la période faisant suite immédiatement à l'oxy-atmoversion (vers 2,2 Ga), avec le bassin du Waterberg en Afrique du Sud dont le dépôt se produit entre 2,1 et 1,88 Ga, jusqu'au Mésoprotérozoïque moyen avec le bassin de Satakunta (déposé entre 1,4 et 1,3 Ga), voire jusqu'au Néoprotérozoïque avec le bassin de Muhos en passant par le Mésoprotérozoïque inférieur avec le bassin de Cariewerloo (déposé entre 1,58 et 1,45 Ga). Ces bassins représentent des reliques plus ou moins épaisses et étendues de bassins probablement beaucoup plus puissants initialement.

Bassin	Athabasca	Waterberg	Cariewerloo	Bassins de Fennoscandie
Localisation	Canada	Afrique du Sud	Sud d'Australie	Finlande
Age	Paléoprotérozoïque 1,7 - 1,75 Ga	Paléoprotérozoïque 1,9 - 1,7 Ga	Mésoprotérozoïque 1,42 - 1,58 Ga	Mésoprotérozoïque 1,3 - 1,4 Ga
Dimensions	Un seul bassin de grande dimension (33000 Km <sup>2</sup> )	Douze formations 60000 km <sup>2</sup>	120 km de large, 450 km nord - ouest	Plusieurs bassins de petite taille Satakunta 1500 km <sup>2</sup> , + partie sous le golfe Bothnie Fluviatiles, deltaïques
Types de sédiments	Fluviatiles	Alluvionnaires - fluviatil chenaux en tresse-bassin lacustre	Principalement fluviatil, cône de déjection, éolien et deltaïque	
Epaisseur actuelle	1,5 km	7 km	1600 m	Satakunta : 1500 m; Muhos : 975 m
Magmatisme associé	1,25 Ga (dykes Mckeenzie)	Sills, corps irréguliers et dykes ~ 1,1 Ga et 1879 Ma	Gawler Range Volcanism 1,59-1,58 Ga-Hiltaba Suite Granite Dykes Gairdner 1100-1050 Ma	1,6-1,4 Ga (granites rapakivi) ? 1260 ±10 Ma (dykes mafiques)

Tableau I. 1 : Comparaison des caractéristiques générales des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec celles de l'Athabasca.

L'objectif de notre travail a été de développer une étude comparative systématique des caractéristiques minéralogiques, lithogéochimiques et de l'évolution diagénétique de ces bassins, de définir leur potentialité à avoir pu générer des gisements d'uranium de type discordance en prenant les bassins fortement minéralisés en uranium de l'Athabasca et de Kombolgie comme références et avec les principales questions suivantes :

- (i) Existe - t'il une évolution des caractéristiques lithogéochimiques de ces différents bassins continentaux liée à leur différence d'âge entre 2,1 et 1,3 Ga, à leur différence d'environnement géotectonique de dépôt ou à leur différence de paléolatititude au moment de leur dépôt ?

- (ii) Les formations remplissant ces bassins ont-elles pu représenter des sources potentielles d'uranium ? Quels sont les sites de l'uranium dans ces formations et peut-on mettre en évidence des mécanismes de libération de ce métal ?
- (iii) Ces bassins se sont-ils comportés comme de vastes aquifères pérennes comme les bassins de Kombolgie et Athabasca ?
- (iv) Ont-ils pu générer des saumures diagénétiques aussi concentrées et de température aussi élevée que dans les bassins fortement minéralisés ?
- (v) Quelles ont été les variations des conditions redox et du pH au sein du bassin et au voisinage de la discordance au cours de son histoire diagénétique et hydrothermale ?
- (vi) Existe-t-il des évidences d'altération hydrothermale syn- à post-diagénétique comparables à celles observées en association avec les minéralisations uranifères associées aux bassins de l'Athabasca et du Kombolgie ?
- (vii) Quelles sont les caractéristiques lithogéochimiques du socle sous-jacent en tant que source d'uranium potentielle ?
- (viii) Quelles sont les évidences et l'importance de l'altération régolithique à la discordance lorsque celle-ci peut être observée ?
- (ix) Quelles ont été les conséquences des variations de ces paramètres sur la libération de l'uranium des minéraux sources, sur son transport et son dépôt, c'est-à-dire sur la favorabilité globale de ces bassins à générer des minéralisations uranifères de type discordance ou éventuellement d'un autre type ?

## METHODOLOGIE

### i. Echantillonnage

Pour le **bassin Satakunta**, 45 échantillons ont été prélevés sur 3 sondages à la cartothèque du Service Géologique de Finlande (GTK) :

- Le sondage profond **PORI 60-1 (M52)** est localisé dans la partie la plus profonde du bassin. Il recoupe la plupart de ces formations du bassin. Il a atteint une profondeur de 618,55 m sans toutefois recouper le socle. 30 échantillons ont été prélevés à intervalles réguliers par Michel Cuney avec la collaboration d'Olli Aikas du Service Géologique de Finlande.

- Deux sondages courts (**R1** d'une profondeur de 30 m avec 5 échantillons prélevés et **R6** d'une profondeur de 39,50 m avec 6 échantillons prélevés) ont été sélectionnés sur la bordure ouest du bassin car ils présentent les faciès les plus grossiers de la base de ce dernier et recourent ainsi la discordance (respectivement à 30 et 34,70 m) et les formations du socle sous-jacent.

Dans le **bassin de Muhos** 3 sondages ont été sélectionnés selon un profil E-W.

- Le sondage **Tupos 001** situé au centre du bassin qui a atteint une profondeur de 992,4 m, profondeur à laquelle il intersecte le socle. 7 prélèvements ont été réalisés.

- Le sondage **R03** localisé au nord-ouest du bassin (Hailuoto) qui a atteint une profondeur de 122,9 m et qui intersecte le socle à 109,35 m. 4 échantillons y ont été prélevés.

- Enfin le sondage **MH39-001** localisé au sud-est du bassin a atteint une profondeur de 523,7 m sans intersecter le socle. 4 échantillons y ont été prélevés.

Pour le bassin de Waterberg en Afrique du Sud, le sondage RH1/72 qui le recoupe sur 1800 m a été sélectionné au nord-est de celui-ci. 34 prélèvements ont été réalisés entre 19,9 et 1794,4 m.

Dans le **bassin de Cariewerloo**, les sondages 9322 «PY 1»; 1293,3 m, 9312 «ASD2»; 1148,4 m, 9321 «CSD1»; 994,2 m et 9326 «DRD1»; 1067,7 m, recoupant la formation Pandurra et formant un profil NE-SE à travers le bassin et le sondage 9316 «DDH 893-1»; 126,2 m, traversant le **bassin d' Itiledoo** ont été échantillonnés (Tableau I. 2).

Sondage	Etudes GST	Location	Profondeur (m)	Pandurra (m)	Echantillon
<b>1 - DRD 1</b>	<b>9326</b>	Dromedary Dam	1067,7	745 (322-1067,7)	25 (379-403)
<b>2 - CSD 1</b>	<b>9321</b>	Cocky Swamp	994,2	465,6 (399,3-864,9)	44 (162-205)
<b>3 - ASD 2</b>	<b>9312</b>	Arcoona structure	1148,4	232,6 (791,3-1023,9)	28 (1-28)
<b>4 - PY 1</b>	<b>9322</b>	Mount Gunson Pernatty Lagoon	1293,3	639,8 (39,8-679,6)	63 (206-268)
<b>5 - DDH 893-1</b>	<b>9316</b>	Cockabidnie	126,2		9 (91-99)

Tableau I. 2 : Liste des sondages échantillonnés dans le bassin de Cariewerloo.

## ii. Etudes pétrographiques et minéralogiques

Des lames minces polies ont été préparées sur les échantillons de ces différents sondages (annexe I). Les observations en microscopie optique, en lumière transmise et réfléchi, ont permis de déterminer la nature de l'assemblage détritique initial, la succession des cristallisations au cours de la diagenèse, et d'évolutions hydrothermales post-diagénétiques éventuelles. La nature des microphases non déterminables en microscopie optique et les éventuels zonages des minéraux ont été étudiés par microscopie électronique à balayage (MEB) Hitachi S2500 Kevex, en mode électrons rétrodiffusés (BSEM) ou en utilisant le dispositif d'analyse semi - quantitatif par dispersion d'énergie au Service Commun de Microanalyse de l'Université Henri Poincaré (UHP), Vandœuvre-lès-Nancy, France.

## iii. Analyse des minéraux à la microsonde électronique

Les analyses chimiques à la microsonde électronique ont été réalisées sur un appareil CAMECA SX50 et SX100 situé au Service Commun de Microanalyses de la Faculté des Sciences, UHP. Les conditions analytiques ont été les suivantes : intensité de courant = 6 nA, tension d'accélération : courant primaire = 10 nA, tension:15 kV, diamètre de faisceau = 1,5 µm, temps de comptage = 10 s (pic), 5 s (bruit de fond). Les analyses sont obtenues en % poids d'oxydes, le fer étant considéré comme étant totalement sous la forme Fe<sup>2+</sup>. Des formules structurales ont ensuite été calculées sur la base de 11 ou 14 Oxygènes (Annexe II).

**Des lames épaisses** ont été préparées pour une étude microthermométrie des inclusions fluides afin de définir la nature des fluides associés à la diagenèse et/ou aux altérations post-diagénétiques.

#### iv. Etude des inclusions fluides (IF)

Les inclusions fluides (IF) sont des microcavités au sein d'un minéral (hôte) où sont piégées une ou plusieurs phases fluides liquides et/ou gazeuses avec, parfois, un ou plusieurs solides (*Shepherd et al.*, 1985). Quand un minéral se dépose à partir d'une phase liquide, une partie du liquide peut être emprisonnée lors de l'apparition d'imperfections dans la croissance du cristal, pour former une inclusion fluide primaire (*Bodnar*, 2003). Elles peuvent également correspondre à une cicatrisation incomplète des microfractures provoquées par les contraintes tectoniques ou thermiques (IF secondaires). Des inclusions pseudo-secondaires (*Roedder*, 1984) sont également emprisonnées lors d'une cicatrisation incomplète des microfractures, mais avant que le cristal ait cessé sa croissance. Ces inclusions fluides sont les témoins des solutions fossiles qui ont circulé en un lieu et à un moment donné.

Une inclusion est représentative des propriétés initiales du fluide si son volume, donc sa densité, et sa composition n'ont pas changé depuis le piégeage du micro-volume de fluide. Du point de vue thermodynamique, une inclusion, considérée comme n'ayant pas changé ni de volume ni de composition, peut être considérée comme un système fermé. Dans un tel système, la température, la pression interne, la composition et la densité sont reliées par une équation appelée équation d'état qui est représentée par une isochore : droite ou courbe d'isodensité dans un espace Pression - Température.

Les techniques d'étude sont synthétisées dans plusieurs ouvrages tels que ceux de *Hollister et Crawford (1981)*, *Roedder (1984)* et *Shepherd et al. (1985)*. Les techniques actuellement utilisées pour l'étude des inclusions fluides permettent d'avoir accès à la composition et à la densité des inclusions. Le résultat est donc une courbe d'interdépendance entre la température et la pression (isochore ou isoplèthe), qui dans certaines conditions, peut être utilisée comme géothermobaromètre. Deux cas se distinguent en fonction de l'état du fluide initial au moment du piégeage : homogène ou hétérogène avec présence de deux ou plusieurs phases.

**Etude pétrographique.** L'étude pétrographique en lumière transmise des inclusions fluides est l'une des étapes les plus importantes pour reconstruire l'évolution de P-V-T-X des paleo-fluides. Les objectifs de cette étape de l'étude sont de distinguer les divers types et

générations compositionnelles d'inclusions fluides dans l'échantillon, d'identifier leurs mécanismes de formation (primaire, secondaire ou pseudo-secondaire) et leurs âges relatifs et relativement aux paragenèses minérales dans lesquelles ils se trouvent.

**La microthermométrie.** Parallèlement aux études pétrographiques, le «microthermométrie» est la technique analytique la plus courante pour caractériser les inclusions fluides.

### **Principe**

Une étude microthermométrique consiste en la mesure de température de changement de phases qui interviennent dans une inclusion fluide lorsqu'elle est soumise à une baisse ou une augmentation de la température. Le matériel utilisé est un microscope optique à transmission équipé d'une platine microthermométrique CHAIX-MECA (*Poty et al., 1976*). Cette platine permet de refroidir (azote liquide) de 25 jusqu'à -190 °C et de chauffer (résistance électrique) jusqu'à +600 °C. Les mesures de ces changements de phase permettent, en se référant à des systèmes connus, d'estimer les conditions de piégeage des fluides, à condition que la cavité soit restée un système clos (Cf. discussion ci-dessus).

Des inclusions fluides synthétiques sont employées pour calibrer les thermocouples avec des précisions sur les mesures à de +/- 0,83 °C aux températures en dessous de 100 °C.

Les différents changements de phase qui ont été observés lors de cette étude sont les suivants:

- **Te** : la température de l'eutectique du système eau-sel, qui correspond au début de fusion de glace, renseigne qualitativement sur la nature des sels dissouts dans la phase aqueuse (*Crawford, 1981*) tels que NaCl, CaCl<sub>2</sub>, KCl.
- **Tfg** : la température de fin de fusion de glace correspond à la disparition du dernier cristal de glace après congélation et à la remontée progressive de la température. Elle permet de quantifier la salinité totale connaissant le système de référence.
- **Tf<sub>CO2</sub>** : la température de fusion du CO<sub>2</sub> donne des indications sur le degré de pureté de ce dernier. Une température inférieure à son point triple (-56,6 °C) indique la présence d'autres volatils dans la phase aqueuse (par exemple CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S...).
- **Th<sub>CO2</sub>** : la température d'homogénéisation du CO<sub>2</sub> correspond à l'homogénéisation des phases carbonées liquide et vapeur en une phase unique et apporte des indications sur la densité du fluide.
- **Tfc** : la température de fusion des clathrates (hydrates) donne des informations sur la salinité de la phase aqueuse et la pureté du CO<sub>2</sub> dans le cas des fluides aquo-carboniques.
- **Th** : La température d'homogénéisation totale des phases liquide et vapeur d'une inclusion en une phase unique (lorsqu'il ne reste qu'une seule phase dans l'inclusion) reflète l'état de

l'inclusion lors de son piégeage, elle correspond donc à une température minimum de formation de l'inclusion.

**La Microspectrométrie Raman.** Les analyses de Microspectrométrie Raman ont été effectuées au laboratoire G2R. Les analyses sont faites directement sur les lames épaisses utilisées pour la microthermométrie.

**Caractéristiques expérimentales.** Microspectrométrie Raman type Labram (Dilor- Jobin Yvon) équipé d'un filtre Edge, réseau 1800 traits, détecteur CCD, raie excitatrice à 514,5 nm provenant d'un laser argon ionisé (Spectra physics), microscope Olympus focalisant le laser sur l'échantillon (objectif X 80 pour les analyses).

La Microspectrométrie Raman permet d'identifier et de quantifier les proportions des espèces gazeuses moléculaires présentes dans les inclusions fluides (CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>).

### **Principe**

L'analyse se déroule en deux temps :

Après avoir mis l'échantillon sur la platine du microscope, on l'observe en lumière normale (par réflexion ou par transmission) avec des grossissements allant jusqu'à 80 fois, et on dispose la zone que l'on souhaite analyser au centre d'un micromètre oculaire.

On envoie ensuite un faisceau laser monochromatique (vert) à travers le microscope sur la zone d'analyse. Les photons de ce faisceau laser induisent un effet Raman par interaction avec les liaisons moléculaires des espèces analysées qui permet d'en caractériser leur nature moléculaire et structurale. L'effet Raman se traduit ainsi par une modification de la fréquence (changement de couleur) d'une très faible partie de la lumière laser diffusée. Chaque changement de fréquence est caractéristique d'une espèce moléculaire déterminée et l'intensité du signal est proportionnelle à l'abondance de l'espèce dans le cas d'un mélange.

## **v. Analyses chimiques en roche totale**

Les analyses des échantillons de roche totale, préalablement broyées et porphyrisées (mortier agate), ont été réalisées par spectrométries ICP-AES et ICP-MS au Service d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM) du Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG, Vandœuvre-lès-Nancy) après broyage et porphyrisation. Les concentrations en éléments majeurs (10 éléments) et traces (43 éléments) sont obtenues. Les teneurs en oxydes des éléments majeurs sont obtenues par spectrométrie d'émission de plasma (ICP-AES). Les

éléments en traces sont analysés par spectrométrie de masse sur plasma (ICP-MS). (Voir Annexe I pour les limites de détection et précisions analytiques).

L'interprétation de composition chimique des roches, avec les diagrammes géochimiques principaux, a été acquise avec le logiciel de "Lithogeochemistry" - version 1,0 bêta (COGEMA CREGU, 2001, réalisateur : Patrick Fratzczak). Les résultats des analyses ont été portés sur des diagrammes chimico – minéralogiques, pour lesquels les compositions des roches sont calculées sous forme de paramètres multicationiques (Debon et Le Fort, 1983, 1988), et des diagrammes Log/Log pour les éléments en trace :

- Le diagramme quartz – indice de peraluminosité Q - A permet d'évaluer les proportions relatives de quartz (axe Q) - d'argile (valeurs positives du paramètre A) - de feldspaths (valeur nulle du paramètre A) et de minéraux de Ca tels que les carbonates (valeurs négatives du paramètre A) (Fig. I. 1).
- Le diagramme  $[Na + K] - [(Al - (Na + K))/2] - [(Mg + Fe + Mn)/3]$ , permet d'évaluer les proportions relatives d'argiles (l'illite, kaolinite, argiles interstitielles) et chlorite + oxydes de fer (Fig. I. 2).
- Le diagramme Na/Al vs K/Al permet particulièrement d'évaluer les proportions relatives d'albite, de feldspath potassique et d'argile (Fig. I. 3).

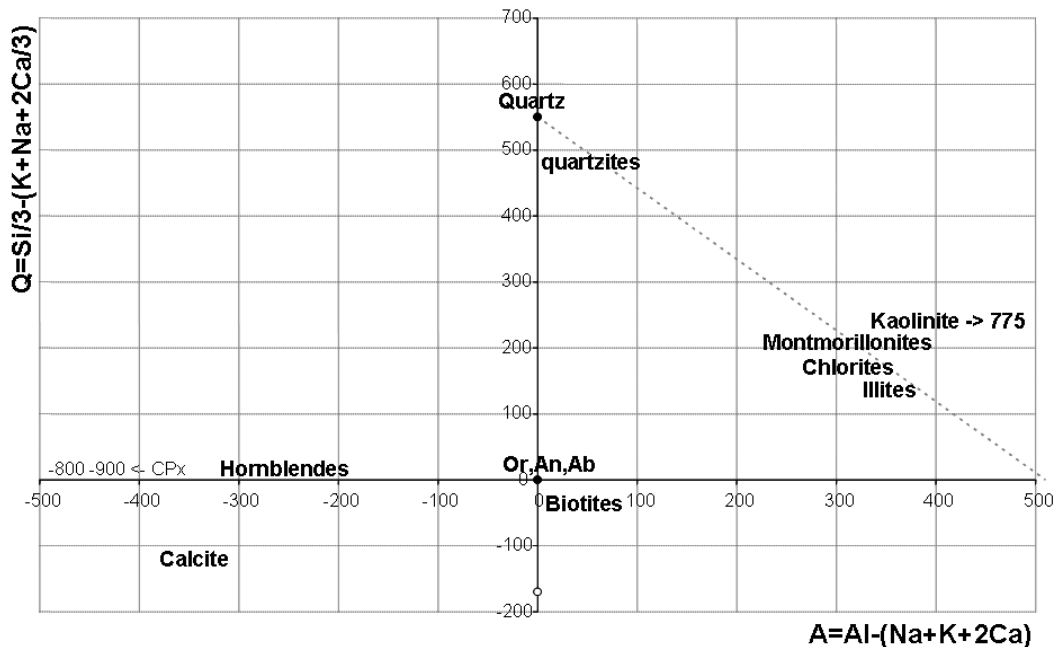


Figure I. 1: Diagramme chimico - minéralogique de quartz - indice de peraluminosité (dérivé de Debon et Le Fort, 1983, 1988) avec quartz, feldspath et les principaux minéraux d'altération.



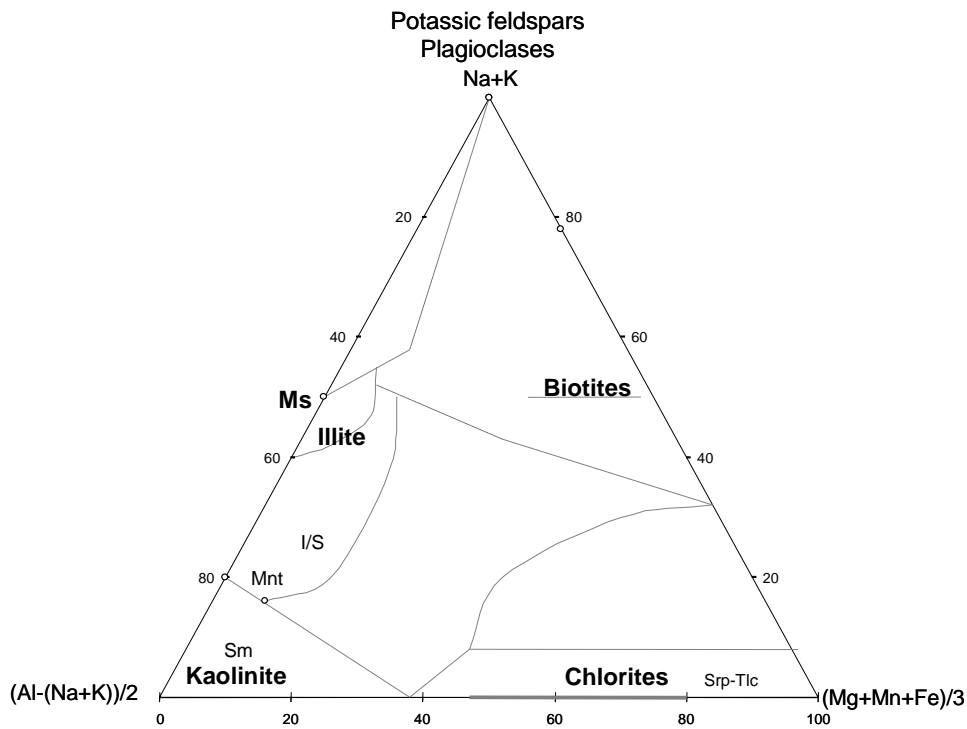


Figure I. 2 : Diagramme chimico - minéralogique  $[Na + K] - [(Al - (Na + K))/2] - [(Mg + Fe + Mn)/3]$  pour la discrimination argiles - feldspaths.

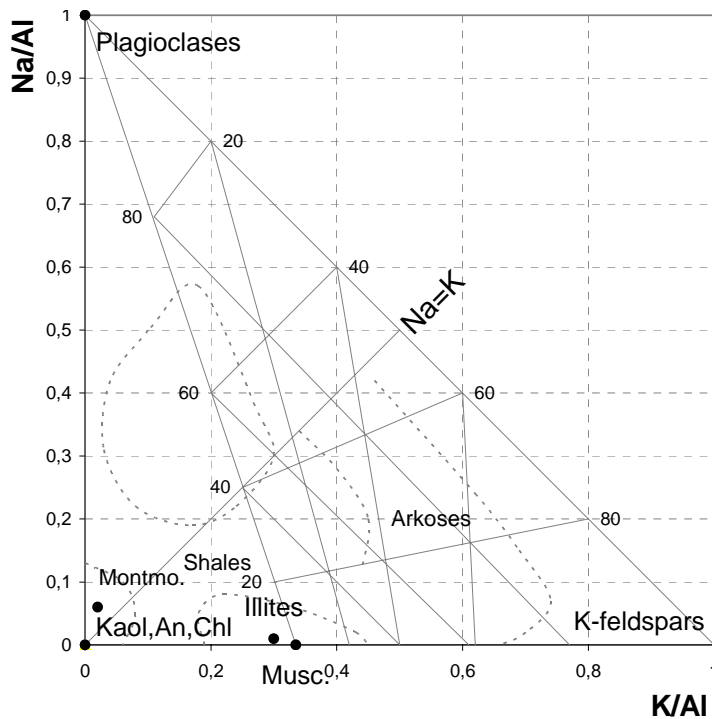


Figure I. 3 : Diagramme chimico - minéralogique de  $Na/Al$  vs  $K/Al$  pour discriminer les proportions de plagioclase - feldspath (K) - argiles.

- Le diagramme Th/U permet d'évaluer le degré d'enrichissement en uranium relativement au thorium dans les roches, en le comparant aux compositions moyennes des principaux types de roche. Il permet également d'évaluer la perte possible d'uranium ( $\text{Th/U} > 4$ ) ou le gain ( $\text{Th/U} < 2$ ) (Cuney et Mathieu, 2000; Mathieu et al., 2001).
- Le diagramme Th/La permet d'évaluer le degré d'altération de monazites par les fluides diagénétiques qui lessivent les terres rares légères représentées ici par La (quand  $\text{Th/La} > 0,4$ ) ou peuvent les redéposer comme aluminophosphates - sulfate de REE, Ca, Sr (quand  $\text{Th/La} < 0,2$ ), comme observé dans les bassins minéralisés d'Athabasca, de Kombolgie et de Franceville (Gabon) (Cuney et Mathieu, 2000; Mathieu et al., 2001).
- le diagramme U partiel vs U total permet de déterminer la proportion d'uranium facilement lessivable.
- Le diagramme Th/U vs Th/La permet de déterminer la perte d'uranium ( $\text{Th/U} > 4$ ) en relation avec le degré d'altération de la monazite ( $\text{Th/La} > 0,4$ ), quand ces deux paramètres sont positivement corrélés.
- Les spectres de terres rares permettent, pour les grès, de caractériser les sources dans le cas des sédiments immatures (héritage des anomalies de Ce des sources latéritiques, l'absence d'anomalie d'Eu dans les roches des sources Archéennes...) et le degré de lessivage des terres rares lourdes intermédiaires (spectres en forme des cuvettes) observé dans les bassins fortement minéralisés liés aux minéralisations uranifères de type discordance (Kister, 2003).
- Le diagramme Zr/Y permet de mesurer le degré d'altération des zircons par les fluides de bassin. Leur enrichissement en Y ( $\text{Zr/Y} < 100$ ) a été observé dans les bassins minéralisés d'Athabasca (Kister, 2003) et de Karku (Lobaev et al., 2005).

## vi. Diffraction des rayons X (DRX)

Les feldspaths de Satakunta et les pyroxènes de Waterberg ont été analysés en DRX sur poudre non orientée pour identifier leur pureté. Les diffractogrammes ont été réalisés sur un appareil Bruker AX8 Advance situé au Laboratoire Environnement et Minéralurgie (LEM, Vandœuvre-lès-Nancy).

Les argiles de Satakunta ont été étudiées à Poitiers par Cécile RIGAULT dans un projet de recherche - Master 1. Les diffractogrammes de lames orientées (séchées à l'air puis saturées à l'éthylène glycol à l'aide d'un spray) ont été obtenus à l'aide d'un diffractomètre Philips PW1730 muni d'un tube au cuivre (40 kV; 40 mA;  $\lambda = 1,54$ ) couplé à un système d'enregistrement de données DACO-MP. Les diagrammes de rayons X des lames orientées ont été acquis entre  $2$  et  $30^\circ 2\theta$  (de  $35\text{\AA}$  à  $3\text{\AA}$ ) avec un pas de  $0,02^\circ 2\theta$  et un temps de comptage de 3 secondes.

## vii. Séparation des minéraux

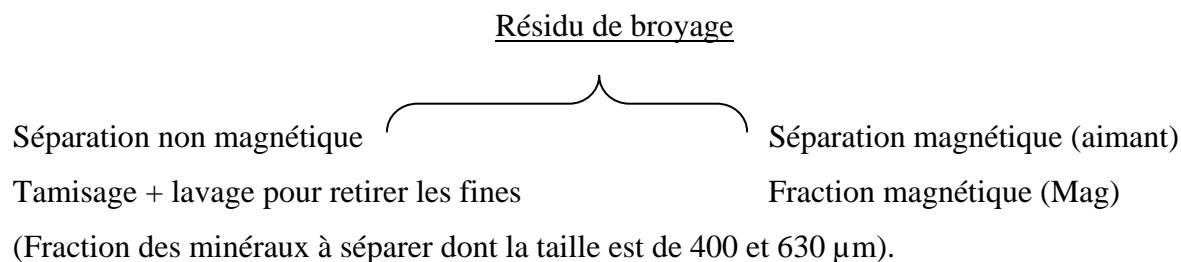
### *Séparation magnétique.*

La magnétite a été extraite des concentrés de minéraux lourds dans le laboratoire G2R à l'aide d'un aimant ventouse. Le matériel légèrement ferromagnétique et paramagnétique a subséquentement été séparé à l'aide d'un séparateur à barrière de champs de type Frantz, réglé à 0,4 ampère.

### *Séparation aux liqueurs denses.*

Le résidu de broyage a été ensuite tamisé, lavé, et puis soumis à une séparation à la liqueur dense. Le Bromoforme ( $\text{CHBr}_3$ ; densité = 2,9 g/mL) ainsi que LST Fastfloat (qui contient du sodium heteropolytungstates hydraté à l'eau (80 wt %); densité de  $\sim 2,82$ ) ont été utilisés pour la séparation des feldspaths potassiques en vue de leur datation par la méthode K-Ar. A partir d'une liqueur dense diluée (densité de 2,62, densité maximale des feldspaths potassiques), les feldspaths potassiques ont pu être récupérés.

L'Iodure de Méthylène ( $\text{CH}_2\text{I}_2$ ; densité = 3,3) a été utilisée pour la séparation des titanites (Tableau I. 3).



Séparation densimétrique

Minéraux	Densité	Liquueur utilisée	Rinçage
Feldspaths potassiques	2,62	Bromoforme+éthanol LST+eau	éthanol eau
titanites	> 3,3	Iodure de Méthylène	éther

Tableau I. 3 : Liste des liqueurs utilisées pour la séparation des feldspaths potassiques et des titanites.

- Ensuite le triage des feldspaths potassiques a été amélioré manuellement sous la loupe binoculaire, pour éliminer les dernières phases non feldspathiques.

### viii. Datation par la méthode K – Ar

Les échantillons ont été analysés dans le Service d'Isotope d'Argon au Centre Environnemental de Recherches d'Universités Ecosaises, Est-Kilbride, Royaume-Uni par P. Alexandre. La composition isotopique de l'argon a été déterminée en utilisant la méthode de dilution d'isotope, avec  $^{38}\text{Ar}$  comme traceur, exécutée par un spectromètre de masse modifié de MAP 215-50. Chaque échantillon a fourni 3 paquets pour l'analyse qui ont été pesés et enveloppés dans des feuilles de cuivre ultrapur (99,999%). Tous les paquets de chacun des échantillons ont été chargés dans un «glass tree» avec des paquets contenant les normes HDB1, Berne 4m et GL0 qui ont été employés pour le calibrage de l'instrument. Différents paquets ont été chauffés dans un double four à résistance de vide à  $\sim 1530\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant 10 minutes pour réaliser la fonte totale. Le gaz libéré par fusion de chaque échantillon a été épuré en utilisant une combinaison de Zr-Al GP50 à  $250 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , et un doigt contenant la zéolite s'est refroidi à  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$  avec un piège acétone-sec de nevasse de glace pour éliminer l'eau et des hydrocarbures. La transitoire  $^{38}\text{Ar}$  a été présentée par un système calibré de pipette permettant à une quantité connue de  $^{38}\text{Ar}$  de se mélanger au gaz témoin. Une purification d'échantillon complémentaire a été réalisée par une association de deux combinaisons GP50 actionnées à la température ambiante et d'un acquéreur de CapaciTorr B200 actionné à  $250 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , enlevant tous gaz chimiquement actifs restants. Après nettoyage, le gaz témoin a été augmenté dans un spectromètre de masse MAP-215 en mode statique et chacun des cinq isotopes d'argon a été mesuré. La discrimination de masse instrumentale a été vérifiée par analyse d'air avant chaque échantillon. Des niveaux de fond de l'argon composition et sensibilité en transition ont été surveillés par des analyses

concourantes des blancs du spectromètre de masse et la ligne d'extraction et les transitions d'isolement. Des âges ont été calculés après avoir corrigé, pour des blancs de discrimination et de système, la masse de machine en utilisant les constantes de désintégration de *Steiger et de Jager (1977)*.

**REFERENCES**

- Allsop, H.L., Karmers, J.D., Jones, D.L., Erlank, A.J. (1989). The age of the Umkondo Group, eastern Zimbabwe, and implications for palaeomagnetic correlations. *South African Journal of Geology*, V. 92, P.11 - 19.
- Bleeker, W. (2003). The late Archean record: a puzzle in ca. 35 pieces: *Lithos*, V. 71, P. 99 - 134.
- Bodnar, R.J. (2003). Interpretation of Data Inclusion. In I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. *Mineral. Assoc. Can., Short Course Ser.* V. 32, P. 81-100.
- Callaghan, C.C., Eriksson, P.G., and Snyman, C.P. (1991). The sedimentology of the Waterberg Group in the Transvaal, South Africa: an overview. *Journal of African Earth Sciences*, V. 13, P. 121 - 139.
- Cowley, W.M. (1993) – Pandurra Formation. In Drexel J.F., Preiss W.V., Parker A.J. (eds) The Geology of South Australia. V. 1. The Precambrian. *Geological Survey of South Australia*, V. 54, P. 139 - 142.
- Crawford, M.L. (1981): Short course in fluid inclusions: applications to petrology (L.S. Hollister and M.L. Crawford, Eds.).P. 75 - 100.
- Cuney, M. & Mathieu, R., (2000). Extreme Light Rare Earth Element mobilization by diagenetic fluids in the geological environment of the Oklo natural reactor zones, Franceville basin, *Gabon. Geology*, V. 28 (8), P. 743 - 746.
- Debon, F., and Le Fort, P., (1983). A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations, *Earth Sciences*, V. 73, P. 135.149.
- Debon, F., and Le Fort, P., (1988). A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: principles, method, applications. *Bulletin de minéralogie*, V. 111, P. 493 - 510.
- Derome, Donatienne; Cathelineau, Michel; Cuney, Michel; Fabre, Cécile; Lhomme, Thérèse; and Banks, David A. (2005): Mixing of Sodic and Calcic Brines and Uranium Deposition at McArthur River, Saskatchewan, Canada: A Raman and Laser-Induced Breakdown Spectroscopic Study of Fluid Inclusions: V. 100, P. 1529 - 1545.
- Elo, S. (1976). Rpt Q20/21/1976/1, *Geol. Surv. Finland*: 11 P.

- Fayek, M. and Kyser, T.K. (1997): Characterization of multiple fluid-flow events and Rare-Earth-Element mobility associated with formation of unconformity-type uranium deposits in the Athabasca Basin, Saskatchewan. *Can. Mineral*, V. 35, P. 627 - 658.
- Hanson, R.E., Gose, W.A., Crowley, J.L., Ramezani, J., Bowring, S.A., Bullen, D.S., Hall, R.P., Pancake, J.A., Mukwakwami, J. (2004). Paleoproterozoic intraplate magmatism and basin development on the Kaapvaal Craton: Age, paleomagnetism and geochemistry of ~ 1.93 to ~ 1.87 Ga post-Waterberg dolerites. *South African Journal of Geology*; V. 107; P. 233 - 254.
- Hollister, L. S. and Crawford, M. L. (1981): Short course in fluid inclusions: Applications to petrology. *Mineral. Assoc. Canada*, Calgary.
- Jefferson, C.W., Delaney, G. and Olson, R.A. (2003). EXTECH IV Athabasca Uranium Multi-disciplinary Study of northern Saskatchewan and Alberta, Part 1: Overview and Impact: *Geological Survey of Canada*, Current Research 2003-C18, 10 P.
- Kister, P. (2003). Mobilité des éléments géochimiques dans un bassin sédimentaire clastique, du Protérozoïque à nos jours: le bassin Athabasca (Saskatchewan, Canada). *Unpub. Ph.D. thesis*. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 331 P.
- Kister, P., Laverret, E., Cuney, M., Vieillard, P. and Quirt, D. (2003). 3D distribution of alteration minerals associated with unconformity-type uranium mineralization: Anne Zone, Shea Creek deposit (Saskatchewan, Canada). In: M. Cuney (Editor), *Uranium Geochemistry 2003, Nancy International Conference Proceedings*, P. 197 - 200.
- Kotzer, T. G., Kyser, T. K. (1995). Petrogenesis of the Proterozoic Athabasca Basin, northern Saskatchewan, Canada, and its relation to diagenesis, hydrothermal uranium mineralization and paleohydrogeology. *Chem. Geol.* V. 120, P. 45 - 89.
- Kousa, J., Lundqvist, T. (2000). Meso- and Neoproterozoic cover rocks of the Svecofennian Domain. In: Lundqvist, Th. & Autio, S. (eds.) Description to the bedrock map of central Fennoscandia (Mid-Norden). *Geological Survey of Finland*. Special Paper 28, P. 75 - 76.
- Kyser, K., Hiatt, E., Renac, C., Durocher, K., Holk, G., and Deckart, K. (2000). Chapter 10. Diagenetic fluids in Paleo- and Meso-proterozoic sedimentary basins and their implications for long protracted fluid histories; in Kyser, K., ed., *Fluids and Basin Evolution: Mineralogical Association of Canada*, Short Course Series, Calgary (Series Editor Robert Raeside). V. 28, P. 225 - 262.

- Lorilleux, G., Cuney, M., Jébrak, M., Rippert, J.C., Portella, P. (2003). Chemical brecciation processes in the Sue unconformity – type uranium deposits Eastern Athabasca Basin (Canada). *J. of Geochemical Exploration*. V. 80, P. 241 - 258.
- Mathieu, R., Zetterstrom, L., Cuney, M., Gauthier-Lafaye, F., and Hidaka, H., (2001). Alteration of monazite and zircon and lead migration as geochemical tracers of fluid paleocirculations around the Oklo-Okélonbondo and Bangombé natural reactor zones (Franceville basin, Gabon). *Chemical Geology*, V. 171. P. 147-171.
- Lobaev, V., (2005). Caractéristiques minéralogiques et géochimiques du bassin sédimentaire mésoprotérozoïque de Pasha – Ladoga et de son socle (Bouclier Balte, Russie). Implications pour la genèse des gisements d'uranium de type discordance. *Ph.D thesis*. Henri Poincaré, Nancy I, 326 P.
- Pihlaja, P. (1987). Porin seudun Subjotuniset diabaasit- The Subjotnian diabases of the Pori region, southwestern Finland. In: Aro, K. and Laitakari, I. (eds) Suomen diabassit ja muut mafiset jounikivilajit – Diabases and other mafic dyke rocks in Finland. Geologian tutkimuskeskus – Tutkimusraportti. *Geologian Survey of Finland – Report of Investigation*. V. 76, P.133 - 150.
- Poty, B., Leroy, J., Jachimowicz, L. (1976): Un nouvel appareil pour la mesure des températures sous le microscope: l'installation de microthermométrie Chaixmeca. *Bulletin de Liaison de la Société française de Minéralogie et Cristallographie*, V. 99, P. 182 - 186.
- Roedder, E. (1984): Fluid Inclusions, *Min. Soc. Am. Rev.* in Min. 12, 644 P.
- Ruzicka, V. (1995). Unconformity-type uranium deposits. In: Mineral Deposit Modelling, R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe and J.M. Duke (eds.), *Geological Association of Canada*, Special Paper 40, P. 125 - 149.
- Suominen V (1991). *Geol. Surv. Finland*, Bull. 356. 100 P.
- Shepherd, T. Rankin, A.H., Altderton, D.H.M. (1985): *A practical guide to fluid inclusions studies*. In Blackie (Ed.), Chapman et Hall. New York, 239 P.
- Simonen; A. (1960). Pre-Quaternary rocks in Finland. Bull.Comm. géol. Finlande 191, 49 P. in Kohonen, J., Pihlaja, P., Kujala, H., and Marmo, J. (1993). Sedimentation of Jotnian Satakunta Sandstone, western Finland. *Geol. Surv. Finland*. 35 P.
- Simonen; A. (1980). The Precambrian in Finland. *Geol. Surv. Finland*, Bull. 304, 58 P.



- Steiger, R.H., and Jager, E. (1977). IUGS Subcommittee on Geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology: *Earth and Planetary Science Letters*, V. 36, P. 359 - 362.
- Thomas, D.J., Matthews, R.B. and Sopuck, V. (2000), Athabasca Basin (Canada) unconformity - type uranium deposits: Exploration model, current mine developments and exploration directions; in *Geology and Ore Deposits 2000: The Great Basin and Beyond, Geological Society of Nevada Symposium Proceedings*, ed., J.K. Cluer, J.G. Price, E.M. Struhsacker, R.F. Hardyman and C.L. Morris, May 15-18 2000, Volume 1, P. 103 - 126.
- Tickell, S.J. (1975). Braided river deposits in the Waterberg Supergroup. *Transactions of the Geological Society of South Africa*, V. 78, P. 83 - 88.
- Tourigny, G., Wilson, S. Breton, G. et Portella, P. (2001). Fault zone reactivation and emplacement of uranium mineralization at the Sue C deposit, McClean Lake operation, northern Saskatchewan (poster), *Sask. Energy and Mines*, portes ouvertes, novembre 26 - 28, 2001.
- Tynni, R., & Donner, J. (1980). A microfossil and sedimentation study of the Late Precambrian formation of Hailuoto, Finland. *Geol. Surv. Finland*, Bull. 311, 27 P., VIII P1.
- Vaasjoki, M. (1977). Rapakivi granites and other postorogenic rocks in Finland: their age and the lead isotopic composition of certain associated galena mineralizations. *Geol. Surv. Finland*, Bull.294, 64 P.
- Veltheim, V. (1969). On the pre-Quaternary geology of the Bothnian Bay in the Baltic Sea. *Bull. Comm; Géol. Finlande*, V. 239, P. 1 - 56.



---

*CHAPITRE II*

*LE BASSIN DE WATERBERG*

---



## CHAPITRE II

### LE BASSIN DE WATERBERG

---

#### Introduction

Les minéralisations uranifères de type discordance représentent la catégorie la plus significative mondialement. Ce type de minéralisation n'est connu que depuis la découverte du gisement de Rabbit Lake en 1968. Leur richesse est exceptionnelle. Les principaux districts producteurs sont d'âge Mésoprotérozoïque et localisés, dans les bassins du Saskatchewan (Athabasca, Canada) et d'Alligator River (Northern Territory, Australie).

Cette catégorie est contenue dans perméable, grès à grains moyens à gros, généralement d'origine terrestres, fluviales et marine marginal. Les grès lacustres ou éoliens peuvent également accueillir des minéralisations.

La minéralisation est dans l'espace liée aux discontinuités tectoniques régionales et se produit à, ou dessous, une discordance régionale entre des roches clastiques Paléo- à Mésoprotérozoïque et des roches Paleoprotérozoïque métasédimentaires sous-jacentes (*Ruzicka, 1995*).

Dans un modèle généralement admis, le dépôt d'uranium résulte de mélange entre des fluides salines, oxydant, uranifères du bassin, mis en convection libre, et de fluides réducteurs provenant du socle, peut-être issus de processus métamorphiques (*Raffensperger et Garven, 1995 ; Kotzer et Kyser, 1995*). La minéralisation se produit quand les fluides oxydants transportent l'uranium dans les grès, où il est déposé sous conditions de réduction (en raison de la matière organique, des sulfures ou du méthane).

D'ailleurs, à la base des bassins, à la proximité du socle, les interactions très significatives peuvent se produire entre ces deux environnements avec des caractéristiques pétro - géochimiques contrastées (*Lorilleux et al., 2003 ; Derome et al. 2004 ; Kister et al., 2003*).

Le bassin de Waterberg en Afrique du Sud est un bassin clastique Proterozoïque recouvrant en discordance des roches pré – Waterberg. Ce bassin partage une similarité avec les bassins d'Athabasca (Canada) et Kombolgie (Australie).

L'objectif de ce chapitre est à partir des caractéristiques minéralogiques et chimiques des roches sédimentaires, de l'évolution diagenétique et d'évènements hydrothermaux ultérieurs de définir la potentialité de ce bassin clastique Mésoprotérozoïque à pouvoir générer des minéralisations uranifères semblables à celles associées aux bassins références de l'Athabasca au Canada et de Kombolgie en Australie.

---

## TABLE OF CONTENT

TABLE OF FIGURES .....	60
LIST OF TABLES .....	61
ARTICLE I.....	62
Mineralogy, geochemistry and diagenetic evolution of the continental clastic Mesoproterozoic basin of Waterberg (Kaapvaal Craton, South Africa). Inferences on the genesis of unconformity related uranium deposits.....	62
Abstract .....	62
1. Introduction .....	63
2. Methodology .....	64
3. Regional overview.....	64
4. Characteristics of the sediments .....	67
5. Characteristics of the dolerite.....	70
6. Sandstone geochemical characteristics .....	70
6.1. Geochemistry of the major elements.....	70
6.2. Geochemistry of the trace elements .....	73
Zircon in the Waterberg basin.....	77
Monazite in the Waterberg basin .....	79
6.3. Cristallogeochemistry of the clay minerals.....	80
7. Fluid inclusions study.....	83
8. Discussion and conclusions.....	84
8.1. Characteristics of the diagenetic evolution of the sediments .....	84
8.2. Degree of maturity of the sediments .....	84
8.3. pH conditions .....	85
8.4. Redox conditions.....	85
8.5. P-T conditions of the thermal events.....	85
8.6. Evidence of hydrothermal alteration .....	85
8.7. Global favourability of the basin for the presence of U mineralization.....	85
REFERENCES.....	87

## TABLE OF FIGURES

Figure II. 1: Map of Waterberg basin in South Africa, with the localization of the studied borehole RH1/72. ....	66
Figure II. 2: Silicified sandstones with quite visible overgrowths in the basin of Waterberg (212.3 - 1375.9 m). Carbonates and chloritic neo-formations are frequent in the matrix (1012 - 1375.9 m) or in fractures (724 m). Potassic feldspars are sometimes quite altered (1330.5 m). ....	68
Figure II. 3: Fine fractures, in sandstone at the contact with the serpentinite (at 1411.6 m), are filled by small roses of pyroxene and aggregates of quartz grains, or around grains of spinel.....	68
Figure II. 4: Mineral paragenesis established in the Waterberg sandstones. The diagram represents successively detritic minerals deposition, diagenesis or metamorphism and late diagenesis stages.....	69
Figure II. 5: The dolerites are characterized by: I. of twinned clinopyroxenes, II. myrmekitic feldspars, III. Chloritized augite, IV & V. pyroxenes partially replaced by amphibole and feldspars, VI, VII & VIII: twinned plagioclase, biotite, and magnetite. ....	70
Figure II. 6: Sediments of Waterberg in the quartz - peraluminous index diagram.....	71
Figure II. 7: Pyroxene composition of sample 1411.6 m in the clinopyroxene diagram. ....	71
Figure II. 8: Relative proportions of feldspars - clays - micas (independently of the quantity of quartz) diagram for the sediments of Waterberg.....	72
Figure II. 9: Na/Al versus K/Al diagram allows discriminating the relative proportions of plagioclase, potassic feldspar and clays in the sediments of the Waterberg basin.....	72
Figure II. 10: Trace elements abundances of the sandstones of Waterberg normalized to the sandstones of Erica 1 drill core (Athabasca). ....	73
Figure II. 11: Th – La (ppm) diagram for the sediments of Waterberg. ....	74
Figure II. 12: Th - U diagram for the sediments of Waterberg basin.....	74
Figure II. 13: Th/U-Th/La diagram for the sediments of Waterberg. ....	75
Figure II. 14: Th/La - Ho <sub>(N)</sub> /Ho* diagram for the sediments of Waterberg. ....	76
Figure II. 15: K - Rb diagram for the sediments of Waterberg.....	76
Figure II. 16: Zr - Y diagram for the sediments of Waterberg.....	77
Figure II. 17: Evolution of Th and U concentrations, and Th/La, Th/U, Zr/Y, Ho <sub>(N)</sub> /Ho* ratios with the depth in the basin of Waterberg.....	77



Figure II. 18: Xenotime replacing zircon (i), zircons with generally well developed primary zoning (ii, iii) with a slight alteration (ii-iii-iv-v-vi), sometimes inclusions of apatite, monazite and quartz (vi). Detrital monazite crystals are common (vii-viii) in the Waterberg sediments .....	78
Figure II. 19: Substitution of Zr + Si + Hf by U in zircons from the sandstone of Waterberg. Inserted a SEM - BSEM image of an altered zircon crystal.....	78
Figure II. 20: Substitution of Zr + Si + Hf by Al + P + Ca + Fe + Y + U in zircons from the sandstone of Waterberg. Inserted a SEM - BSEM image of an altered zircon crystal.	79
Figure II. 21: Substitution of P + REE by Si + Ca + Th + U + Y in detrital monazites from the Waterberg sandstones.....	79
Figure II. 22: Classification of white micas of Waterberg in a diagram Si - Al - (Fe + Mg) ( <i>Monier, 1985</i> ).....	80
Figure II. 23: Characterisation of types of micas of Waterberg in the diagram of <i>Velde (1977)</i> . .....	81
Figure II. 24: Nature of chlorites of Waterberg in the diagram of <i>Foster (1962)</i> . .....	81
Figure II. 25: Classification of chlorites of Waterberg in triangular diagram Al (VI) – Mg - Fe (Chlorites of Athabasca in <i>Lorilleux, 2001</i> as a reference).....	82
Figure II. 26: Diagram Al (VI) - Al (IV) for the chlorites in the Waterberg sediments. ....	82

## LIST OF TABLES

Table II. 1: Summary of the previous fluid inclusion data obtained in diagenetic quartz of the Waterberg basin.....	83
---	----

**ARTICLE I****Mineralogy, geochemistry and diagenetic evolution of the continental clastic Mesoproterozoic basin of Waterberg (Kaapvaal Craton, South Africa). Inferences on the genesis of unconformity related uranium deposits****Ahlam IBRAHIM, Michel CUNEY, Marc BROUAND**

G2R, Nancy-Université, CNRS, BP 239, 54506, Vandœuvre-lès-Nancy. France

**Abstract**

The Waterberg basin in South Africa represents a silicoclastic Proterozoic basin deposited unconformably on Archean and Paleoproterozoic rocks of the Kaapvaal Craton, a situation similar to other sedimentary basins associated with unconformity related U ore deposits (Athabasca basin, Canada; Kombolgie basin, Australia; Pasha-Ladoga basin, Russia).

The study of 34 samples from a selected borehole RH1/72 in the north-east of the basin has shown that the sediments of the Waterberg basin are characterized by a high degree of immaturity and a strong oxidation. The stability of K-feldspar and plagioclase in the sandstone indicates that the source area was subjected to limited pedogenic alteration, and the common angular shape of quartz that the sediments were transported over a short distance from the source area. These characteristics imply an active tectonic regime during sedimentation. Such characteristics are very different from those of the Athabasca and Kombolgie sediments, but closer to those of the Pasha-Ladoga basin. Temperatures of >330 °C calculated from neofomed chlorite, as well as the presence of CO<sub>2</sub> in fluid inclusions and the presence of pyroxene in the sandstones at 1411.6 m result from a thermal metamorphism caused by diabase intrusions. Fluid circulations in the sandstone were limited as shown by the good preservation of the detrital mineral paragenesis, the silicification of the sandstone and the non depleted Th/U, Th/La and Ho<sub>(N)</sub>/Ho\* ratios in most samples. Carbonate veinlets evidence post-silicification fluid circulations. The K-feldspar - illite - quartz paragenesis indicates a higher alkalinity of the pH of the diagenetic fluid compared to uranium mineralized basins, which is less favourable for uranium solubility. Globally, the favourability for the development of uranium mineralization in this basin appears to be low.

**Keywords:** Waterberg, Proterozoic basins, unconformity related uranium deposits, sandstone maturity, alterations.

## 1. Introduction

Unconformity-type uranium deposits represent the most significant highest grade, lowest cost uranium resource currently being exploited on a worldwide basis (*Jefferson et al., 2003; Thomas et al., 2000*). This category is contained in permeable, medium- to coarse-grained, sandstones that are poorly sorted and usually of fluvial or marginal marine origin. Lacustrine or aeolian sandstones may also host mineralization. This type of mineralization is best known from the Athabasca Basin, Canada and the Pine Creek area, Australia (*Ruzicka, 1995*) (>33 % of the world resources in Canada and Australia). They are known only since the discovery of Rabbit Lake deposit in 1968.

The mineralization is spatially related to regional tectonic discontinuities and occurs at, or below, a regional unconformity between late Paleo- to Meso-Proterozoic clastic rocks and underlying, locally Paleoproterozoic metasedimentary rocks (*Ruzicka, 1995*).

In the most accepted model, uranium deposition results from the mixing of saline, oxidized, uranium-bearing basinal brines with basement-derived reduced fluid at, or near, the intersection of fault zone(s) with the unconformity (*Kotzer and Kyser, 1995; Ruzicka, 1995; Fayek and Kyser, 1997*). Mineralization occurs when oxidising fluids transport the uranium into the sandstone, where it is deposited under reducing conditions (as a result of presumed interaction with organic matter, sulphides or methane).

Moreover, at the base of the basins, at the vicinity of the basement, very significant interactions can occur between these two environments with contrasted petrogeochemical characteristics (*Lorilleux et al., 2003; Derome et al. 2004; Kister et al., 2003*).

The **Waterberg** Basin in South Africa is a Proterozoic clastic basin unconformably overlying pre-Waterberg rocks. This basin shares similarity with the Athabasca (Canada) and Kombolgie (Australia) basins.

The aim of this study is to determine the mineralogical and chemical characteristics of sedimentary rocks, and the evolution of those at the time of the diagenesis and the later hydrothermal events, and from that to define their potentiality to generate uranium mineralization, in comparison with the highly mineralized basins.

## 2. Methodology

In order to achieve the objectives of this study, 34 samples were taken in a selected borehole RH1/72 in the north-east of the basin. It reached a depth of 1794.4 m crosscutting sandstones, mudstones, conglomerates and diabase intrusions.

- The chemical composition of the sediments was determined on these samples by using ICP-AES for major elements and ICP-MS for trace elements (CRPG, Vandœuvre-lès-Nancy, France).

- The chemical rock composition was interpreted with main geochemical diagrams, acquired with “Litho geochemistry” software-version 1.0 beta (COGEMA CREGU, 2001, developer: Patrick Frateczak).

- Petrographic and mineralogical analysis of the rocks (60 polished thin sections) were observed through optical observation (transmitted and reflected light). It was possible to determine the nature of the initial detrital assembly and the succession of crystallizations during the diagenesis and the hydrothermal evolution. The nature of the no determinable microphases in optical microscopy and possible zoning of minerals were studied using a Scanning Electron Microscope (SEM) Hitachi S2500 Kevex (“Service Commun de microanalyse” of the Université Henri Poincaré, Vandœuvre-lès-Nancy, France).

- In order to characterize the various types of lithologies and the transfers of elements, the silicates were analyzed with a CAMECA SX-50 and 100 electron microprobe (EMP) at the “Service Commun d’analyse” of the Université Henri Poincaré (Vandœuvre-lès-Nancy, France). An electron beam focused over a surface of approximately  $6 \mu\text{m}^2$  was used (running primary: 10 nA, tension: 15 kV, diameter of beam: 1.5  $\mu\text{m}$ , time of counting: 10 s (peak), 5 s (background noise)). Analytical conditions for accessory minerals analysis were 20 nA, 20 kV for major elements and 100 nA, 30 kV for trace elements.

- Fluid inclusions in quartz overgrowths were studied by CHAIX-MECA microthermometry, Raman microspectrometry (Labram, Dilor–Jobin Yvon, G2R laboratory - Nancy), in order to characterize the gas phases.

## 3. Regional overview

South Africa can be divided into two old cratonic domains (>2.5 Ga): the Kaapvaal and Zimbabwe Cratons in the eastern half and two younger cratonic domains (<2.5 Ga): the Angola and Maltahöhe Cratons in the western half (Zhao *et al.*, 2002). These cratons are

separated by mobile belts: the Limpopo Belt which resulted from the collision at 2.6 Ga (*Light, 1982; Van Reenen et al., 1992; Anhaeuser, 1990*) between the Kaapvaal and Zimbabwe Cratons and the Damara Belt from the collision between the Angola and Maltahöhe Cratons. The Limpopo Belt is subdivided into three zones: a central zone bordered by the northern and the southern marginal zones. The southern marginal zone is separated from the Kaapvaal Craton by the Proterozoic Soutpansberg and the Waterberg sediments.

**The Waterberg group:** The intracratonic clastic Waterberg group is a virtually undeformed thick Proterozoic succession of red beds. It is preserved in the central and north-western Transvaal in South Africa as well as in the eastern part of Botswana, in total covering an area of approximately 60.000 km<sup>2</sup> on the Archean and Paleoproterozoic of the Kaapvaal Craton (*Hanson et al., 2004*) including the 2.06 Ga Bushveld Complex (*Walraven and Hattingh, 1993; de Waal and Armstrong, 2000; Bulck et al., 2001; Eglington and Armstrong, 2004*). Waterberg deposition was thought to have begun during emplacement of the felsic rocks of the Bushveld Complex (*Allsopp et al., 1989*). It is estimated to be 1.9 - 1.7 Ga old (*SACS, 1980; Jansen, 1982; Tankard et al., 1982*), Truswell in 1990 states that it is younger than 2.05 Ga. Deposition of sediments comprising the Waterberg and Soutpansberg Groups followed. Activity along the south western edge of the Kaapvaal Craton is mostly assumed to have terminated at 1.93 Ga with formation of the Hartley basalts and other units of the Olifantshoek Supergroup (*Eglington and Armstrong, 2004*). The Waterberg Group sedimentation corresponds to an overall alluvial fan-fluvial braidplain-lacustrine basin model (*Van der Neut et al., 1991*). The basin is fault-bounded in the northern part of the Kaapvaal Craton (*Callaghan et al., 1993*). It consists of twelve formations, some of which grade laterally into others (*Callaghan et al., 1991*). Across the Waterberg plateau and adjacent areas, the group has a composite stratigraphic thickness of as much as 7 km (*Hanson et al., 2004*) comparable to the initial thickness of the Athabasca basin.

**The Mogalakwena Formation:** (where the studied borehole RH1/72 come from), 1250 to 1500 m thick (*Callaghan et al., 1991*), is located in the north-eastern and northern reaches of the Main Waterberg Basin (Fig. II. 1). It has a conformable transitional lower boundary with the Makgabeng Formation. Where the latter is not developed, the Mogalakwena Formation unconformably overlies pre-Waterberg rocks. The upper boundary is a conformable, transitional contact with the Cleremont Formation (*Tickell, 1975*). It is presumed that it has been deposited by large braided rivers (*Tickell, 1975*) flowing from high-lands in the

northern-northeast towards a distant sea in the southwest. An extensive braidplain was formed with a gradation of facies from the north-east towards the southwest (*Callaghan et al., 1991*).

**Post-Waterberg dolerites:** Dolerite occurs as sills, irregular bodies and dykes intruding the Waterberg group and underlying rocks. Paleomagnetic and geochronological data indicate that many of these intrusions belong to the ~ 1.1 Ga Umkondo Igneous Province, which extends over much of South Africa (*Pancake, 2001; Hanson, 2003*). *Hanson et al.* showed in 2004 that some of the post-Waterberg dolerites are considerably older than the Umkondo Province and were emplaced at ~ 1927 and ~ 1879 to ~ 1872 Ma, providing a significantly tighter bracket on the age of the Waterberg Group than previously available. U - Pb age of ~ 1879 Ma for dolerite intrusion sample (*Hanson et al., 2004*) constrains the Mogalakwena Formation and underlying Waterberg units to be pre 1879 Ma.

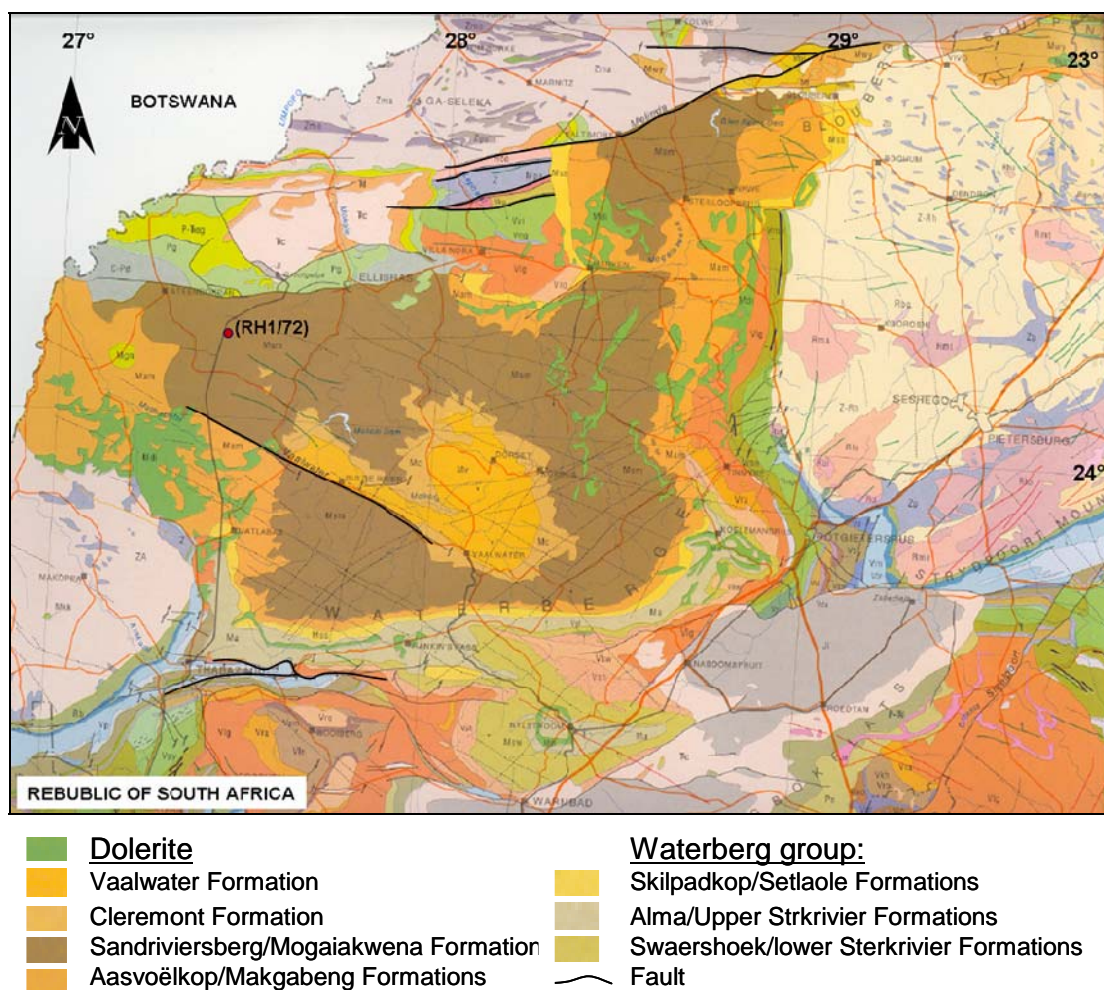


Figure II. 1: Map of Waterberg basin in South Africa, with the localization of the studied borehole RH1/72.

#### 4. Characteristics of the sediments

They are globally composed of fine sandstones followed by conglomerate with carbonated matrix, and then red fine to coarse sandstones.

Sandstones are very fine to coarse grained (very fine with clasts of mudstone at 782 m and from 585.5 to 724 m), pink and red, rich in angular or rounded, a little corroded, faintly deformed quartz, surrounded by abundant iron oxides, in an argillaceous, sometimes carbonated matrix. Weak and fine overgrowths of quartz are locally visible (Fig. II. 2), especially at 476.4 m and from 1012 to 1075 m. Pebbles of polycrystalline quartz or polymict pebbles (quartz + calcite + plagioclase) were also observed. Angular or rounded, altered grains of potassic feldspar and plagioclase are frequent. Some neo-formations of adular on potassic feldspar are locally visible (at 406 m). Deformed, altered flakes of biotites and muscovite are more or less frequent; sometimes oriented, with iron oxides underline their cleavages, sometimes in the shape of fans. There are some included biotites in quartz. Carbonates are quite frequent all over the drill hole from 406 m, between grains or in fractures. Chlorite neo-formations are quite frequent in altered feldspar or in the argillaceous matrix (Fig. II. 2) between the two intrusions of diabase (between 1012 and 1375.9 m). Fractures filled by chlorite neo-formations or quartz cut the pebbles in a chloritic or illitic matrix in the conglomerate at 1358.9 m. Alteration of feldspars and micas is more important toward the base of the drill core. From 585.5 m red sandstones start to be white (important illitization) toward the base of the basin, at the contact with the diabasic intrusion, hematite dissolved by reducing fluids. Accessory minerals are frequent, rather concentrated in layers, or as disseminated minerals disseminated: much of magnetite, monazite, zircon, titanite, epidote, tourmaline, chromite, xenotime, titanium dioxides, allanite, ilmenite, barite, apatite, altered apatite (solid solution between apatite and britholite with replacement of Ca et P par Si, Th, U ...), and zones of alteration of monazite, with thorite. At 1411.6 m fine fractures, in sandstone (at the contact with the ultrabasic rock), are filled by small roses of pyroxene (Fig. II. 3) and aggregates of quartz grains a little larger, or around grains of spinel which is abundant, disseminated or concentrated in layers, or even in the fractures in the spinel crystals.

Figure (II. 4) represents the paragenesis in Waterberg sediments.

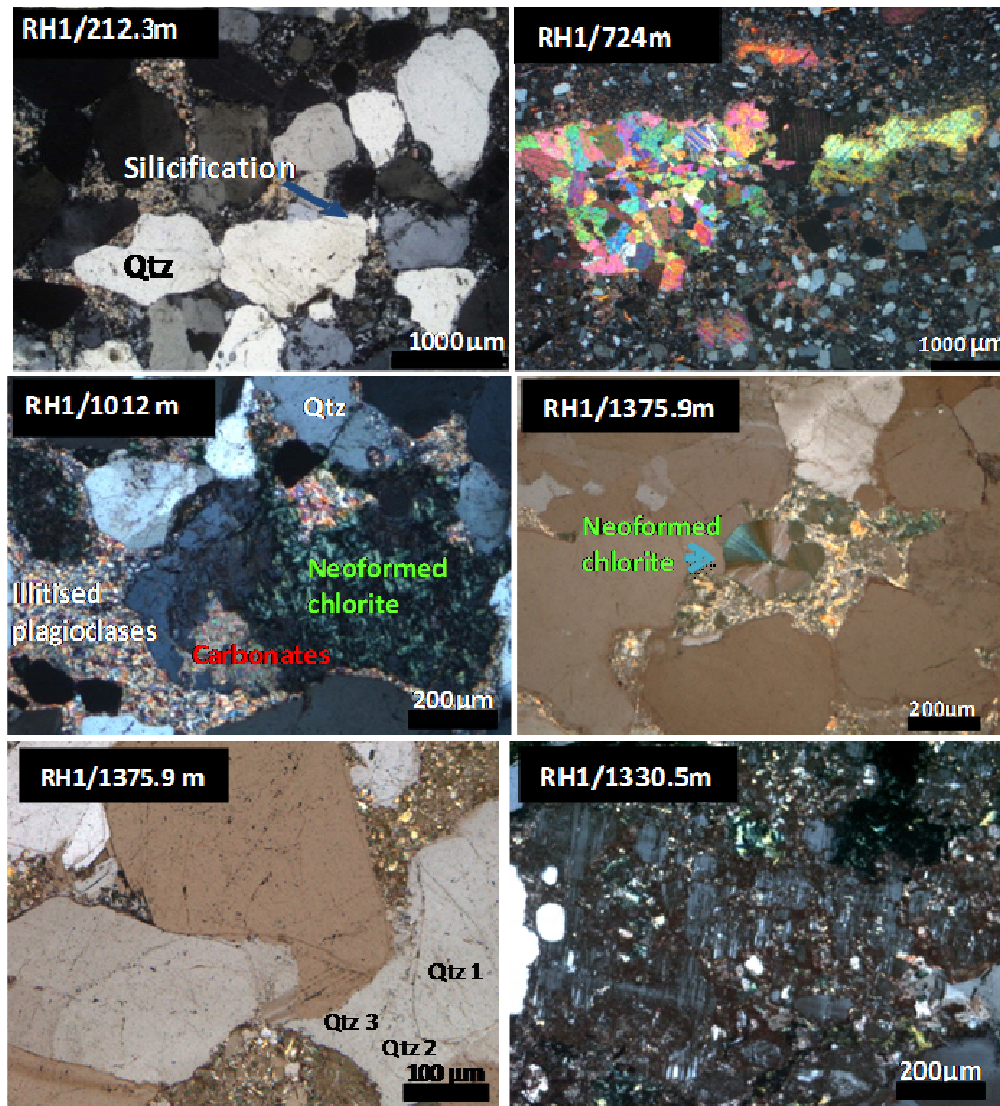


Figure II. 2: Silicified sandstones with quite visible overgrowths in the basin of Waterberg (212.3 - 1375.9 m). Carbonates and chloritic neo-formations are frequent in the matrix (1012 - 1375.9 m) or in fractures (724 m). Potassic feldspars are sometimes quite altered (1330.5 m).

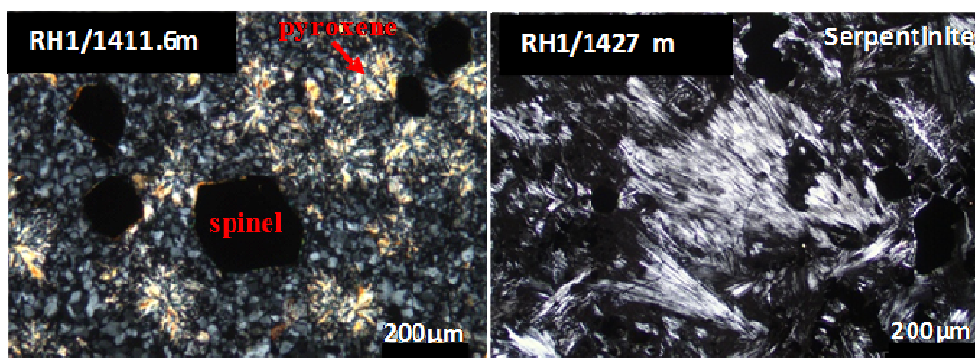


Figure II. 3: Fine fractures, in sandstone at the contact with the serpentinite (at 1411.6 m), are filled by small roses of pyroxene and aggregates of quartz grains, or around grains of spinel.



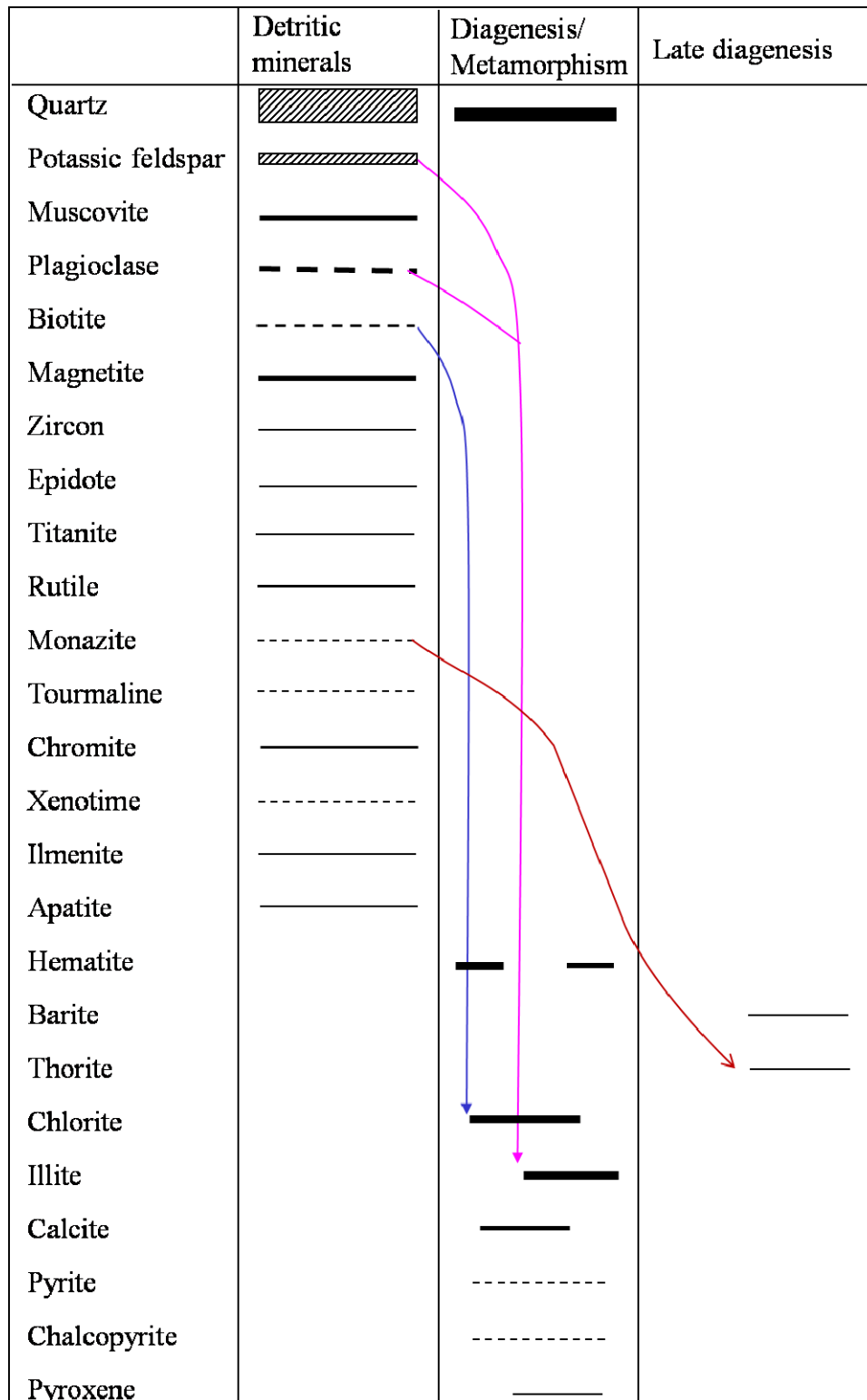


Figure II. 4: Mineral paragenesis established in the Waterberg sandstones. The diagram represents successively detritic minerals deposition, diagenesis or metamorphism and late diagenesis stages.

## 5. Characteristics of the dolerite

There are two dolerite intrusions: a first one located between 747.1 and 756.5 m, and a second one at the base of the drilling, from 1592.6 to 1794.4 m. The dolerite typically presents a doleritic structure with elongated plagioclases phenocrysts, clino- and ortho-pyroxene, magnetite variably altered to hematite (martitisation), muscovite flakes (at the expand of plagioclase), secondary hornblende replacing partially pyroxene minerals and twinning (Fig. II. 5), chlorite neoformed flakes replacing feldspars, and disseminated idiomorphic epidote. Disseminated chalcopyrite is sometimes included in martite. Some tourmaline needles are included in rare, neoformed idiomorphic quartz (-1562.6 m) and pyroxene crystals.

At the roof of the dolerite (at 1525.8 m), there is a layer of about 100 m of **serpentinite**, described macroscopically as black shale. The serpentinite is rich in chromite (Fig. II. 3). This ultrabasic rock can be a part of a large sill emplaced at the contact with the basement as seen in Kombolgie basin (Oenpelli sill).

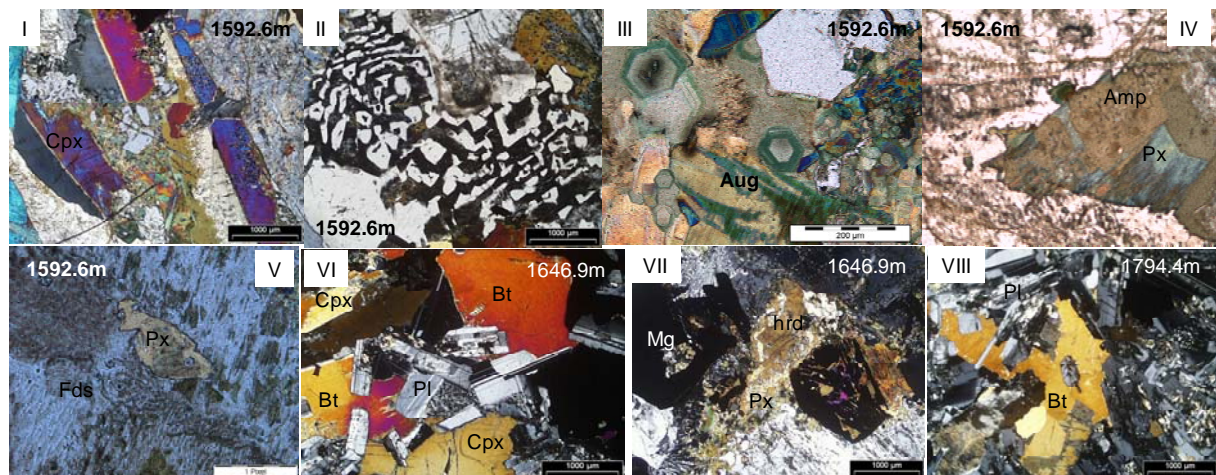


Figure II. 5: The dolerites are characterized by: I. of twinned clinopyroxenes, II. myrmekitic feldspars, III. Chloritized augite, IV & V. pyroxenes partially replaced by amphibole and feldspars, VI, VII & VIII: twinned plagioclase, biotite, and magnetite.

## 6. Sandstone geochemical characteristics

### 6.1. Geochemistry of the major elements

The global mineral composition of the Waterberg basin sediments has been determined using the Q-A diagram (modified after *Debon and Le Fort, 1988*) and the ternary classification diagram.

Sandstones of the Waterberg basin are essentially composed of quartz with abundant feldspar and clay minerals. Two groups can be distinguished: one mainly composed of quartz, K-

feldspar and plagioclase and another richer in clay minerals mainly deriving from the alteration of feldspars (Fig. II. 6). Comparatively, the Athabasca basin is much more quartzose. The very fine grained sandstones at 600.6 and 724 m are the richest in feldspars K-feldspar and plagioclase. The abundance of clinopyroxenes in sample 1411.6 m (Fig. II. 7) gives it a negative Q value, corresponding to an influx of calcium in the sandstone.

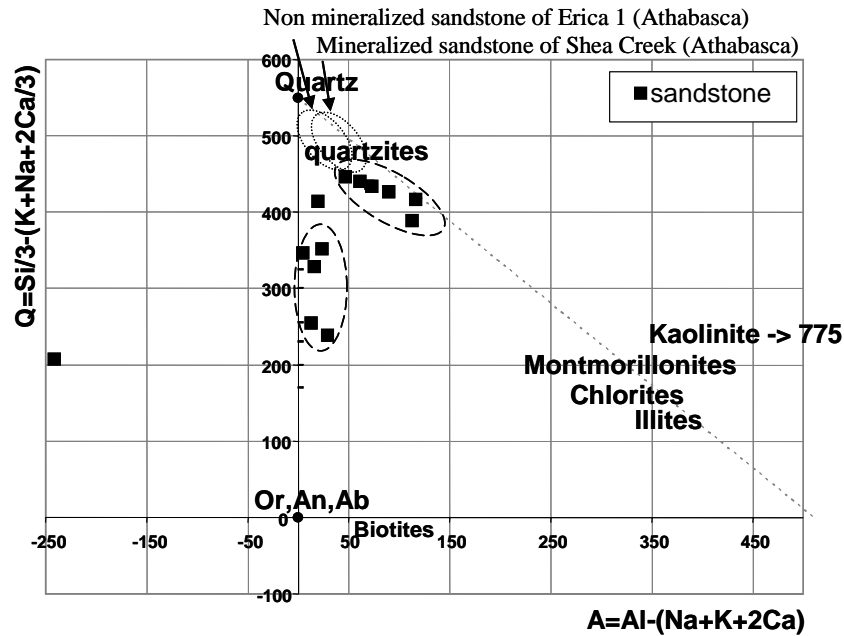


Figure II. 6: Sediments of Waterberg in the quartz - peraluminous index diagram.

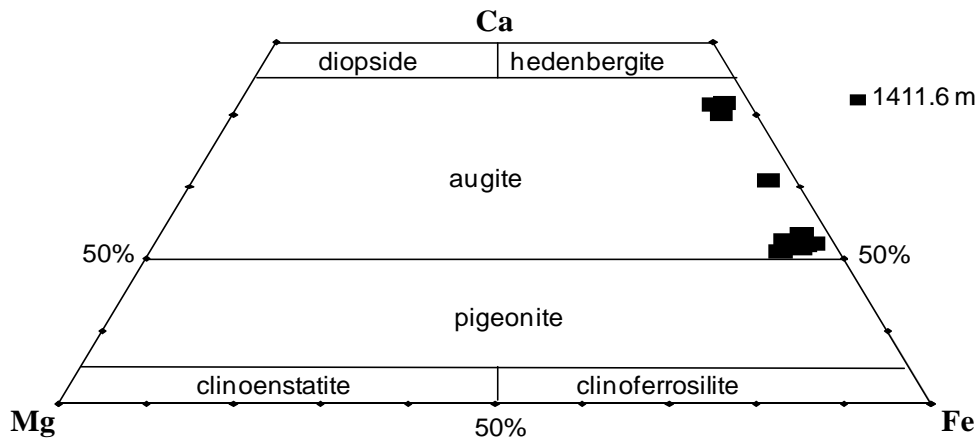


Figure II. 7: Pyroxene composition of sample 1411.6 m in the clinopyroxene diagram.

In the triangular diagram (Fig. II. 8) these sandstones appear rich feldspars with small amounts of illite/muscovite and/or kaolinite, and/or chlorite. Samples close to the dolerite (1012 and 1375.9 m) are characterized by high chlorite proportions. Sample at 1375.9 m is the richest in chlorite as also observed in thin section. Non-mineralized Athabasca sandstone contains illite and kaolinite, chlorite appears only in mineralized sandstone.

The Na/Al versus K/Al diagram allows discriminating the relative proportion of plagioclase and K-feldspar in the sandstone. In the upper part of RH1 drill core (19.9 to 120.8 m), the potassic feldspar is predominant and the plagioclases are almost completely altered, then at 512.8 and 557 m, the sandstones become richer in plagioclase (Fig. II. 9 & II. 16), and potassic feldspar becomes again predominant close to the dolerite (1012 to 1375.9 m).

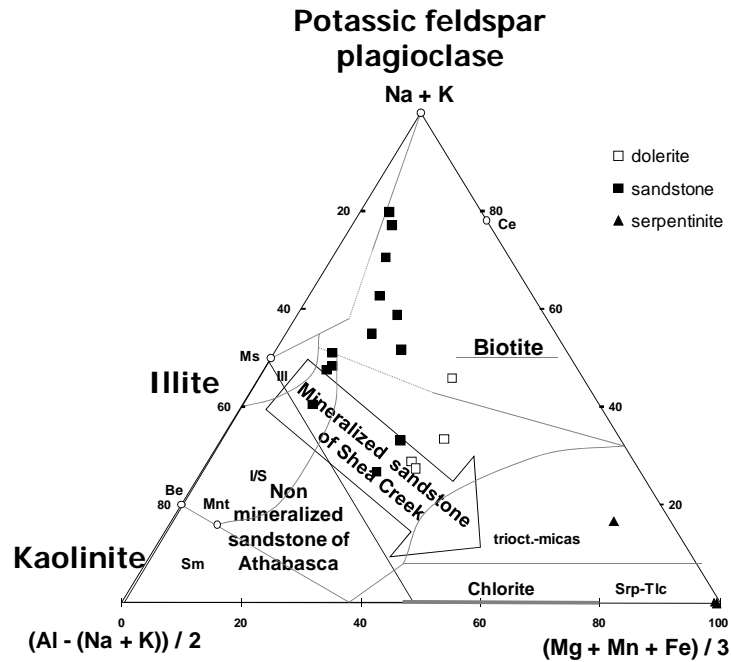


Figure II. 8: Relative proportions of feldspars - clays - micas (independently of the quantity of quartz) diagram for the sediments of Waterberg.

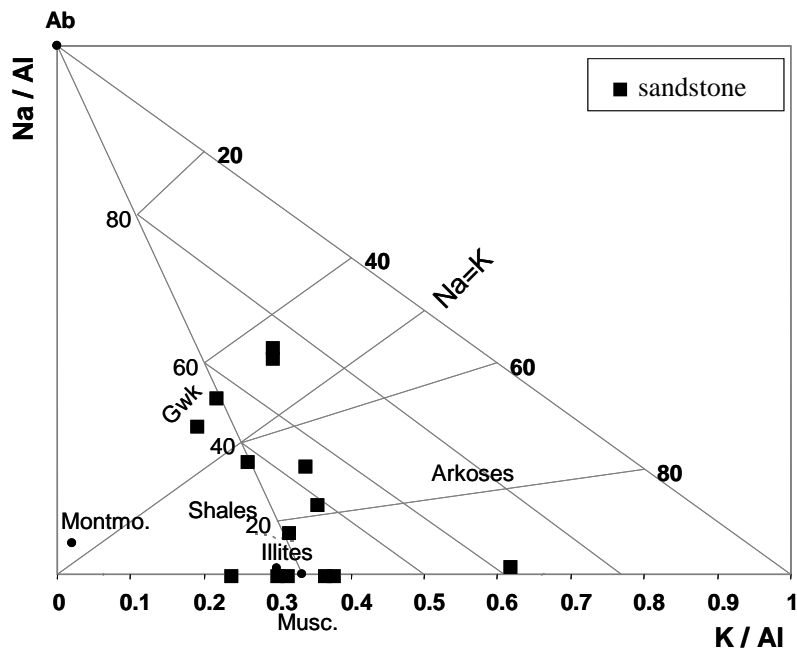


Figure II. 9: Na/Al versus K/Al diagram allows discriminating the relative proportions of plagioclase, potassic feldspar and clays in the sediments of the Waterberg basin.

## 6.2. Geochemistry of the trace elements

The Waterberg sandstones are much richer in trace elements (high Rb and Ba from K-feldspar; high Ti, Th, Y, REE, Zr from detrital accessories) than those of Athabasca reflecting their immaturity (Fig. II. 9). Light Rare-Earth Elements (LREE) are also abundant because of the presence of monazite. The Th/La ratio has been used to evidence LREE leaching in silicoclastic basin resulting from monazite alteration (Cuney and Mathieu, 2000). On the diagram Th versus La (Fig. II. 11, II. 13, II. 17) the Waterberg sandstones have Th/La ratios ranging from 0.2 and 0.4, similar to those of the Archaean and Proterozoic sediments, except some sediments at 120.8, 1075, 1375.9, 1411.6 m with Th/La ratios of (0.58, 0.43, 0.52, 0.52), indicating a slight leaching of the LREE, but less important than in the Athabasca sandstone.

The Th/U ratio in most samples of the Waterberg basin shows values around the average crustal ratio between 2 and 5. On the diagram (Fig. II. 12, II. 13, II. 17), samples at 120.8, 1304 and 1375.9 m are characterized by high Th contents (35, 25 and 67 ppm) and higher Th/U ratios (12.9, 6.6 and 10.3) indicating a probable U loss. It is interesting to note that two of these samples 12.8 and 1375.9 also show evidence of monazite alteration which tends to confirm the U loss hypothesis for these sample. Comparatively, the Athabasca sandstones away from the mineralized area present higher Th/U ratios indicating the absence of mobile uranium in that basin.

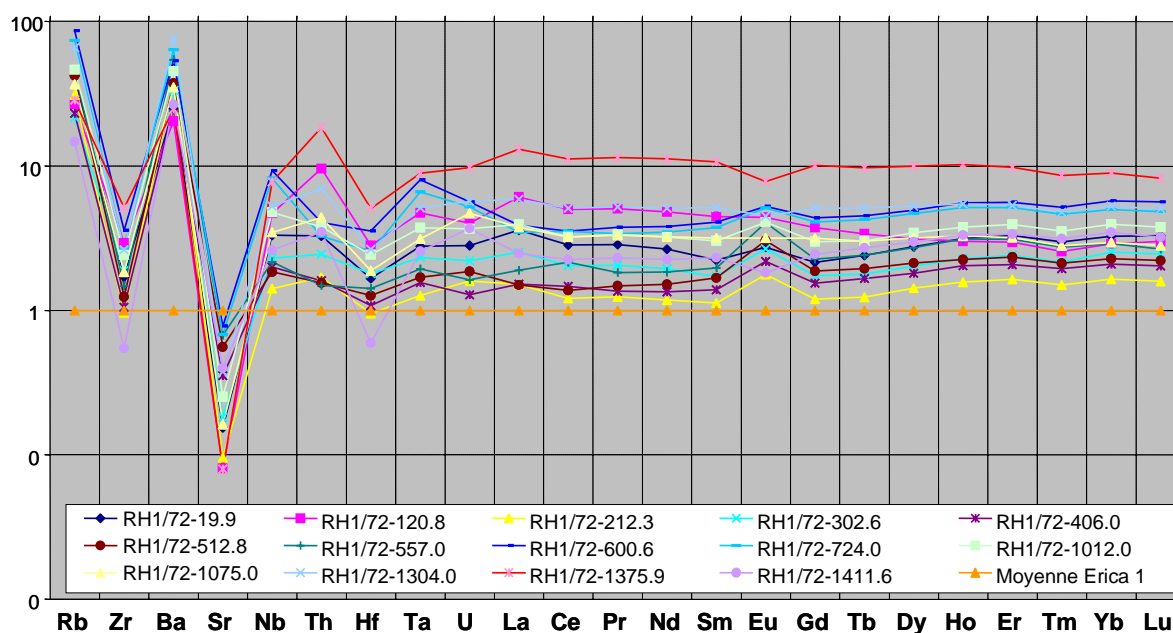


Figure II. 10: Trace elements abundances of the sandstones of Waterberg normalized to the sandstones of Erica 1 drill core (Athabasca).

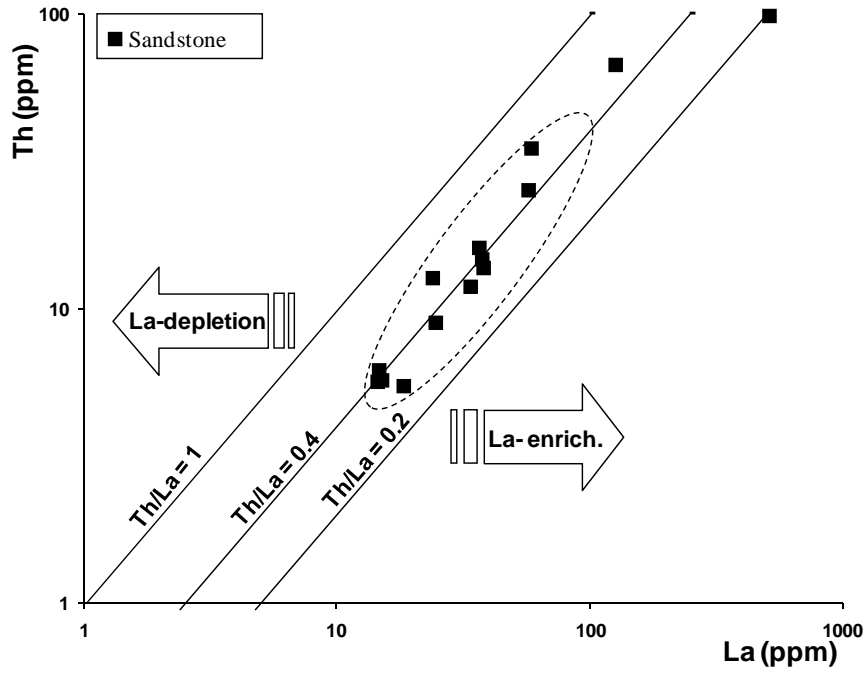


Figure II. 11: Th – La (ppm) diagram for the sediments of Waterberg.

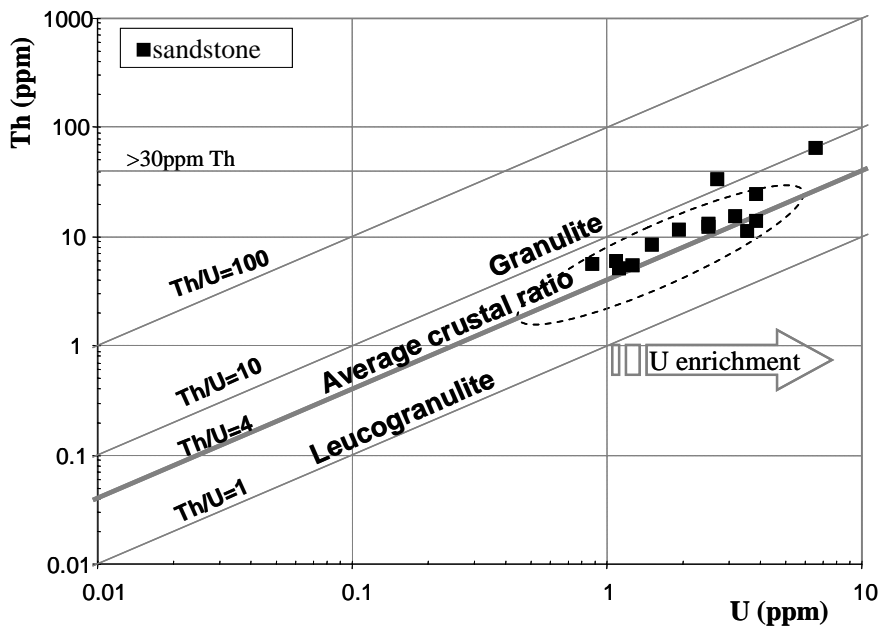


Figure II. 12: Th - U diagram for the sediments of Waterberg basin.

In order to quantify the loss of Intermediate Heavy Rare Earth Elements (IHREE) observed in the uranium mineralized basins we have used the index  $Ho^* = (\sqrt{Gd_{(N)} * Yb_{(N)}})$  (Kister, 2003). The  $Ho_{(N)}/Ho^*$  ratios, calculated for the sediments of Waterberg (0.647 and 0.86), do not indicate a significant leaching of IHREE. They are higher than those observed in the basins of Athabasca and Kombolgie which decrease down to 0.4 and 0.5 (Fig. II. 14; II. 17) which reflects a more significant IHREE loss.

The average K/Rb ratio of the Waterberg sediments are around 1000 (0.4 to 3.5 wt % K) (Fig. II. 15) with ratios between 700 (at 1411.6 m) and 1700 (at 1304 m). Highest values indicate a dominant control of K/Rb ratio by potassic feldspars **K/Rb ratios of sediments are typical of non - altered sediments deriving from a metamorphic or plutonic source** from granulite facies terranes (*Barbey and Cuney, 1982*). They are similar to those observed in sandstones of the Athabasca basin but with lower K content related to the lower feldspar content of these sediments. The high K/Rb ratios of the Athabasca come either from the leaching of Rb during diagenesis, by alteration of rare detrital feldspars to kaolinite, or represent the signature of a granulitic source of the sediments.

The Zr/Y ratio is an indicator of the degree of zircon alteration. In fresh zircons this ratio exceeds 100 (Fig. II. 16 & II. 17), while altered zircons are typically characterized by Zr/Y ratios between 100 and 20 (it's close to 20 in Athabasca basin) (*Kister, 2003*). In the Zr – Y diagram the Waterberg sandstones show Zr/Y ratios ranging from 20 to 10 ( $\approx 3$  at 1411.6 m), in accordance with the zircon alteration observed with BSEM and probably mostly for the Waterberg sediments, the presence of Y-bearing detrital accessory minerals, such as xenotime (which replace zircon Fig. II. 18-i), Y-titanite is absent from detritic accessory mineral phases of Athabasca. The Zr/Y ratio decreases towards the base of the sedimentary pile (Fig. II. 16) with the decrease of accessory minerals abundance (monazite, titanite, xenotime, epidote and allanite).

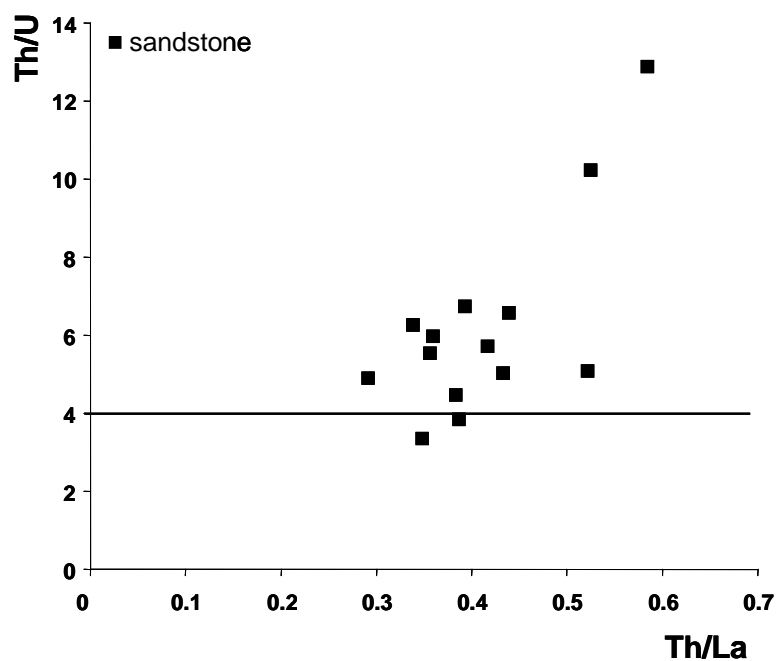


Figure II. 13: Th/U-Th/La diagram for the sediments of Waterberg.

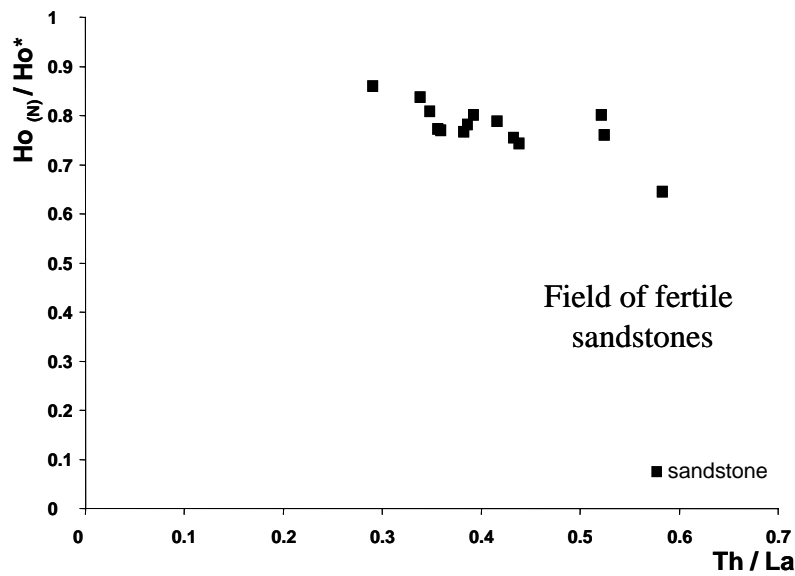


Figure II. 14: Th/La - Ho<sub>(N)</sub>/Ho\* diagram for the sediments of Waterberg.

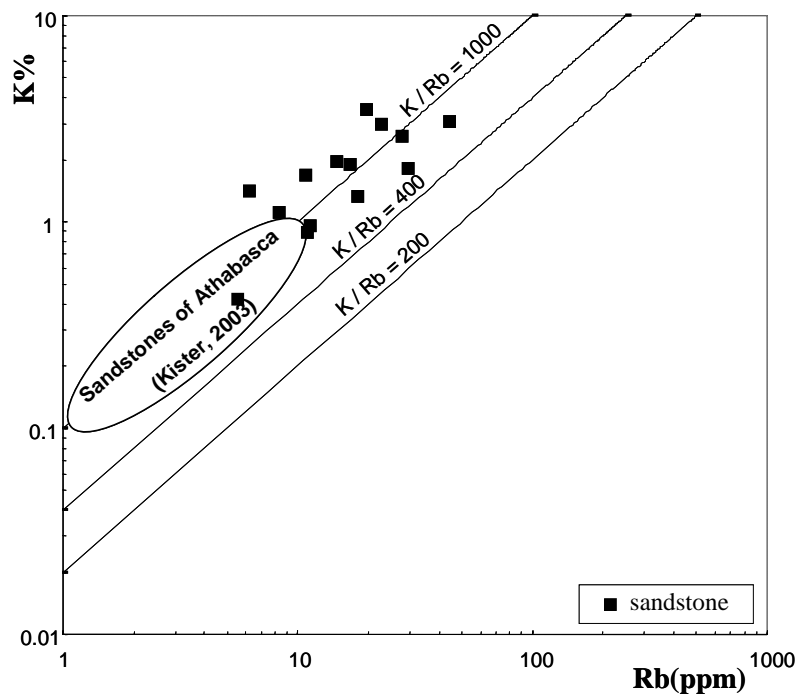


Figure II. 15: K - Rb diagram for the sediments of Waterberg.



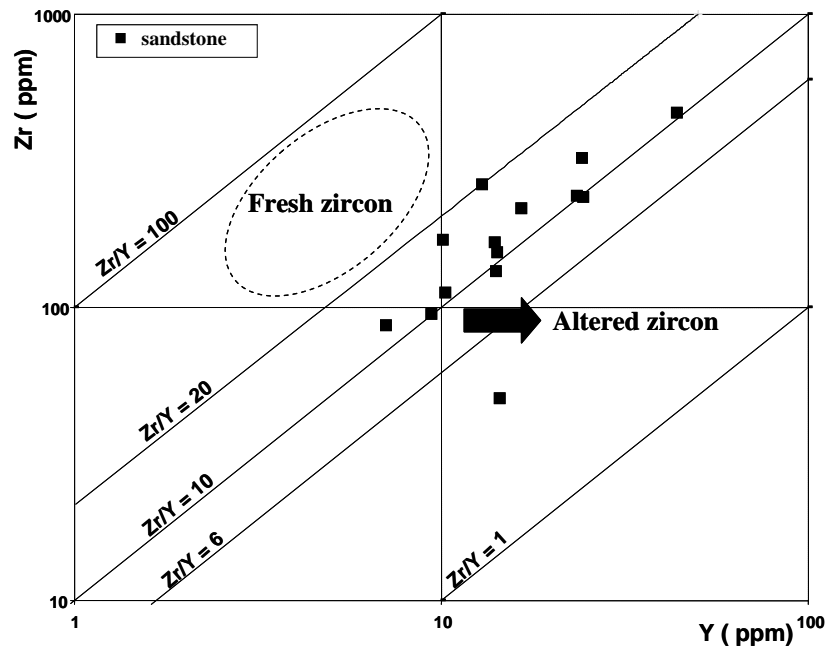


Figure II. 16: Zr - Y diagram for the sediments of Waterberg.

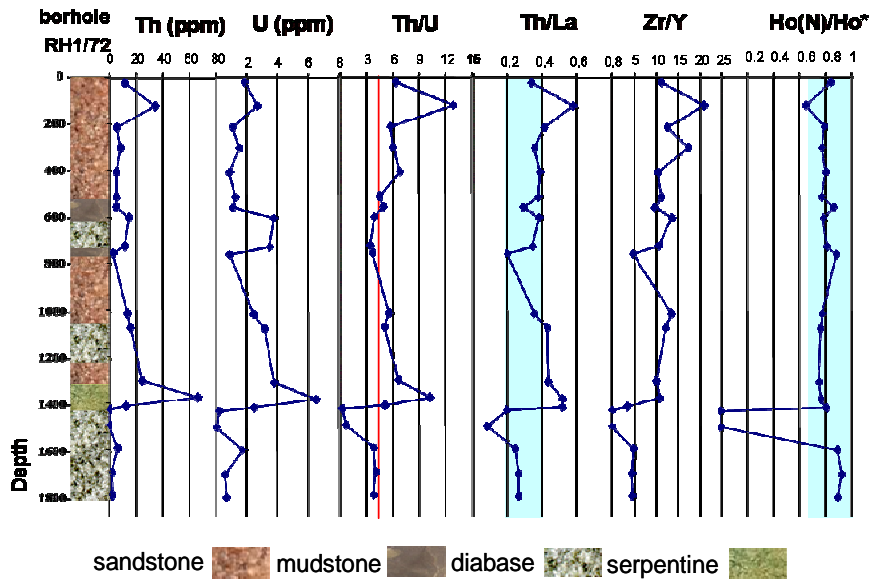


Figure II. 17: Evolution of Th and U concentrations, and Th/La, Th/U, Zr/Y, Ho<sub>(N)</sub>/Ho\* ratios with the depth in the basin of Waterberg.

### Zircon in the Waterberg basin

Detrital zircons are abundant in the sandstone. Primary zoning is generally well developed (Fig. II. 18-ii-iii), with a moderate alteration (less than in the Athabasca sandstone) (Fig. II. 18-ii-iii-iv-v-vi). Sometimes inclusions of apatite, monazite, galena and quartz are visible

(Fig. II. 18-iv). The altered sections of the zircons are depleted in Zr and Si, and enriched up to 7 atoms of P, Y, Fe, Ca, and U (Fig. II. 19 & II. 20). But in the Waterberg sediments the alteration of zircon is mainly developed along some specific growth zones which may have been already metamict before alteration. In the Athabasca, this alteration transects the primary zircon zoning and therefore is much more important.

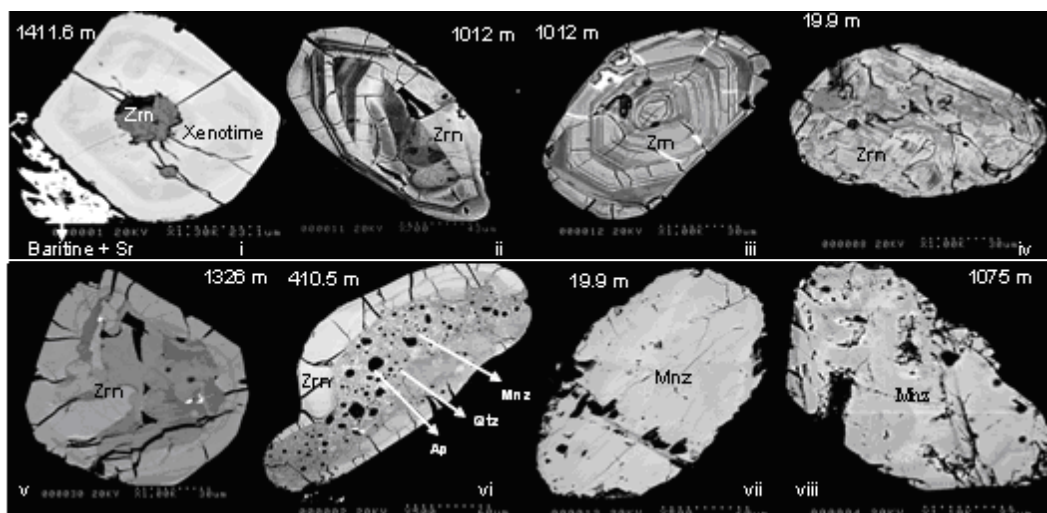


Figure II. 18: Xenotime replacing zircon (i), zircons with generally well developed primary zoning (ii, iii) with a slight alteration (ii-iii-iv-v-vi), sometimes inclusions of apatite, monazite and quartz (vi). Detrital monazite crystals are common (vii-viii) in the Waterberg sediments

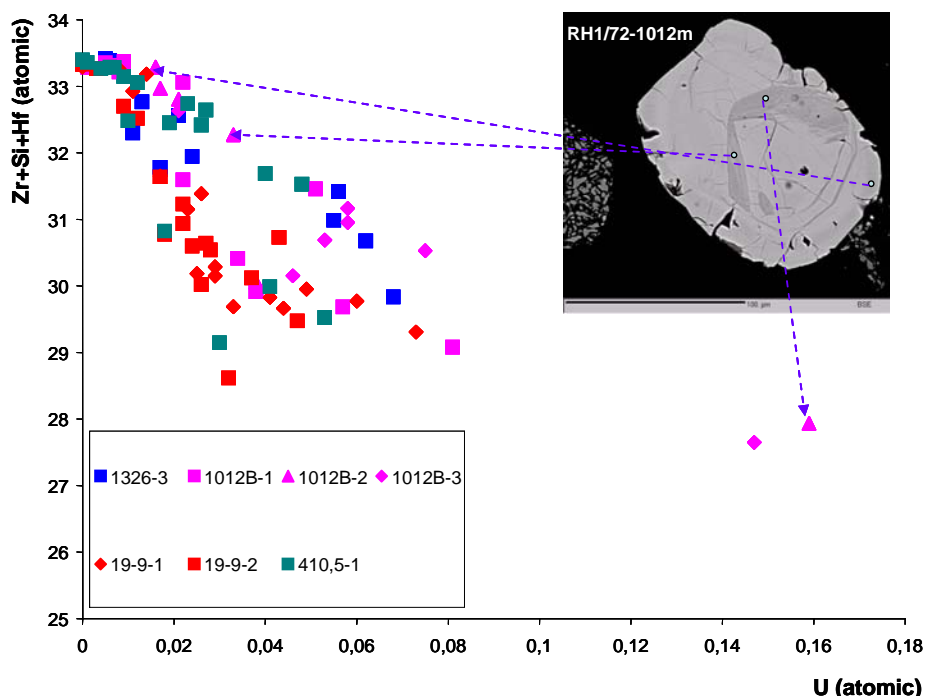


Figure II. 19: Substitution of Zr + Si + Hf by U in zircons from the sandstone of Waterberg. Inserted a SEM - BSEM image of an altered zircon crystal.

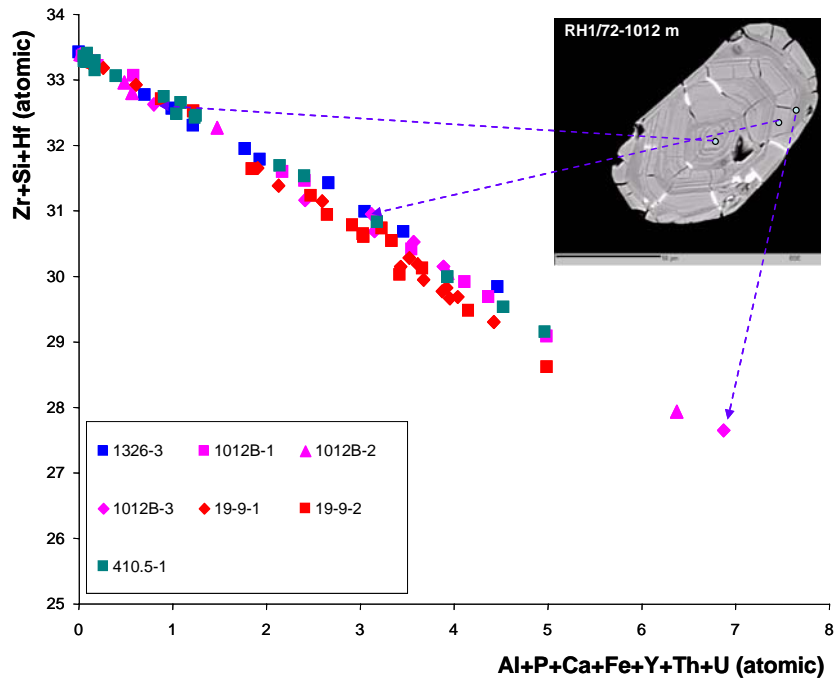


Figure II. 20: Substitution of Zr + Si + Hf by Al + P + Ca + Fe + Y + U in zircons from the sandstone of Waterberg. Inserted a SEM - BSEM image of an altered zircon crystal.

**Monazite in the Waterberg basin**

In the Waterberg sandstone preserved detrital monazite crystals are widespread in the cement (Fig. II. 18-vii-viii) unlike the Athabasca basin where they are only preserved when included in detrital quartz grains (*Hecht and Cuney, 2000*). At the margin up to 5 Si + Ca + Th + U + Y atoms substitute P + LREE in the monazite structure (Fig. II. 21). However this substitution represents the primary composition of the monazite crystals.

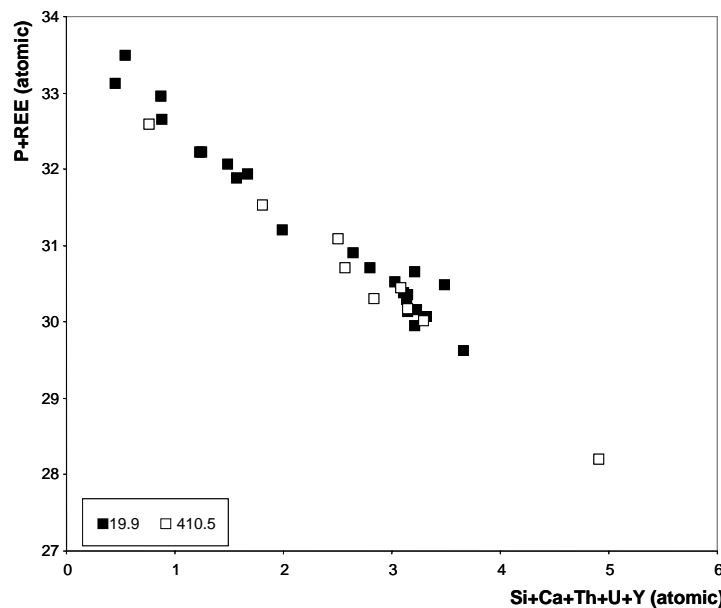


Figure II. 21: Substitution of P + REE by Si + Ca + Th + U + Y in detrital monazites from the Waterberg sandstones.

### 6.3. Cristallogéochimie des minéraux argileux

Biotite and muscovite are frequent all along the drilling sometimes as small flakes, except between 503.5 and 557 m. White-mica form a solid-solution well defined between the muscovite of detrital origin and phengite (poorer in Al and richer in Fe – Mg - Si, Fig. II. 22) which crystallized during the diagenesis. In the diagram of Velde (Fig. II. 23), detrital biotites are almost all chloritized.

**Neoformed chlorites** are spread over the chamosite; ripidolite and brunsvigite fields (Fig. II. 24) (from the cement of sandstones between the two intrusions of diabase at 1330.6 - 1075 - 1039.3 - 1375.9 m). They correspond to trioctahedric chlorites (Fig. II. 25). They differ from the chlorites of Athabasca which are chlorites di-trioctahedric rich in Al - Mg (*Lorilleux et al, 2003*). For the newly formed chlorites, it is possible to determine their temperature of crystallization from the proportion of Al in the tetrahedral site (*Cathelineau and Nieva, 1985; Cathelineau, 1988*) according to the formula:  $T (^{\circ}\text{C}) = -61.92 + 321.98 (\text{Al (IV)})$ . The majority of **newly formed chlorites** of Waterberg, compared to chlorites of Los Azufres and Salton Sea (*Cathelineau, 1988*) have crystallized at temperatures **more than 300 °C** (Fig. II. 26). Such temperatures are higher than diagenetic temperatures for the Athabasca (150 to 200 °C) and Kombolgie ( $150 \pm 15$  °C) estimated from fluid inclusions data.

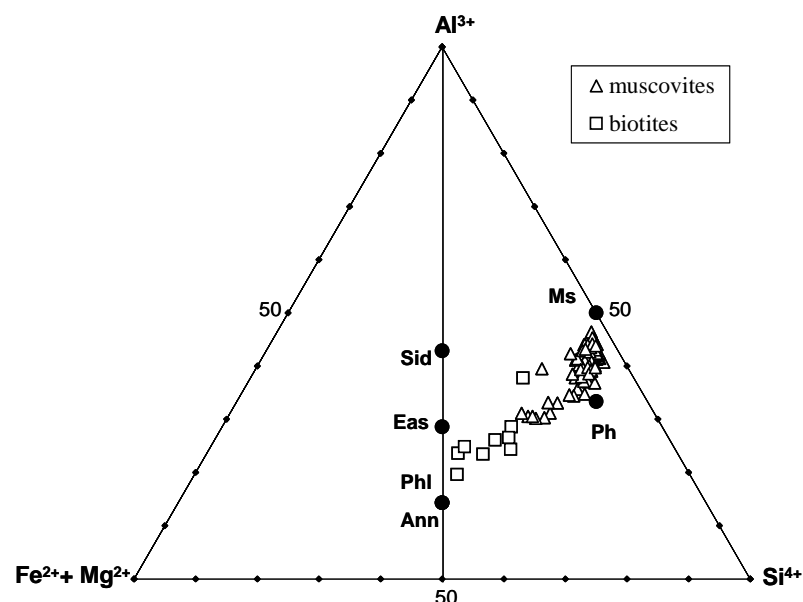


Figure II. 22: Classification of white micas of Waterberg in a diagram Si - Al - (Fe + Mg) (*Monier, 1985*).

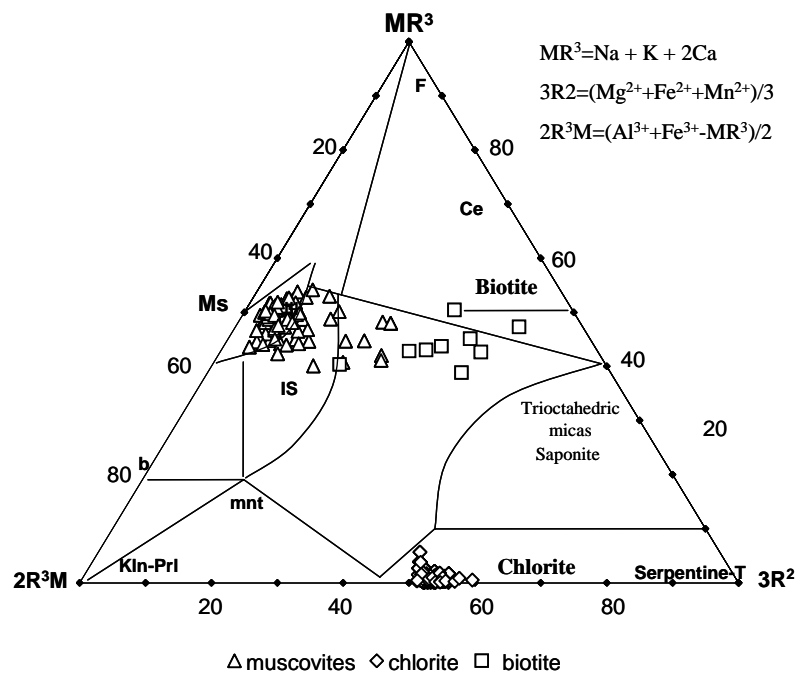


Figure II. 23: Characterisation of types of micas of Waterberg in the diagram of *Velde (1977)*.

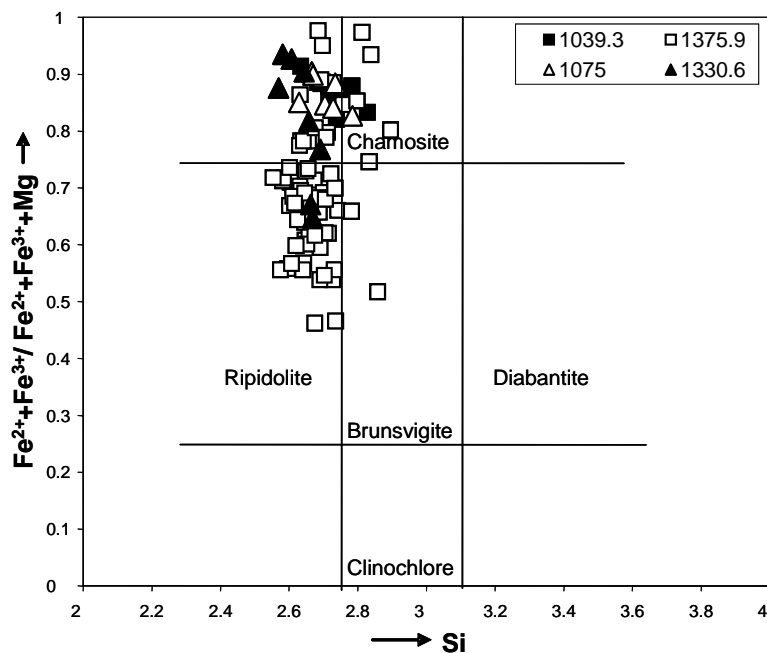


Figure II. 24: Nature of chlorites of Waterberg in the diagram of *Foster (1962)*.

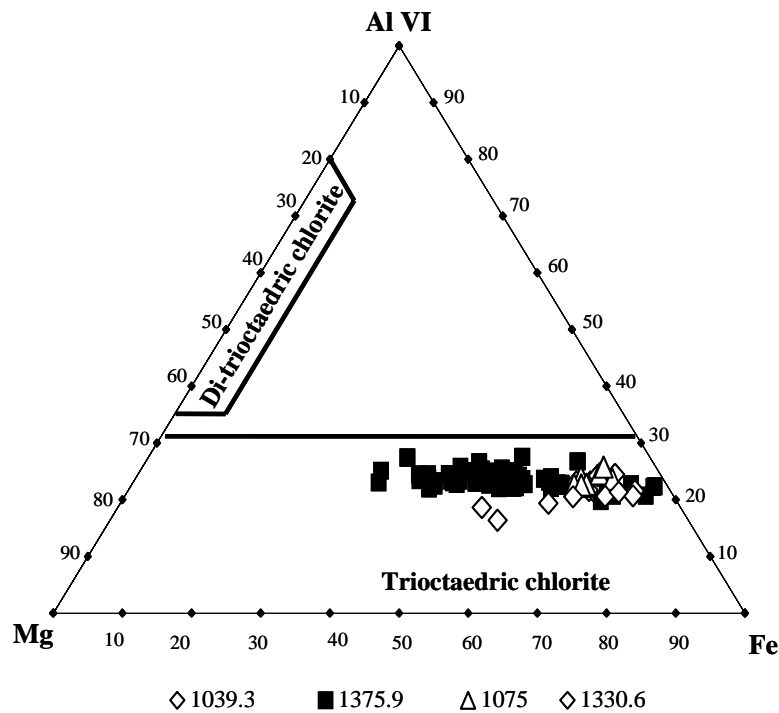


Figure II. 25: Classification of chlorites of Waterberg in triangular diagram Al (VI) – Mg - Fe (Chlorites of Athabasca in *Lorilleux, 2001* as a reference).

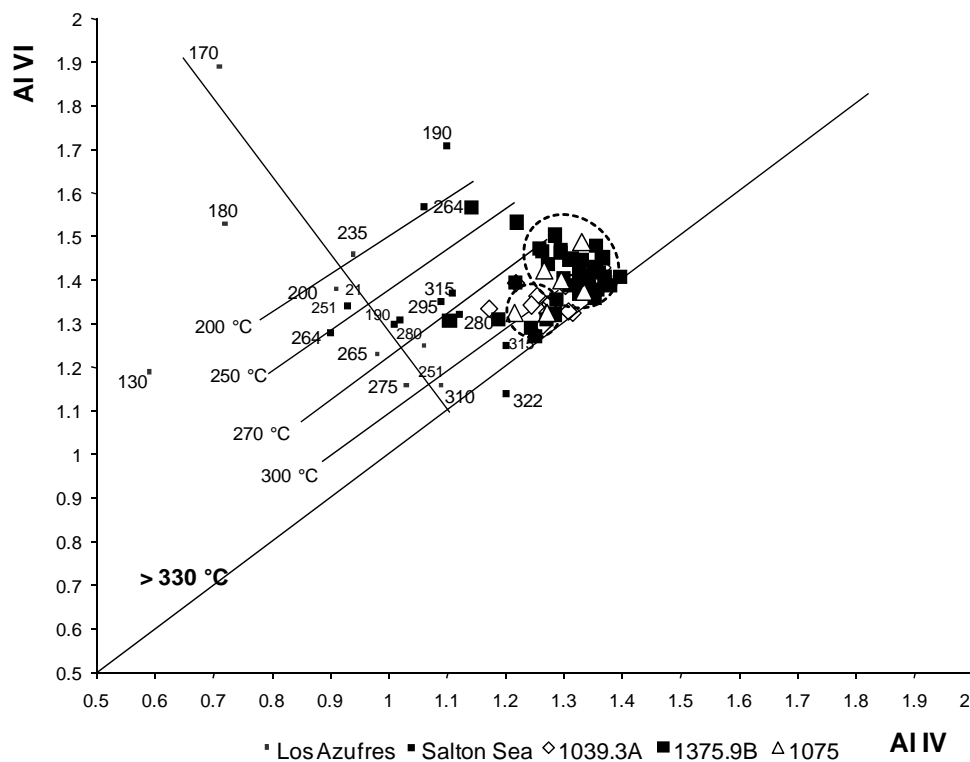


Figure II. 26: Diagram Al (VI) - Al (IV) for the chlorites in the Waterberg sediments.

## 7. Fluid inclusions study

Fluid inclusions have been studied in diagenetic quartz, which cement the sandstones of the samples located at depths of -1039.3 and -1375.9 m of the RH1/71 drill core.

**Petrographic observations and microthermometry** showed that fluid inclusions are composed of a liquid phase and a vapour bubble occupying a volume of 10 to 75 % at ambient temperature. Some contain trapped solids like: rutile, nahcolite, silicate identified by Raman microprobe and other non identified solids.

3 types of inclusions were identified (Table II. 1):

- L<sub>w-c</sub>: aqueous fluids with traces of CO<sub>2</sub>;
- L<sub>c-w</sub>: aqueous fluids with > 50 % vol. of vapour;
- L<sub>w</sub>: aqueous fluids.

Gases: Raman analyses has only revealed the presence of CO<sub>2</sub> (59.5 - 99.9 %) and very little CH<sub>4</sub> in the vapour phase of the inclusions.

Te values are between -13.5 and -59.8 °C. Tm<sub>ice</sub> values are between -0.2 and -17.9 °C. Salinity is lower than the one measured in the Kombolgie and Athabasca sandstone (Tm<sub>ice</sub> close to -25 °C or lower corresponds to the Na - Ca brines in the Kombolgie sandstone, *Derome et al., 2003*).

Location	Microthermometry							Raman data: Mole %		
	IF type	Tm CO2	Th CO2	Tm cl	Te	Tmice	gas/H2O	CO2	CH4	N2
1039.3a-2-1	Lw-c	-58.5	30.3	6.9	-27.6	-3.9	40	99.5	0.5	
1039.3a-2-2	Lc-w	-58.5	30.7	7		-4.4	40			
1039.3a-2-3	Lw				-37.3	-2.1				
1039.3a-2-4	Lw-c	-58.5	21.7	4.9	-17.4	-2.5	15	99.5	0.5	
1039.3a-2-5	Lw-c	-58.4	19.8	3.3		-5.5	10	99.9	0.1	
1039.3a-2-6	Lw-c	-58.2	20.3	7.1	-27.9	-6.1	10	100	N.D.	
1039.3a-2-7	Lw				-13.5	-3.6				
1039.3a-2-8	Lw				-58.4	-16.9				
1039.3a-2-9	Lw				-59.8	-15.6				
1039.3a-2-10	Lw				-60.5	-15.6				
1039.3a-2-12	Lw-c	-57.7	24.3				30			
1039.3a-2-13	Lc-w	-58.8		6.9	-42.9		45	100	N.D.	
1039.3a-2-14	Lw				-64.6	-21.7				
1039.3a-2-15	Lw				-66.7					
1039.3a-2-17	Lw				-15.9	-0.2				
1039.3a-2-18	Lw				-16.2	1.3				
1039.3a-2-19	Lw				-13.9	-1.3				
1375.9-1-1	Lc-w	-58.2		5.2	-34.6	-4.7	75	100	N.D.	
1375.9-1-2	Lc-w	-58.4		5.8		-3.4	50			
1375.9-1-3	Lc-w	-58.3	30.5	2.2		-17.9	50	100	N.D.	
1375.9-1-5	Lw				-29.8	-3.6				

Table II. 1: Summary of the previous fluid inclusion data obtained in diagenetic quartz of the Waterberg basin.

## 8. Discussion and conclusions

### 8.1. Characteristics of the diagenetic evolution of the sediments

The first diagenetic process observed in the Waterberg basin is the fine overgrowth aureoles around detrital quartz grains, occurring only locally in the sandstone, especially at -476.4 m and between -1012 and -1075 m. These overgrowths result from the dissolution of the detrital quartz grains under the pressure of the sedimentary pile. This silicification decreases locally the permeability of the formations for post-diagenetic fluid circulations. Neo-formations of adular on K-feldspars have been also observed at -406 m. The clayey matrix (frequent especially at -1012, -19.9, -1375.9, -120.8 and -1075 m) replaces sometimes former detrital grains, most probably feldspars. However, the clayey matrix misses completely in the zones where early quartz overgrowths are well developed. The abundance of hematite around the detrital grains and in the matrix of the sandstone indicates oxidizing conditions for the sedimentation. Detrital grains may be corroded, by green neo-formed chlorite (between 1012 and 1375.9 m, especially in the matrix of conglomerate at 1358.9 m between the two diabase intrusions. Carbonate veinlets are an index of post-silicification fluid circulations.

### 8.2. Degree of maturity of the sediments

In contrast with the very high degree of maturity of the clastic sediments of the basins of Athabasca (*Kotzer and Kyser, 1995; Renac et al., 2002; Kister et al., 2003*) and Kombolgie almost only composed of quartz and subordinate amounts of kaolinite and illite, the Waterberg sediments are rich in K-feldspar, plagioclase, biotite, chlorite and accessories. The stability of these minerals implies a much weaker alteration of the source area due either to more active tectonic conditions or to less hydrolyzing climatic conditions. These characteristics bring them closer to those of the basins of Fennoscandian shield. This conclusion and the dominantly angular shape of quartz and feldspars in some of the sediments and the polymictic character of the conglomerates indicate short transportation of the clastic particles. The great thickness of the Waterberg Group: up to 7 km (1250 - 1500 m for the studied Mogalakwena Formation), the weak transport and the low sandstone maturity probably result from very active tectonic conditions at the time of the Waterberg basin filling.



### **8.3. pH conditions**

The presence of feldspars in significant proportion, associated with illite and sometime carbonate in the cement, confers less acidic pH for the fluids in equilibrium with this paragenesis compared with the mineralized basins (kaolinite - illite equilibrium). Near neutral pH conditions are less favorable for U solubility.

### **8.4. Redox conditions**

During sediment deposition and diagenesis strongly oxidizing conditions are indicated by the presence of hematite located around detrital quartz grains, overgrowths and in the cement in the Waterberg basin. Bleaching has been observed at 585.5 m, increasing towards the base of the drill hole. This reflects the circulation of reduced fluid during or after diagenesis. The absence of dravite and the new formation of Fe-rich chlorites also indicate more reducing conditions during alteration.

### **8.5. P-T conditions of the thermal events**

Temperatures estimated from the composition of the newly formed chlorites in the Waterberg basin are over 330 °C. Such high temperatures and the presence of pyroxene neo-formation at 1411.6 m in the sandstone indicate the thermal influence of the diabase intrusions. The small amounts of CO<sub>2</sub> in the fluid inclusions can typically represent the vapour phase of such intrusions or eventually the result of decarbonation reaction leading to the neoformation of calcic pyroxene and not a diagenetic fluid. The CO<sub>2</sub> bearing inclusions represent an additional argument to assign the thermal event observed in the basin to these basic intrusions.

### **8.6. Evidence of hydrothermal alteration**

The silicification of the sediments has prevented significant diagenetic fluid percolation. The most important alterations (new formation of pyroxene and chlorite) are developed at the contact with the basic to ultrabasic intrusions which were injected toward the base of the basin. Monazite is only rarely altered as observed in thin section and as indicated by the normal Th/La ratios. Also REE pattern of the sandstone shows that the IHREE have not been leached contrary to that observed in mineralized basin.

### **8.7. Global favourability of the basin for the presence of U mineralization**

The silicification of the sandstone and the relatively abundant clay matrix has prevented any significant diagenetic fluid circulation and thus has not been favorable for the formation of U

mineralization. The relatively low Th/U ratios of most of the sediments also do not indicate any significant uranium leaching. The stability of monazite and the Th/La ratios, mainly comprised between 0.2 and 0.4, also indicate the absence of significant LREE leaching contrary to the observations made in mineralized basins and further confirm the non significant mobility of the diagenetic fluids in the basin or at least the absence of highly saline Ca-Na brines (as seen in the fluid inclusions study).

Hence, the extreme immaturity and low permeability of Waterberg basin sediment, the stability of monazite, the moderate alteration of zircon, the absence of IREE leaching are unfavorable parameters for the formation of significant U-deposit in relation with the Waterberg Proterozoic basin despite its important thickness which may have led to the production of high temperature diagenetic fluids, its strongly and homogeneous oxidized characteristics, and the bleached zones (at -585.5 m) reflecting the circulation of reduced fluid during or after diagenesis.

**REFERENCES**

- Anhaeuser, C.R., Maske, S. (eds.) Mineral Deposits of Southern Africa., *Geol. Soc. S. Afr.*, Johannesburg, V. 1, P. 43 – 112.
- Allsop, H.L., Karmers, J.D., Jones, D.L., Erlank, A.J. (1989). The age of the Umkondo Group, eastern Zimbabwe, and implications for palaeomagnetic correlations. *South African Journal of Geology*, V. 92, P.11 - 19.
- Barbey, P., Cuney, M. (1982). K, Rb, Sr, Ba, U and Th geochemistry of the Lapland granulites (Fenno Scandia). Lile fractionation controlling factors. *Contrib. Mineral. Petrol.*, V. 81, P. 304 - 316.
- Bulck, I.S., Maas, R., and Gibson, R. (2001). Precise U-Pb titanites age constrains on the emplacement of the Bushveld Complex. South Africa. *Journal of the Geological Society of London*, V. 158, P. 3 - 6.
- Callaghan, C.C. (1993). The geology of the Waterberg Group in the southern portion of the Waterberg basin. *Bulletin of the Geol. Surv. S. Afr.*, V. 104, 83 P.
- Callaghan, C.C., Eriksson, P.G., and Snyman, C.P. (1991). The sedimentology of the Waterberg Group in the Transvaal, South Africa: an overview. *Journal of African Earth Sciences*, V.13, P. 121 - 139.
- Cathelineau, M. (1988). Cations site occupancy in chlorite and illites as a function of temperature. *Clay Minerals*. V. 23, P. 471 - 485.
- Cathelineau, M., & Nieva D. (1985). A chlorite solid solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) Geothermal system. *Contrib. Mineral., Petrol.*, V. 91, P. 235 - 244.
- Cuney, M. and Mathieu, R. (2000). Extreme Light Rare Earth Element mobilization by diagenetic fluids in the geological environment of the Oklo natural reactor zones, Franceville basin, Gabon. *Geology*, V. 28 (8), P. 743 - 746.
- Debon, F. & Le Fort, P. (1988). A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: principles, method, applications. *Bulletin de minéralogie*, V. 111, P. 493 - 510.
- Derome, D., Cuney M., Cathelineau, M., Fabre, C., Lhomme, T. (2004). Evidences of brine mixings in the McArthur River unconformity-type uranium deposit (Saskatchewan, Canada). Implications on genetic models. *Economic Geology*, soumis.
- Derome, D., Cuney, M., Cathelineau, M., Fabre, C., Dubessy, J., Bruneton, P., and Hubert, A. (2003). A detailed fluid inclusion study in silicified breccias from the Kombolgic sandstones (Northerne Territory, Australia): inferences for the genesis of middle –

- Proterozoic unconformity – type uranium deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, V. 80, P. 250 – 275.
- De Waal, S.A. and Armstrong, R.A. (2000). The age of Marble Hall diorite, its relationship to the Ultkomst Complex, and evidence for a new magma type associated with the Bushveld igneous event. *South African Journal of Geology*, V. 103, P. 128 - 140.
- Eglington, B.M., Armstrong, R.A. (2004). The Kaapvaal Craton and adjacent orogens, southern Africa: a geochronological database and overview of the geological development of the craton, *South African Journal of Geology*, V. 107, P. 13 - 32.
- Fayek, M., Kyser, T.K. and Riciputi, L.R. (2002), U and Pb isotope analysis of uranium minerals by ion microprobe and the geochronology of the McArthur River and Sue Zone uranium deposits, Saskatchewan, Canada. *The Canadian Mineralogist*, V. 40, P. 1553 - 1569.
- Foster, M. D. (1962). Interpretation of the composition and classification of the chlorites. *U. S. Geological Survey Professional Paper* 414 - A, 33 P.
- Hanson, R.E., Gose, W.A., Crowley, J.L., Ramezani, J., Bowring, S.A., Bullen, D.S., Hall, R.P., Pancake, J.A., Mukwakwami, J. (2004). Paleoproterozoic intraplate magmatism and basin development on the Kaapvaal Craton: Age, paleomagnetism and geochemistry of ~1.93 to ~1.87 Ga post-Waterberg dolerites. *South African Journal of Geology*, V. 107, P. 233 - 254.
- Hanson, R.E. (2003). Proterozoic geochronology and tectonic evolution of southern Africa. *Geological Society of London Special Publication*, V. 206, P. 427 - 463
- Hecht, L. & Cuney M. (2000). Hydrothermal alteration of monazite in the Precambrian basement of the Athabasca basin: implication for the genesis of unconformity related deposits. *Mineralium Deposita*, V. 35, P. 791 - 795.
- Jansen, H. (1982). The geology of the Waterberg Basin in the Transvaal, Republic of South Africa. Mem. *Geological Survey of South Africa*, V. 71, 98 P.
- Jefferson, C.W., Delaney, G. and Olson, R.A. (2003), EXTECH IV Athabasca Uranium Multi-disciplinary Study of northern Saskatchewan and Alberta, Part 1: Overview and Impact: *Geological Survey of Canada, Current Research*, C18, 10 P.
- Kister, P., Laverret, E., Cuney, M., Vieillard, P. and Quirt, D. (2003). 3D distribution of alteration minerals associated with unconformity-type uranium mineralization: Anne Zone, Shea Creek deposit (Saskatchewan, Canada). In: M. Cuney (Editor), *Uranium Geochemistry 2003, Nancy International Conference Proceedings*, P. 197 - 200.

- Kotzer, T. G., Kyser, T. K. (1995). Petrogenesis of the Proterozoic Athabasca Basin, northern Saskatchewan, Canada, and its relation to diagenesis, hydrothermal uranium mineralization and paleohydrogeology. *Chem. Geol.*, V. 120, P. 45 - 89.
- Laverret, E. (2002). Les paragenèses argileuse associées aux gisements d'uranium sous discordance, secteur de Shea Creek (bassin de l'Athabasca, Canada). PhD thesis, Pointers University, 192 P.
- Light, M. P. R. (1982). The Limpopo Mobile Belt: A result of continental collision. *Tectonics*, 1, P. 325 – 342.
- Lorilleux, G., Cuney, M., Jébrak, M., Rippert, J.C., Portella, P. (2003). Chemical brecciation processes in the Sue unconformity – type uranium deposits Eastern Athabasca Basin (Canada). *J. of Geochemical Exploration*, V. 80, P. 241 - 258.
- Lorilleux, G. (2001). Les brèches associées aux gisements d'uranium de type discordance du bassin Athabasca (Saskatchewan, Canada). PhD thesis. INPL, Nancy, 319 P.
- Monier, G. (1985). Cristallographie des Micas des Leucogranites, Nouvelles Données et Applications Pétrologiques. PhD. thesis. Université d'Orléans. 299 P.
- Pancake, J.A., Gose, W.A., Hanson, R.E., Ramezani, J., Bowring, S.A., and Downey, W.S. (2001). Paleomagnetism and geochronology of the 1.1 Ga Umkondo igneous province: new data from Botswana: Abstracts, *4th International Conference, Project 418 (Kibaran of Southwestern Africa), International Geological Correlation Program* (University of Durban-Westville, July 13), P. 8 - 9.
- Renac, C., Kyser, K., Durocher, K., Dreaver, G. (2002). Comparison of diagenetic fluids in the Proterozoic Thelon and Athabasca basins, Canada: Implications for protracted histories in stable intracratonic basins. *Canadian Journal of Earth Sciences*, V. 39, P. 113 - 132.
- Ruzicka, V. (1995). Unconformity-type uranium deposits. In: Mineral Deposit Modelling, R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe and J.M. Duke (eds.), *Geological Association of Canada, Special Paper*, V. 40, P. 125 - 149.
- SACS (South African Committee for Stratigraphy) (1980). Stratigraphy of South Africa Part1 (Comp. L. E. Kent). Lithostratigraphy of the Republic of South Africa. South West Africa/Namibia, and the Republics of Bophuthatswana, Transkel and Venda THE Handb. *Geol. Surv. S. Afr.*, 8.
- Tankard, A. J., Jackson, M. P. A., Erisson, K. A., Hobday, K. A., Hunter, D. R. and Minter, W. E. L. (1982). Crustal evolution of Southern Africa: 3.8 billion years of earth history: with a contribution by S. C. Eriksson. 523 P. 182 Figs. Springer-Verlag New York.

- Tickell, S.J. (1975). Braided river deposits in the Waterberg Supergroup. Transactions of the Geological Society of South Africa, V. 78, P. 83 - 88.
- Thomas D.J., Matthews R.B., Sopuck V. (2000). Athabasca Basin (Canada) Unconformity-Type Uranium Deposits: Exploration Model, Current Mine Developments and Exploration Directions. Geology and Ore Deposits: The Great Basin and Beyond, GAC-MAC, P. 1 - 23.
- Truswell, J. F. (1990). Early Proterozoic red beds on the Kaapvaal Craton. Information Circular, no. 223, 96 P.
- Van der Neut, M., Eriksson, P.G. and Callaghan, C.C. (1991). Distal alluvial fan sediments in early Proterozoic red beds of the Wilgerivier Formation, Waterberg Group, South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, V. 12, P. 537 - 547.
- Van Reenen, D. D., Roering, C. Ashwal, L. D. & de Wit, M. J. (1992). Regional geological setting of the Limpopo belt. *Precambrian Research*, V. 55, P. 1 – 5.
- Velde, B. (1977). Clay and clay minerals in natural and synthetic systems. Developments in sedimentology, 21, Elsevier, Amsterdam, 218 P.
- Walraven, F. and Hattingh, E. (1993). Geochronology of the Nebo Granite. Bushveld Complex. *South African Journal of Geology*, V. 96, P. 131 - 41.
- Zhao, G., Cawood, P. A., Wilde, S. A. Sun, M. (2002). Review of global 2.1 - 2.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Barth Science Reviews*, V. 59, P.125 - 162.

---

*CHAPITRE III*

*LE BASSIN DE CARIWERLOO*

---





## CHAPITRE III

### LE BASSIN DE CARIEWERLOO

---

#### Introduction

Les minéralisations uranifères de type discordance démontrent beaucoup de paramètres géologiques empiriques semblables, parmi lesquels :

- ils sont situés en dessous, à travers et immédiatement au-dessus de la discordance, entre des grès tardi- Paléo- Méso- Protérozoïques du bassin et un socle cristallin;
- base du bassin est remplie par des grès épais matures, généralement non métamorphosés, avec une déformation minimale et une activité magmatique;
- le socle contient habituellement des roches métasédimentaires pélitiques, granitoids et des zones structurales graphitiques, les structures régionales post-grès, et les interactions/altérations grès/socle manifestent clairement.

Le bassin de Cariewerloo est un des bassins sédimentaires mésoprotérozoïques localisé en Australie du Sud qui possède certaines des caractéristiques ci-dessus. Dans ce chapitre les caractéristiques minéralogiques et géochimiques du socle cristallin, des roches sédimentaires, et de l'évolution de celles-ci lors de la diagenesis seront définies, ainsi que les événements hydrothermaux postérieurs. Les données disponibles sur les deux bassins minéralisés très connus (Athabasca et Kombolgie) seront prises comme références pour les comparer à celui de Cariewerloo, pour déterminer sa potentialité à générer des minéralisations uranifères.

---



## TABLE OF CONTENT

TABLE OF FIGURES .....	97
LIST OF TABLES .....	99
ARTICLE II .....	100
Mineralogy, geochemistry and diagenetic evolution of the continental clastic Mesoproterozoic basin of Cariewerloo (Gawler Craton, South Australia). Inferences on the genesis of unconformity related uranium deposits.....	100
Abstract .....	100
1. Introduction .....	102
2. Methodology .....	102
3. Regional overview.....	105
4. Petrographic and mineralogical characteristics of the basement .....	107
4.1. Metamorphic basement .....	107
4.2. Hiltaba granitoids .....	109
4.3. Gawler Range Volcanics .....	109
5. Petrographic and mineralogical characteristics of the sediments.....	112
5.1. The Pandurra Formation.....	112
5.2. Blue Range Formation .....	118
6. Sandstone geochemical characteristics .....	121
6.1. Geochemistry of the major elements.....	121
6.2. Geochemistry of the trace elements .....	123
Zircon alteration in the Cariewerloo basin.....	128
6.3. Evolution of the geochemical parameters along the lithostratigraphic column .....	130
6.4. Chemistry of the clay minerals.....	133
7. Fluid inclusions study.....	137
8. Discussion and conclusions.....	139
8.1. Nature of the clastic material and conditions of sedimentation .....	139
8.2. Importance of diagenesis and permeability of the sediments .....	139
8.3. pH conditions .....	140
8.4. Redox conditions.....	140
8.5. Evidence of evaporites .....	141
8.6. P-T conditions of the thermal events.....	142
8.7. Evidence of hydrothermal alteration .....	142

8.8. Diagenetic/hydrothermal alteration of accessories .....	142
8.9. The basin and/or basement as a uranium source .....	143
8.10. Nature and favourability of the basement lithologies as uranium sources.....	144
REFERENCES .....	145

## TABLE OF FIGURES

Figure III. 1: Distribution of Mesoproterozoic rocks in the Gawler craton (South Australia), with localization of studied drill holes. (Department of Minerals and Energy South Australia).....	103
Figure III. 2: Stratigraphic column in studied drill cores in Cariewerloo basin. Pandurra formation is composed of four units:.....	104
Figure III. 3: Lithostratigraphic section of the Eastern Gawler Craton (Mesoproterozoic). .	106
Figure III. 4: Drill cores logs of the basement under the Cariewerloo basin. ....	107
Figure III. 5: In CSD1 (9321), at 1155.7 m: thin fractures are filled by small crystals of tourmaline, chloritic neoformations are abundant. At 1183.2 m: a fracture with sulphides: chalcopyrite followed by pyrite. At 842.75 m: euhedral brown and green to yellowish garnet.....	108
Figure III. 6: In PYI (9322) drill hole, microdolerite, with vesicules filled by carbonates, fluorite, hematite, quartz, chlorite and tourmaline. ....	110
Figure III. 7: In PYI (9322) drill hole, at 613.55 m, corroded, angular grains of quartz and potassic feldspar, with silicifications are surrounded by iron oxides. In DRD1 drill hole, at 1066.9 m fractures are filled by hematite and neoformed chlorite.....	113
Figure III. 8: In PY 1 drill hole: detrital quartz grains are rounded or corroded, weakly deformed, of different size. In ASD 2 drill hole strong silicifications are present.....	114
Figure III. 9: ASD2 (9312) drill hole: corroded grains of quartz with weak silicifications, carbonated and sericitic matrix. Accessory minerals are abundant (ex. zircon). ....	115
Figure III. 10: ASD2 (9312) drill hole: Ti-dioxides are abundant, chloritic neoformation, clasts of schist are abundant; plates of muscovite are abundant. ....	116
Figure III. 11: ASD2 (9312) drill hole: globules of carbonaceous matter (sometimes surrounded by titanium dioxides); carbonates associated with pyrite and anhydrite.	116
Figure III. 12: In PYI (9322) drill hole, at -167.8 m: quartz grains are corroded, deformed and of different size. .In CSD1 (9321) drill hole, at -401.4 m: neoformations of chlorite replace rounded minerals and are surrounded by carbonates. At -646 m there are two generations of silicification. In ASD2 (9312) drill hole, at -812.9 m: a fracture is filled by carbonates and anhydrites. At -817 m neoformations of chlorite are abundant in grains of altered potassic feldspar. In DRD 1 (9326) drill hole, at -391.1 m, silicifications are significant.....	118

Figure III. 13: Mineral paragenesis established for the Cariewerloo and Itiledoo sandstones. The diagram represents successively detritic minerals deposition, diagenesis and/or metamorphism stages. ....	120
Figure III. 14: Diagram of quartz versus peraluminosity index for the sediments of the Cariewerloo basin allowing the determination of the relative proportions quartz – clay minerals – feldspars – carbonates from whole rock geochemical analyses. ....	121
Figure III. 15: Diagram discriminating the relative proportions of feldspars-clay minerals-micas (independently of the quantity of quartz) for the sediments of Cariewerloo. ..	122
Figure III. 16: Na/Al versus K/Al diagram allowing discriminating the proportions of plagioclases - potassic feldspars - clay in the sediments of the Cariewerloo basin. ..	123
Figure III. 17: Th - U diagram for the sediments of Cariewerloo.....	124
Figure III. 18: Diagram Th - La for the sediments of Cariewerloo.....	125
Figure III. 19: Th/U - Th/La diagram for the Cariewerloo sediments. ....	126
Figure III. 20: Partial U – Total U diagram for the sediments of Cariewerloo. It allows determining the proportion of mobile U in the samples.....	126
Figure III. 21: Rare Earth Elements patterns normalized to CI chondrites (Orgueil).....	127
Figure III. 22: Zr - Y diagram for the Cariewerloo sediments. ....	128
Figure III. 23: (i): primary zoning is generally well developed in zircon crystals. Alteration of the crystals is also observed (ii-iii-iv-v- vi-vii). Inclusions of hematite, sulphate, and Ti-dioxides are common (v-vi) in the Cariewerloo sediments. ....	128
Figure III. 24: U versus P plot of unaltered (red square) and altered domains of zircons from the Cariewerloo sediments. ....	129
Figure III. 25: Substitution of Zr + Si + Hf by Al + P + Ca + Fe + Y +Th+ U in zircons from the sediments of Cariewerloo. ....	129
Figure III. 26: Variation of some geochemical parameters in the Pandurra formation of (drill core PY 1-9322), basin of Cariewerloo. Blue fields = non-altered sediments. ....	130
Figure III. 27: Variation of the geochemical parameters in the Pandurra formation along the CSD 1 - 9321 drill core in the basin of Cariewerloo.....	131
Figure III. 28: Variation of geochemical parameters in the formation of Pandurra along DRD 1 - 9326 drill core in of the basin of Cariewerloo. ....	132
Figure III. 29: Variation of geochemical parameters in the Pandurra formation along drill hole ASD 2-9312 in the Cariewerloo basin.....	132
Figure III. 30: Variation of geochemical parameters in the DDH 893-1-9316 drill core in the basin of Itiledoo.....	133

Figure III. 31: Classification of white micas of Cariewerloo in a diagram Si - Al - (Fe + Mg). ( <i>Monier, 1985</i> ).....	134
Figure III. 32: Characterisation of types of micas of Cariewerloo in the diagram of <i>Velde</i> ( <i>1977</i> ). .....	135
Figure III. 33: Nature of chlorites of Cariewerloo in the diagram of <i>Hey</i> ( <i>1954</i> ). .....	135
Figure III. 34: Classification of chlorites of Cariewerloo in triangular diagram Al (VI)-Mg-Fe (Chlorites of Athabasca in <i>Lorilleux, 2001</i> ). .....	136
Figure III. 35: Diagram Al (VI)-Al (IV) applied on studied chlorites in the Cariewerloo samples. ....	136
Figure III. 36: Isochores of the different types of fluid inclusions found in the diagenetic overgrowths of detrital quartz from the Cariewerloo basin.....	137

## LIST OF TABLES

Table III. 1: general characteristics of the sediments of the Cariewerloo and Itiledoo basins. .....	119
---	-----

**ARTICLE II****Mineralogy, geochemistry and diagenetic evolution of the continental clastic Mesoproterozoic basin of Cariewerloo (Gawler Craton, South Australia). Inferences on the genesis of unconformity related uranium deposits****Ahlam IBRAHIM, Michel CUNNEY, Marc BROUAND**

G2R, Nancy-Université, CNRS, BP 239, 54506, Vandœuvre-lès-Nancy, France

**Abstract**

The Cariewerloo basin in South Australia represents a Mesoproterozoic basin, filled with siliciclastic sediments of the Pandurra Formation, unconformably overlying the Gawler Range Volcanics and the Hiltaba Suite granitoids, a situation similar to other sedimentary basins associated with unconformity related U ore deposits (Athabasca basin, Canada; Kombolgie basin, Australia; Pasha-Ladoga basin, Russia).

The study of 169 samples, originating from 5 drill cores: PY 1, ASD 2, CSD 1, DRD 1, intersecting the Pandurra formation in the basin of Cariewerloo, and DDH 893-1 in the basin of Itiledoo (small basin, perpendicular to Cariewerloo basin to the SW), has shown that the sediments of these basins are characterized by a high immaturity and a strong oxidation. Sediments of the Cariewerloo basin are overall much poorer in quartz than the silicoclastic formations of the reference mineralized basins of the Athabasca and Kombolgie. The stability of K-feldspar and plagioclase in the sandstone indicates that the source area was subjected to limited pedogenic alteration, and the angular part of sediments, indicate a relatively shorter transport distance and/or more active tectonic activity during sedimentation than for the sediments of the Athabasca and Kombolgie basins. Faulting is quite developed in the Cariewerloo basin and corresponds to steeply dipping faults, breccia zones with strong hematization and illitization. Temperatures of 230 to 300 °C estimated from neoformed chlorite, as well as the temperatures of 160 and 340 °C calculated from fluid inclusions are higher than those of Athabasca (150 to 200 °C) and Kombolgie (150 ± 15 °C) basins estimated from fluid inclusions for the diagenetic event. Some bleaching of the sandstone, reflecting the circulation of reduced fluid during or after diagenesis, has been observed but decreases towards the unconformity. The new formation of Fe-rich chlorites also indicates more reducing conditions during alteration. Other evidence of reducing conditions are given by the presence of pyrite, chalcopyrite and pyrrhotite, associated with grains of carbonate and sulfates in fractures or disseminated in the rock, and the very local occurrence of a black carbonaceous globule observed in gritstone, similar to the globules described in the vicinity of the unconformity related uranium deposits from Saskatchewan. The presence below the basin of the highly potassic calcalkaline Gawler Range Volcanics enriched in uranium (not analyzed in this work), represent a favourable source for the genesis of uranium



mineralization. Regolith-type alteration in the metamorphic volcanic basement, represent a possible evidence for the interaction of the basinal oxidized brines with basement rocks, also representing a favorable indication for the formation of uranium mineralization. Fractures filled by carbonates and anhydrite may represent infiltration of fluids derived from an evaporitic sequence which may have been present above the siliciclastic formations. Brine type fluid inclusions with high eutectic melting temperatures (-40 to -50 °C) indicate the presence of diagenetic brines rich in calcium as observed in the Athabasca and Kombolgie basins and represent an additional evidence of evaporite derived fluid. The hydrothermal alteration event is accompanied by significant dissolution of the clastic minerals, neoformation of chlorite and carbonates, and subsequent intensive sulfidization. Such features may reflect the percolation of a fluid more reduced than the diagenetic fluid and favourable for the precipitation of a uranium mineralization. Uranium-bearing accessory mineral abundance is very variable but in average their abundance is higher than in the Athabasca basin. Total uranium contents in the siliciclastic sediments of the Cariewerloo basin also vary largely and are definitely higher than those measured in the zones far away from uranium mineralization of the Athabasca basin. Most samples show Th/U ratios close to the crustal mean ( $Th/U = 4$ ), which indicates a low total mobility of uranium. All Th/La ratios are lower than 1 indicating a moderate leaching of light rare earth elements, therefore a weak alteration of monazite, and consequently a weak mobilization of the potential sources of uranium in sandstones. All whole rock Zr/Y ratios are low (lower than 20) and are in agreement with the evidences of alteration observed in the zircons crystals with enrichments in Al, P, Ca, U and Y. The K - feldspar - illite - quartz paragenesis indicates a higher pH of the diagenetic fluid compared to uranium mineralized basins, which is less favourable for uranium solubility. Globally, the favourability for the development of uranium mineralization in this basin appears to be lower than those of the Athabasca and Kombolgie sediments, but closer to that of the Pasha-Ladoga basin in Russia.

**Key words:** Cariewerloo, Uranium, Unconformity, Sandstone, Mesoproterozoic basin, Alterations.

## 1. Introduction

The Cariewerloo Basin is one of the Mesoproterozoic sedimentary basins of South Australia which possesses some of the characteristics favourable for the presence of uranium deposits. Within the framework of this study, the mineralogical and geochemical characteristics of the crystalline basement, the sedimentary rocks, and the evolution of those at the time of the diagenesis will be defined, as well as later hydrothermal events. Data available on the two well-known and highly mineralized, siliciclastic, intracontinental Proterozoic basins (Athabasca and Kombolgie basins) will be taken as references for comparison them to determine their potentiality to generate uranium deposits.

## 2. Methodology

To achieve the objectives of this study, 169 samples originating from 5 drill cores: 9322 "PY 1", 9312 "ASD 2", 9321 "CSD 1", 9326 "DRD 1", intersecting the Pandurra formation in the basin of Cariewerloo, and 9316 "DDH 893-1" in the east of the basin of Itiledoo (Fig. III. 1) were selected from a sampling realized by Patrice Bruneton in January 2005.

**PY 1** (eastern border of the basin): the hole intersected massive stromatolites (0 - 39.8 m), from the Woocalla Dolomite (Tapley Hill Formation), the Pandurra Formation (39.8 - 679.6 m), and the Gawler Range Volcanics, up to the end of the hole (679.6 - 1293.3 m) (Fig. III. 2).

**ASD 2** (centre-east of the basin) : the Pandurra Formation (791.3 - 1023.9 m) is covered by the Tapley Hill Formation (567.3 - 791.3 m) and lies on a metamorphic basement (791.3 - 1148.4 m).

**CSD 1** (centre-east of the basin): the hole intersected Adelaidean formations (0 - 401 m), Pandurra Formation (401 - 864.9 m) and ended in mineralized basement (864.9 - 994.2 m).

**DRD 1** (east side of the basin, 40 km SE from Olympic Dam): the hole intersected the Pandurra Formation from 322 to 1067.7 m (total of 745 m) and granitic basement (1067.7 - 1192 m). This is the thickest section of Pandurra logged.

**DDH 893-1:** the hole was drilled in the Itiledoo basin and intersected the Blue Range Formation (0 - 87.5 m) and the Mangalo Schist Formation (87.5 - 126.2 m).

The chemical composition was determined on 46 samples of sediments, and 2 schists from the Mangalo Formation. The chemical data have been interpreted using a series of chemical-mineralogical diagrams for which rock compositions are calculated as multicationic parameters (*Debon and Le Fort, 1983*) and Log/Log diagrams for trace elements.

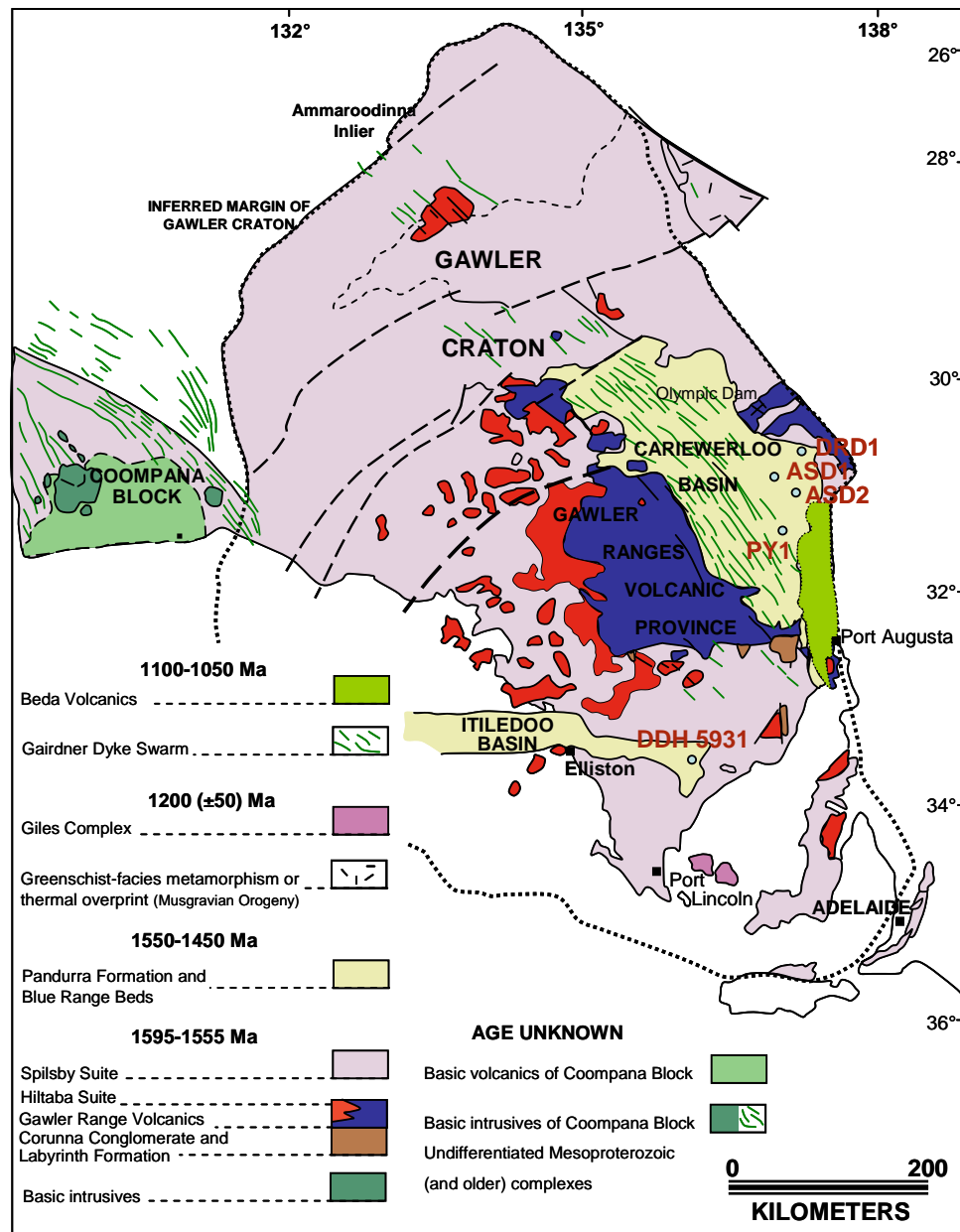


Figure III. 1: Distribution of Mesoproterozoic rocks in the Gawler craton (South Australia), with localization of studied drill holes. (Department of Minerals and Energy South Australia).

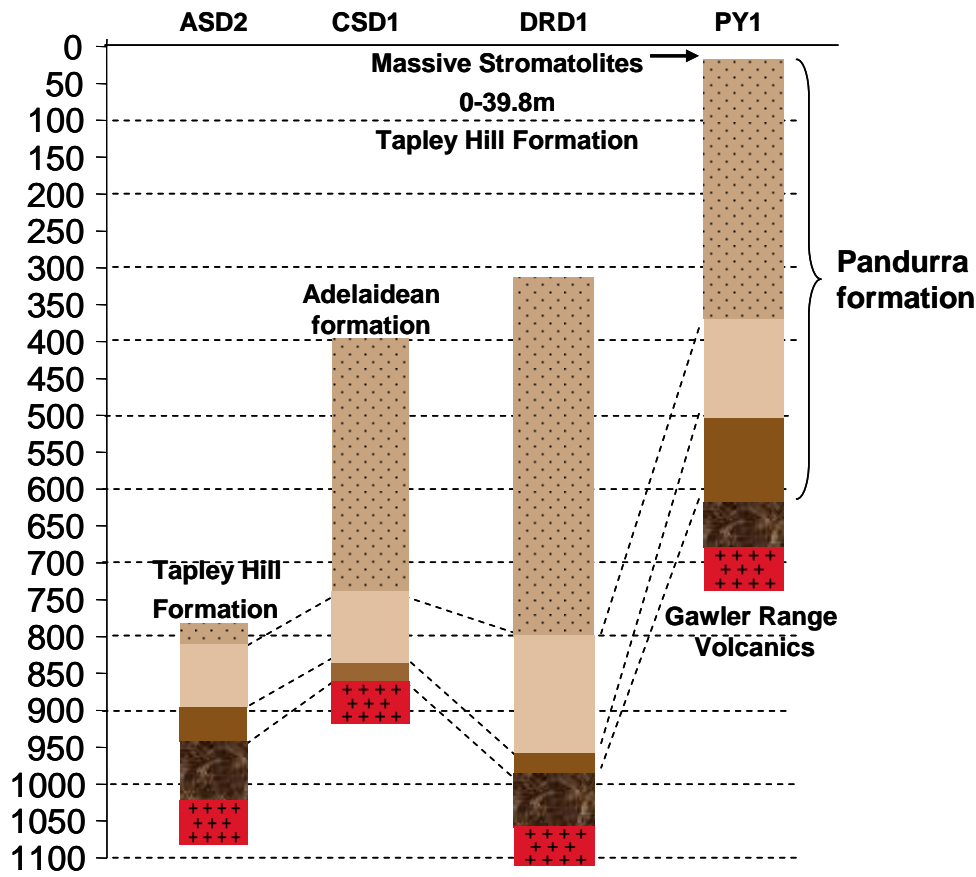
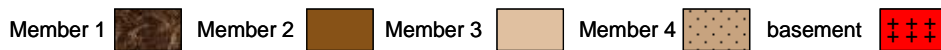


Figure III. 2: Stratigraphic column in studied drill cores in Cariewerloo basin. Pandurra formation is composed of four units:



The petrographic and mineralogical characteristics of the rocks were determined through optical observation in transmitted and reflected light of 148 polished thin sections. The nature of the microphases impossible to determine by optical microscopy and the possible zoning of minerals were studied using a Scanning Electron Microscope (SEM) Hitachi S2500 Kevex (“Service Commun de microanalyse” of the Université Henri Poincaré, Vandœuvre-lès-Nancy, France).

Some of the silicates were analyzed with a CAMECA SX- 100 Electron Microprobe (EMP) (“Service Commun d’analyse” of the Université Henri Poincaré, Vandœuvre-lès-Nancy).

Fluid inclusions in quartz overgrowths were studied using a CHAIX-MECA microthermometry apparatus (Poty *et al.*, 1976). The composition of the gas phase and solid

inclusions were determined using a Labram (Dilor–Jobin Yvon) Raman microspectrometry (G2R laboratory - Nancy).

### 3. Regional overview

South Australia consists of a mosaic of cratons and sedimentary basins intersected by linear fault zones.

**The Gawler Craton** underlies the major part of central South Australia. It represents an Archaean to Mesoproterozoic crystalline basement which has undergone no substantial deformation, except for minor brittle faulting, since 1450 Ma (*Daly et al, 1998*). The craton records crust formation and tectonothermal events from the late Archaean to Mesoproterozoic with the Sleafordian Orogeny (2.5 – 2.3 Ga), the Kimban Orogeny (1.82 – 1.58 Ga) and the Wartakan Orogeny (1.5 – 1.4 Ga). The Mesoproterozoic Era in South Australia is represented by a great diversity of events ranging from anorogenic, subaerial felsic and mafic volcanism, emplacement of mafic dyke swarms, felsic plutonism and continental sedimentation through to granulite facies metamorphism and deformation.

At 1585 – 1595 Ma immediately following the Kimban orogeny, there was a period of extensive volcanism (Gawler Range Volcanics (GRV)) (*Creaser and White, 1991; Creaser and Cooper, 1993*), associated sediments and volcanoclastics (Corunna Conglomerate and Labyrinth Formation) and further emplacement of granite batholiths and plutons (Hiltaba Suite). The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit is related to this phase (Fig. III. 1).

Other significant events during this period, commencing shortly after this major volcano-plutonic phase but continuing until 1450 Ma, are the deposition of very thick sediments to the north-east and south of the Gawler Ranges which formed the Cariewerloo and Itiledoo Basins. These basins are mainly filled with the Pandurra Formation and the Blue Range Beds respectively. These clastic sediments are predominantly arenaceous, poorly sorted and undeformed except for epeirogenic faulting.

The last Mesoproterozoic event corresponds to the north-west-trending mafic dykes (Gairdner Dyke Swarm) (1100 - 1050 Ma) extending for more than 800 km across the Gawler Craton (Fig. III. 3).

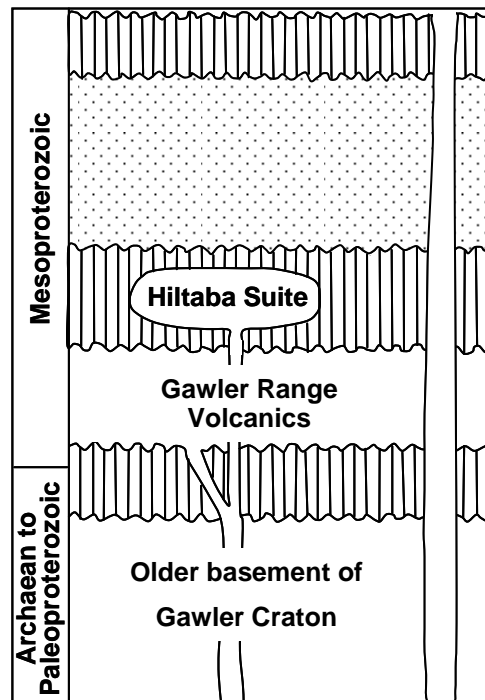


Figure III. 3: Lithostratigraphic section of the Eastern Gawler Craton (Mesoproterozoic).

**The Cariewerloo Basin** is 120 km wide and trends north-west for 450 km. It is a half graben tilted to the north-east. It is bounded by major north-west-trending faults bordering basement highs near Olympic Dam and Mount Gunson. Younger north-east trending faults disrupt the faulted eastern margin. Consistent internal stratigraphy and sedimentary facies, whatever the depth to the underlying basement, imply that the faults giving the present half graben morphology are post-depositional (Cowley, 1993). Syn-depositional faulting may locally occur near the NE margin.

The Pandurra Formation overlies the Gawler Range Volcanics and the comagmatic Hiltaba Suite granitoids and mainly derives from their erosion. The Formation is unmetamorphosed, flat-lying, thick, monotonous and composed of siliciclastic red sediments. Its age has to be younger than the volcanics (<1592 Ma, Creaser and Cooper, 1993).

Rb - Sr geochronology on interbedded shale and siltstone gives a minimum depositional age of  $1424 \pm 51$  Ma. The Gairdner Dyke Swarm (GDS) injected through the basin is much younger ( $827 \pm 6$  Ma).

#### 4. Petrographic and mineralogical characteristics of the basement

Studied drill holes have also intersected basement lithologies corresponding to metamorphic rocks (in DRD 1 and CSD 1 below the Cariewerloo basin and DDH893-1 below the Itiledoo basin), Hiltaba granitoids (in DRD 1), and Gawler Range Volcanics (in PY 1) (Fig. III. 4).

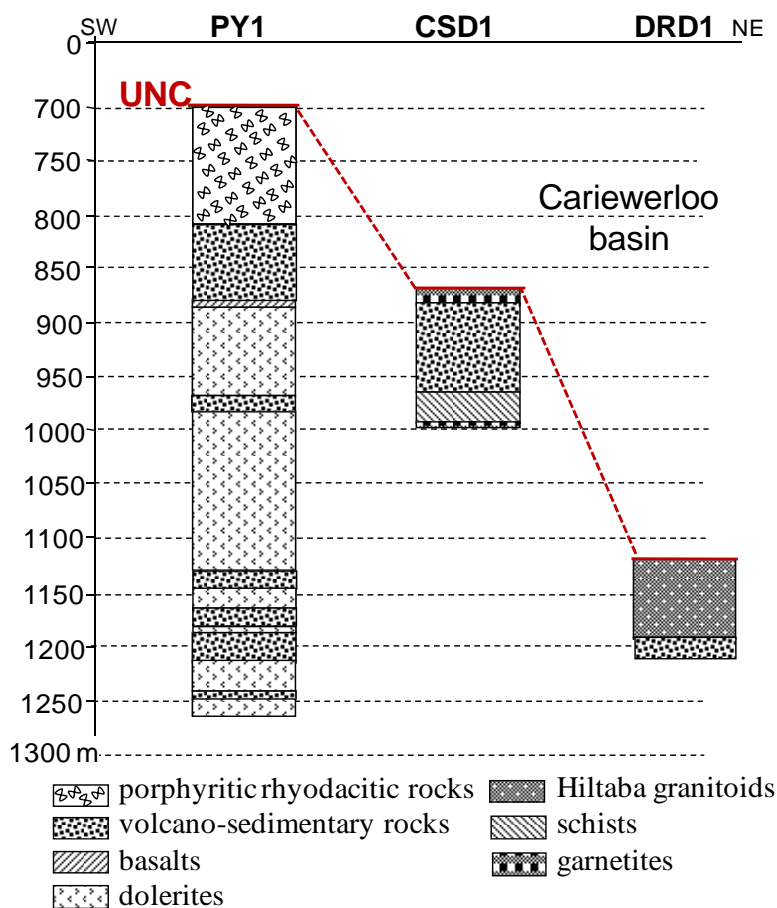


Figure III. 4: Drill cores logs of the basement under the Cariewerloo basin.

##### 4.1. Metamorphic basement

In the DRD 1 drill hole, fine-grained brown to green microfractured, altered metasedimentary rock have been observed. Slightly deformed fine grains of quartz are corroded and rimmed by iron oxides. Potassic feldspars are very well altered. Weak silicifications are also underlined by iron oxides. Chloritization and argilization are remarkable. Zircon occurs as small disseminated crystals. Two perpendicular fractures cutting the most altered part of the rock present a small offset, and are filled by limpid quartz with a remarkable bleaching at their walls.

In the **CSD 1** drill hole the metamorphic basement is composed of Grenatite, volcano-sedimentary rock and schist.

The grenatite is principally composed of euhedral brown and green or yellowish garnet (Fig. III. 5), generally strongly altered. Idiomorphic apatites are abundant. Between and inside garnets, sericitization, chloritization, extremely limpid quartz, secondary calcite, magnetite, ilmenite, and tourmaline (Fig. III. 5), a fibrous mineral (sillimanite?) and epidote have been observed. Most primary minerals (former biotite and amphibole) are almost completely altered to dark green chlorite. Hematite and newly formed green bluish chlorite occur together. There are some carbonates veins.

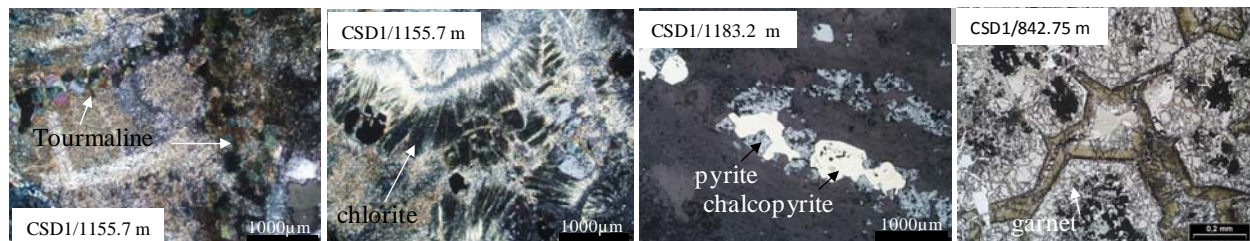


Figure III. 5: In CSD1 (9321), at 1155.7 m: thin fractures are filled by small crystals of tourmaline, chloritic neoformations are abundant. At 1183.2 m: a fracture with sulphides: chalcopyrite followed by pyrite. At 842.75 m: euhedral brown and green to yellowish garnet.

The metamorphosed volcanic is intensely hematitized. Quartz grains are more or less rounded. There are some chloritized biotites. Very finely disseminated hematite replaces former unidentified minerals. Greenish domains represent a more or less chloritized matrix with calcite and sericite. There is a vein filled by quartz and calcite. Idiomorphic zircon and apatite are not frequent.

The metamorphosed volcanic presents a schistosity (963.3 to 970.4 m), in which the minerals are almost completely chloritized. There are primary nearly idiomorphic magnetite crystals, very fine grained secondary ilmenite and secondary chlorite. Apatite is abundant. Some microfissures are filled with chlorite and quartz.

There is a regolith alteration between 963.3 and 970.4 m with chloritization, hematization and carbonatisation.

In the DDH 893-1 drill hole, **Mangalo Schist Formation** is represented by dark brown-dark grey to greenish-grey microfolded muscovite schist with deformed quartz grains of different size. Polycrystalline quartz aggregates occur in a matrix of iron oxides. There are small corroded grains of feldspars, slightly altered to clay minerals (K-Fds >> Pl). Plates of white



mica and generally chloritized biotite are abundant, oriented in layers alternating with quartz or fine clay-rich layers. There are also layers of corroded quartz in an argillaceous matrix.

#### 4.2. Hiltaba granitoids

In the DRD 1 drill hole the granite, which occurs between 1190.4 and 1117.5 m, is dark red-brown to black, fine, medium to coarse-grained and silicified. Detrital quartz grains are corroded, often polycrystalline, slightly deformed, with wavy extinction, rich in disseminated fluid inclusions sometimes with different plane directions. Abundant hematite and chlorite rim the quartz grains. Small prisms of tourmaline are locally included in quartz grains. Potassic feldspars and plagioclases are abundant (K-Fds >>> Pl), strongly altered, often completely argilized. Biotites are almost completely chloritized, abundant, corroded, and weakly altered with iron oxides underlining their cleavages. White micas are scarce.

Accessory minerals are abundant: titanium dioxide crystal clusters, small idiomorphic crystals of zircon are surrounded by iron and titanium dioxides (sometimes included in detrital quartz grains), very small disseminated chalcopryrite, pyrite, magnetite, tourmaline crystals. There are fractures surrounded by whitish greenish zones (bleaching). The fractures are filled by abundant iron oxides (magnetite, ilmenite), neoformed quartz and sulfides: chalcopryrite followed by pyrite and small tourmaline crystals (Fig. 5 at 1583 m). White mica is also visible in the vicinity of the fracture.

The strong argilization, chloritization and hematization of the rock represent a regolithical alteration.

#### 4.3. Gawler Range Volcanics

In the PY 1 drill hole, the Gawler Range Volcanics, are composed of a suite of dark brownish green fine grained dolerites with a contorted contact, pinkish - reddish - brown volcano-sedimentary rocks, basalts and rhyodacites (according to stratigraphic order from base to top of drill hole).

The dolerites are brownish green fine grained, present phenocrysts of fresh or altered pyroxene (sometime completely chloritized or replaced by carbonates), plagioclase, orange biotites associated with iron oxides, and former feldspars (?) replaced by carbonates. Magnetite is abundant. Fractures are filled by secondary carbonates, muscovite, neoformed chlorite, tourmaline, magnetite and hematite on the edges. Vesicles are filled by carbonates, idiomorphic iron oxides, chlorite and fluorite (Fig. III. 6). Alteration is more important with

depth because the fractures filled by carbonates are more abundant. The main alterations are illitisation, chloritization and carbonatisation.

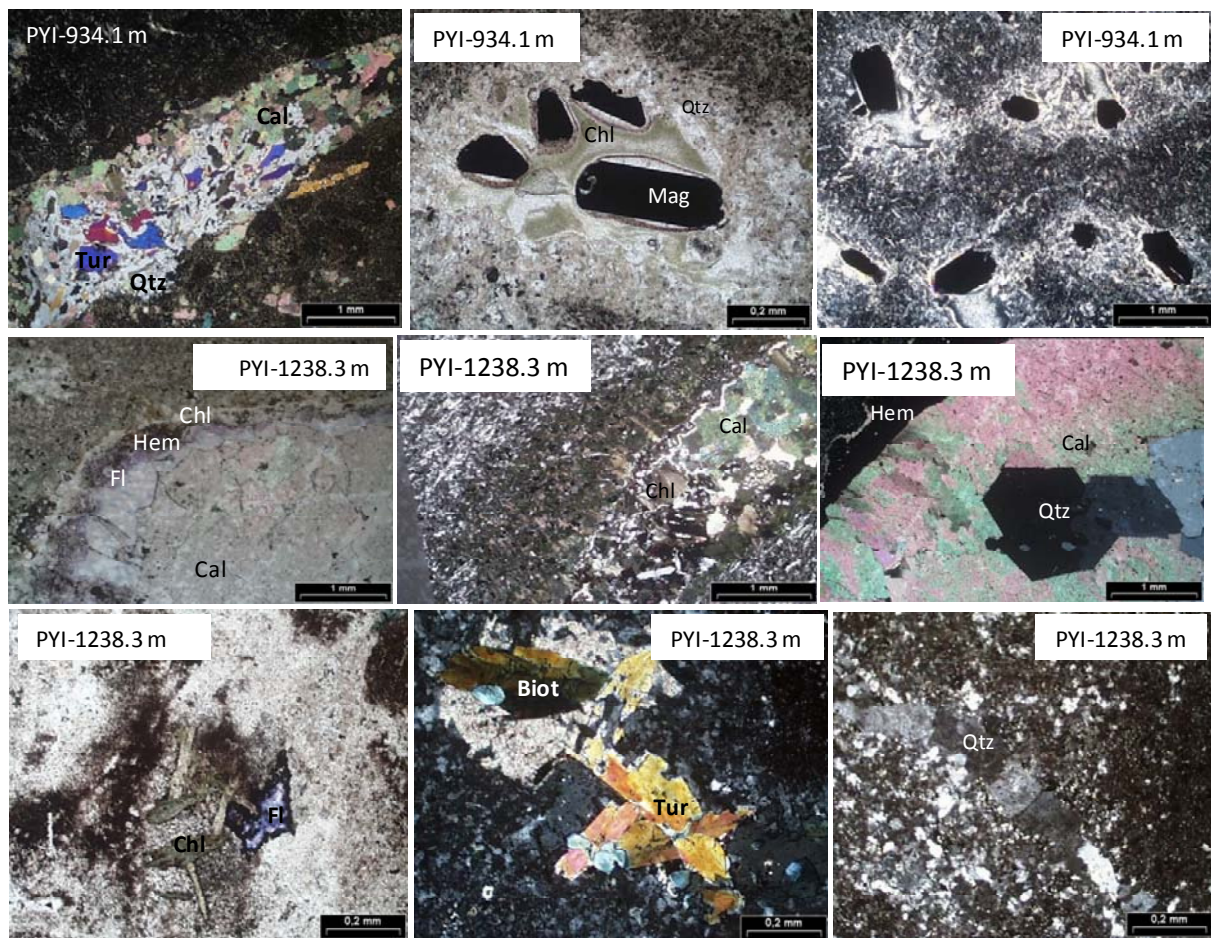


Figure III. 6: In PYI (9322) drill hole, microdolerite, with vesicules filled by carbonates, fluorite, hematite, quartz, chlorite and tourmaline.

The volcano-sedimentary rocks are composed of very angular volcanic quartz, nearly-idiomorphic quartz grained magmatic inclusions surrounded by iron oxides, altered slightly corroded, sometimes angular, potassic feldspars and plagioclases. Myrmekitic textures are present. Some feldspar are replaced by chlorite and carbonates, others are almost completely argilized. The large idiomorphic minerals (sometimes with hexagonal shapes and a more or less well developed zonation, possible pyroxene or plagioclase...) are completely altered. Large plates of white mica and biotite crystals are abundant, altered and deformed. Iron oxides underline their cleavages. Neofomed white micas present a rose-shape. Secondary green-black neofomed Mg - rich chlorites are abundant. All the volcanic minerals in some whiter parts of the rock are replaced by carbonates and chlorite. There are also different types of pebbles: of metamorphic rock, large and polycrystalline pebbles with quartz and feldspars

rimmed by iron oxides, corroded pebbles of carbonates with illite or chlorite neof ormations in core of the pebbles (at 976 m), large pebbles of recrystallized quartz with patches of iron oxides replacing a non identified mineral (at 1244.4 m), other pebbles composed of neof ormed chlorite which seems to replace amphibole and rounded pebbles composed of sericite, chlorite and quartz and fluorite in a very fine grained matrix (composed of chlorite, iron oxides carbonates, fine grained quartz and tourmaline). Some fluorite may occur at the contact between the pebbles and the matrix (at 1244.4 m). Accessory minerals are abundant: idiomorphic magnetite, ilmenite, idiomorphic zircon sometimes with rhyolitic embayments and with some magmatic inclusions, tourmaline, titanium dioxides, altered titanomagnetite and apatite.

There are also important alterations: pink hematite in intensively altered parts with chlorite. At 1244.4 m there are some vesicles filled by chlorite, hematite, fluorine, carbonates, and quartz. Fractures are filled by neof ormed quartz.

Between the volcano-sedimentary rocks and the dolerite, dark brownish green vesicular basalt (882.55 m) occurs. It has a cryptocrystalline matrix with dispersed quartz, small plagioclase crystals, carbonates, iron oxides, abundant chlorite, idiomorphic altered magnetite crystals. Vesicles and some fractures are filled by newly crystallized quartz (sometimes associated with micro-fibres of rutile), then by chlorite, carbonates, micas, tourmaline, and iron oxides.

A medium grained reddish-brown prophyritic rhyodacitic rock (between 699.3 and 807.6 m) occurs above the volcano-sediments. The rhyodacite is composed of abundant phenocrysts of quartz containing magmatic inclusions, more or less altered K-feldspars, almost completely sericitized or carbonatized plagioclases in a cryptocrystalline or matrix. Minerals with hexagonal shape (garnet?) completely altered to chlorite or sericite, K-feldspar, green chlorite and other totally altered minerals occur in a carbonated red matrix. Some phenocrysts of biotite and their margins are replaced by muscovite. Newly formed chlorite is common. There are abundant altered minerals (titanite?), magnetite, and idiomorphic zircon. Cavities are filled by secondary epidote, and boxworks of former cubic minerals (pyrite?) are filled by carbonates, idiomorphic apatite, and fluorite in a carbonated red cryptocrystalline matrix.

## 5. Petrographic and mineralogical characteristics of the sediments

### 5.1. The Pandurra Formation

The Pandurra Formation has been subdivided into 4 units (*Cowley, 1991*) (Table III. 1):

#### **Basal Unit I** (absent in CSD 1 drill hole):

It is composed in the DRD 1 drill hole (1066.9 - 1067.1 m) of strongly silicified greenish-grey sandstone, polymict conglomerate with angular clasts, corroded detrital strongly deformed quartz crystals rimmed by hematite. Fluid inclusions planes cut the detrital grains. Clasts of iron oxides are associated with chlorite neoformations. Altered potassic feldspars are abundant (scarce at 1066.9 m). Magnetite is abundant. Chlorite neoformation in the matrix between the detrital quartz grains is well developed (Fig. III. 8). Deformed plates of white micas, with iron oxides underlining cleavages are scarce. The argillaceous matrix is abundant. Carbonates occur in the matrix and sometimes in fissures. Accessory minerals are abundant: zircon and tourmaline.

In the PY 1 drill hole (699.3 - 1267.3 m) this formation consists of medium brown to beige grit at the unconformity, with abundant iron oxides (hematite and magnetite) and zircons, concentrated in layers, followed by a dark red brown fine to medium grained sandstone with remarkable bleached vertical zones and some other zones with important alteration.

Quartz are corroded, slightly deformed with wavy extinction, of different size, sometimes well rounded with more or less important silicifications and with disseminated fluid inclusions within the grains. Abundant iron oxides are rimming quartz grains or small corroded polymict pebbles (sometime abundant) of quartzite, schist, polycrystalline quartz composed of argilized feldspar, quartz and iron oxide. Some grains are densely fractured. The fractures are filled by iron oxides. Slightly corroded grains of potassic feldspar and plagioclases are abundant (K-Fds >> Pl), also coated by iron oxides. Sometimes adular overgrowths on K-feldspar are observed (Fig. III. 7), some grains are almost completely argilized and some myrmekitic textures are visible. Plates of white mica and chloritized biotite are abundant, little deformed, sometimes oriented, sometimes with their cleavages underlined by iron oxides. A clay-rich matrix is abundant. Accessory minerals are abundant: titanium dioxides, small idiomorphic zircon crystals rimmed with iron oxides and magnetite, and monazite, disseminated or concentrated in a layer.

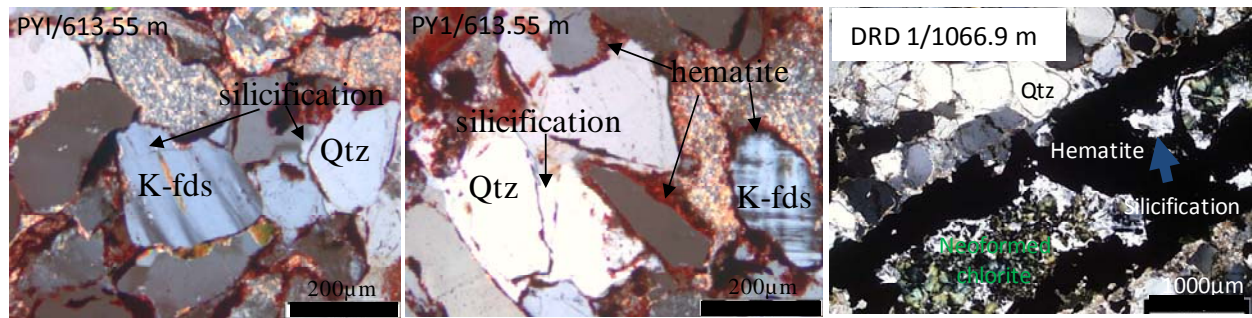


Figure III. 7: In PY1 (9322) drill hole, at 613.55 m, corroded, angular grains of quartz and potassic feldspar, with silicifications are surrounded by iron oxides. In DRD1 drill hole, at 1066.9 m fractures are filled by hematite and neoformed chlorite.

### Unit II (absent in DRD 1)

This Unit is distinctive and well developed, comprising predominantly: dark red-brown and purple mudstone with green spots in PY 1 drill hole (598.3 m), fine laminated sandstone with cross-bedding in red clay (929.3m) in ASD 2 drill hole, and dark reddish-brown siltstone-fine-sandstone (849.1 m) in CSD 1 drill hole: detrital quartz grains are fine rounded or angular, sometimes corroded, little deformed, sometimes weakly silicified. Silicifications are underlined by iron oxides. Fluid inclusions are disseminated in the quartz grains. Pebbles of quartz are polycrystalline and abundant in PY 1 drill hole. Grains are surrounded by abundant hematitic matrix in some zones in PY 1 drill hole. Corroded and altered grains of potassic feldspars are abundant; some grains are completely argilized (more altered in ASD 2 drill hole). Very small plates of white mica, biotite or chlorite are abundant, (oriented in layers), sometimes deformed and cleavages are underlined with iron oxide. Detrital minerals are disseminated in an abundant argillaceous matrix. Accessory minerals are abundant, usually concentrated in layers in PY 1 and ASD 2 drill holes: magnetite, titanomagnetite, titanium dioxides, zircon, rounded tourmaline and monazite.

### Unit III (absent in DRD 1 drill hole):

It is mostly composed of laminated cross-bedded very fine, medium to dark purple-red-coarse brown gritty sandstone in ASD 2, PY 1 and CSD 1 drill holes. The detrital quartz grains are rounded or corroded (Fig. III. 8) (sometimes angular in PY 1 drill hole), weakly deformed and locally with wavy extinctions, of different size, silicified (strong silicifications are present at 449.5 m in PY 1 drill hole, and between 847.45 and 872.7 m in ASD 2 drill hole (Fig. III. 8))

and rimmed by abundant hematite. Some idiomorphic quartz grains are visible and plans of fluid inclusions cut sometimes the grains in different directions. There are some polycrystalline quartz pebbles in an abundant argillaceous matrix (~ 30 %). Abundant grains of potassic feldspars are rounded or corroded. Some corroded grains (former K – feldspar?) are almost completely argilized or replaced by iron oxides. Plates of deformed white mica, biotite and chlorite are abundant (sometimes oriented in layers) with iron oxides underlining the cleavages. Rare biotites are included in quartz grains. The detrital minerals are disseminated in an argillaceous matrix. Accessory minerals are abundant, disseminated or concentrated in layers: titanium dioxides with abundant neoformations at 754.55 m in CSD 1 drill core, magnetite, titanomagnetite, ilmenite, zircon, rounded tourmaline (fill small fractures at 794 m “CSD 1 drill core”) and monazite. There is a bleaching which corresponds to a strong clay alteration in CSD 1 drill core (locally at 849.1 m and around a fracture at 813.75 m).

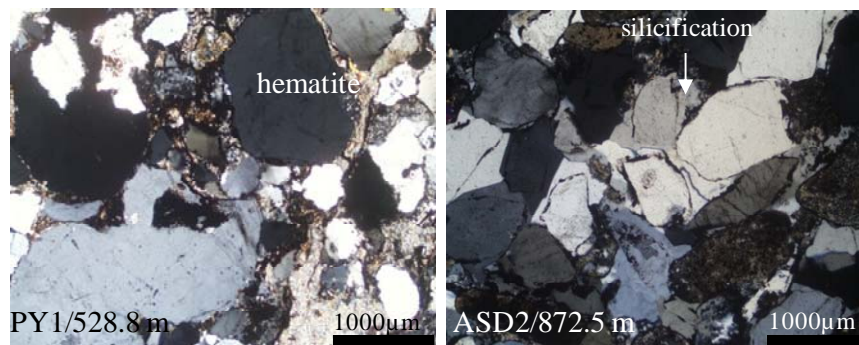


Figure III. 8: In PY 1 drill hole: detrital quartz grains are rounded or corroded, weakly deformed, of different size. In ASD 2 drill hole strong silicifications are present.

**Unit IV:** is present in 4 of the studied drill holes from the Cariewerloo basin:

This unit is mainly composed of medium-coarse grained altered silicified sandstone, polymict conglomerate (at 676 m in DRD 1) to microconglomeratic sandstone (ASD 2 between 791.3 and 817 m). The detrital grains of quartz are of different size, more or less rounded, sometimes deformed, with wavy extinctions, rimmed by iron oxides, with weak overgrowths (Fig. III. 9). They present strong silicification at 817 m in the ASD 2 drill hole with idiomorphic newly formed grains (at 791.3 m). Numerous fluid inclusions planes with large inclusions cut the detrital quartz grains and the overgrowths, sometimes in different directions. Disseminated fluid inclusions contain halite cubes and sometimes hematite, polycrystalline quartz pebbles occur in a pinkish matrix mainly composed of dolomite and/or

sericite. There are also some pebbles of schist. Myrmekitic texture has been observed in the DRD 1 drill hole. Abundant detrital feldspar grains occur as rounded grains, partly or completely altered, sometimes only recognizable by their former shape and cleavages. They are epigenized by chlorite and occur in an argillaceous matrix (generally in small amount and sometimes abundant in DRD 1 drill hole). Small plates of white mica and biotite are occasional. Biotite is generally altered, deformed and with iron oxides sometimes underline its cleavages. Abundant newly formed chlorite, sometimes in form of rosettes within the argillaceous matrix or at expand of detrital feldspar grains (from 800.65 to 817 m). Rounded or elongated clasts of schist are abundant here. Schistosity is clearly underlined by micas inside these clasts. Few grains of carbonates have been locally observed. Clay minerals locally are corroded by carbonates (dolomite) or sulphates (anhydrite) (791.3 m). Accessory minerals are abundant and disseminated or concentrated in layers (sometimes in cross-bed) or disseminated. They consist of idiomorphic zircon crystals (Fig. III. 9), titanium dioxides (Fig. III. 10), titanomagnetite, pyrite sometimes surrounded with chlorite, chalcopyrite, clusters of small crystal of anatase or rutile rimmed by hematite, rounded tourmaline, sphalerite, and monazite. At 810.1 and 817 m, in the ASD 2 drill hole, there are fractures rich in opaque minerals and filled by carbonates (dolomite) and sulphates (anhydrite plates) particularly at the margin of fractures (Fig. III. 11). Opaque minerals consist of abundant sub-idiomorphic grains of pyrite and pyrrotite associated with grains of carbonate and sulphate. Locally sulphates seem to be replaced by sulfides. A black globule at 810.1 m corresponds to carbonaceous matter which is surrounded by titanium dioxides (Fig. III. 11).



Figure III. 9: ASD2 (9312) drill hole: corroded grains of quartz with weak silicifications, carbonated and sericitic matrix. Accessory minerals are abundant (ex. zircon).

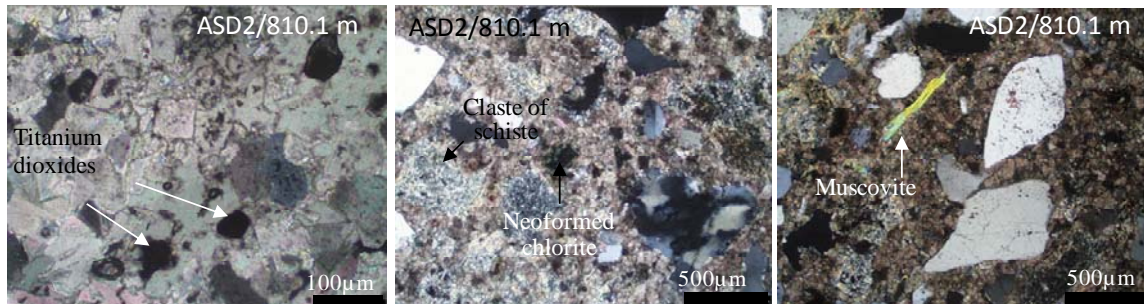


Figure III. 10: ASD2 (9312) drill hole: Ti-dioxides are abundant, chloritic neoformation, clasts of schist are abundant; plates of muscovite are abundant.

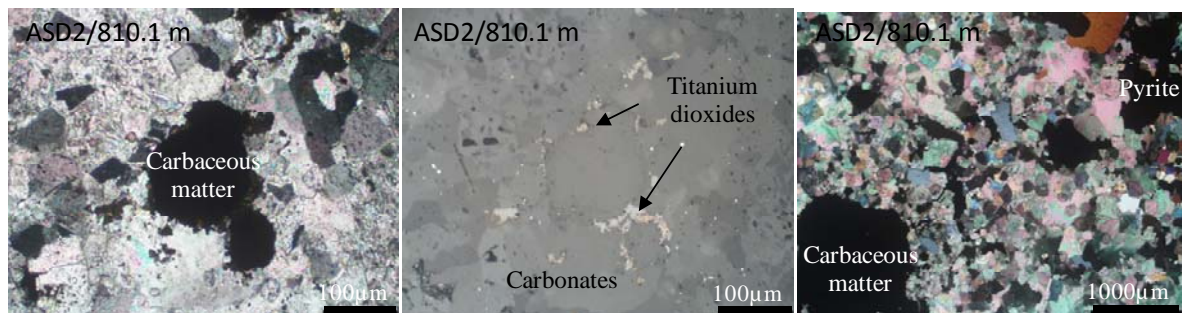


Figure III. 11: ASD2 (9312) drill hole: globules of carbonaceous matter (sometimes surrounded by titanium dioxides); carbonates associated with pyrite and anhydrite.

At 791.6 m, there is an enclave composed of quartz grains  $\pm$  plagioclase, anhydrite, carbonates and pyrite, rimmed by hematite and idiomorphic quartz (after hematite).

Dark purple-brown laminated siltstone at 439.6 and 495.8 m in DRD 1 and CSD 1 drill holes, respectively, presents alternating dark and clear layers, with abundant hematite rimming the detrital quartz, separated by a layer with coarser grains of quartz. Most quartz grains are fine, rather angular, a little deformed and sometimes polycrystalline, dispersed in a fine abundant argillaceous matrix. Some oriented plates of mica (muscovite, biotite, and chlorite) are abundant. Iron oxides are abundant in dark layers with cross-beddings, with some bleached beige spots. In some layers, clay is more abundant and quartz occurs in lesser amounts. In other layers hematite is very abundant around the detrital quartz grains. Accessory minerals are abundant: small crystals of titanium dioxide, zircon, and monazite. At the contact between brown siltstone and brown medium sandstone (at 513.2 m in the CSD 1 drill hole) many layers are rich in accessory minerals.

Dark grey-reddish-purple brown fine-medium-coarse-gritty, laminated cross-bedded sandstone with pebbles occur in drill holes: PY 1 (42.9 - 379.2 m), CSD 1 (401.4 - 734.15 m)



and DRD 1 (between 341.6 and 626.65 m): detrital quartz grains have different size, corroded, sometimes rounded (angular at 145.8 and 642.2 m), weakly deformed with wavy extinction, poorly sorted and with more or less important silicifications (Fig. III. 11). The detrital grains are sometimes rimmed by hematite. The matrix is sericitic or hematitic (sometimes carbonated). Quartz overgrowths are rimmed by Fe - oxides and planes of fluid inclusions cut the quartz grains. Quartz presents sometimes a myrmekitic structure with feldspars. Some quartz grains are more or less rounded and polycrystalline, others are fractured with neoformations of quartz. Elongated clasts of schist, polymict pebbles of quartz and altered feldspars almost completely replaced by clay. Quartzite is also common. Corroded plagioclases and potassic feldspars are more or less abundant (less abundant in PY 1 drill hole). Plagioclase is generally much less abundant than K-feldspar. The feldspars are rounded, altered, and slightly corroded. Overgrowths of adular on K-feldspar are visible at 401.1 m in CSD 1 drill hole. Some rounded grains (former feldspars?) are completely argillized; others are completely replaced by chloritic neoformations and are surrounded by dolomite (at 401.1 m in CSD 1 drill hole; Fig. III. 12). Disseminated plates of white mica and biotite are altered and deformed (more common at 65.45m) and tend to be oriented along the bedding. Sometimes iron oxides underline the cleavages of small biotite crystals included in the quartz grains. Chlorite neoformations are abundant in the argillaceous matrix of the sandstone from CSD 1 drill hole (at 401.1 m, 680.3 m, between 431.6 and 575.25 m). The detrital grains are slightly fractured and the fractures are underlined by hematite. Fractures at 680.3 m are filled by iron oxides, small grains of quartz and neoformed prismatic quartz. Bleached zones occur between 705.2 and 710 m in CSD 1 the drill hole with the strongest argillaceous alteration. Carbonates occur at 580.4 m in DRD 1 drill hole. Accessory minerals are more or less abundant (scarce between 705.2 – 710 m in CSD 1 drill hole), concentrated in layers or disseminated with magnetite, ilmenite, sulfides (interstitial pyrite and chalcopyrite are abundant among quartz grains at 401.1 m in the sandstone of CSD 1 drill hole and are sometimes included in the grains), titanium dioxides (small crystals of anatase), zircon (some are included in quartz), titanomagnetite, tourmaline, and monazite (?).

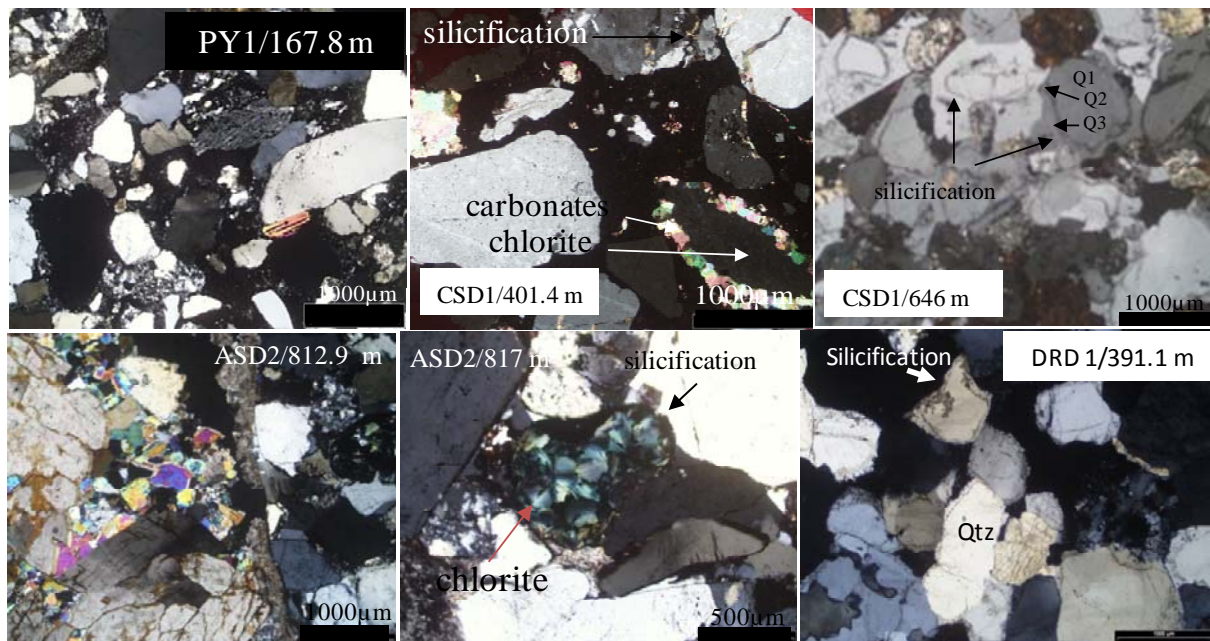


Figure III. 12: In PYI (9322) drill hole, at -167.8 m: quartz grains are corroded, deformed and of different size. In CSD1 (9321) drill hole, at -401.4 m: neoformations of chlorite replace rounded minerals and are surrounded by carbonates. At -646 m there are two generations of silicification. In ASD2 (9312) drill hole, at -812.9 m: a fracture is filled by carbonates and anhydrites. At -817 m neoformations of chlorite are abundant in grains of altered potassic feldspar. In DRD 1 (9326) drill hole, at -391.1 m, silicifications are significant.

**5.2. Blue Range Formation** (occurs in DDH 893-1 in the Itiledoo basin): considered to be an equivalent of the Pandurra Formation in the Cariewerloo basin. It presents the following characteristics (Table III. 1):

**Dark brown–yellowish-grey coarse to gritty sandstone (82.6 m at UNC 87 m):** grains of quartz have different size, weakly corroded and deformed, with very weak silicifications. Fluid inclusion planes cut sometimes the grains. Some pebbles of polycrystalline quartz and argilized feldspars are dispersed in an argillaceous or hematitic matrix. Small corroded grains of feldspars are abundant (K-Feldspar >> Pl), corroded, altered, locally Adular overgrowths on K-feldspar occur. Deformed and altered plates of white mica and often chloritized biotite are abundant (biotite > muscovite) and oriented in layers in alternation with quartzite or fine clay layers. Their cleavages are underlined by Fe-oxides. Zircon and tourmaline are abundant.

**Medium grey medium-coarse sandstone with floating pebbles and quartz dissolution (62.7 – 64 m):** detrital quartz grains present a strong silicification, but are corroded and rimmed by abundant hematite. Fluid inclusions planes sometimes cut the quartz grains. Pebbles of quartzite and polycrystalline quartz are abundant. Scarce small grains of feldspar

are strongly altered. Very small plates of deformed muscovite and altered biotite are abundant. The clay matrix is not abundant. Numerous small crystals of pyrite are disseminated. Ti-dioxides and tourmaline are abundant, possible limonite at 64 m.

**Microconglomeratic - conglomeratic sandstone with pink feldspars (33.35 to 52.1 m):**

Corroded, slightly deformed detrital quartz crystals, with weak silicifications (more important at 52.1 m) are rimmed by iron oxides. Fluid inclusion planes cut the quartz grains in different directions. There are polycrystalline quartz and quartzite pebbles. Detrital feldspars are abundant, of different size (generally coarse), altered and corroded. Adular overgrowths on K-feldspar occur at 41.5 - 52.1 m. Small and altered plagioclase grains are abundant (however less than K - feldspar). At 52.1 m plagioclase is less altered. Some rounded grains of feldspars are completely replaced by clay. Altered and deformed muscovite and biotite are scarce (abundant at 33.35 m) with iron oxides underlining their cleavages. Small biotite crystals are included in some detrital quartz grains. The matrix is argillaceous. Tourmaline and small crystals of titanium dioxides are abundant.

Formation	Pandurra Formation				Blue Range Formation
	U I	U II	U III	U IV	
<b>Drill hole</b>	PY 1, DRD 1	PY 1, ASD 2, CSD 1	PY 1, ASD 2, CSD 1	PY 1, DRD 1, ASD 2, CSD 1	DDH 893-1
<b>Sediments</b>	sandstone polymicte conglomerate gritstone	mudstone laminated sdst laminated silt	gritty sandstone	sdst, polymict conгло, microconglomeratic sandstone, laminated silt-sdst	gritty sdst (82.6-87 m) microconglomeratic sandstone with feldspars
<b>Silicification</b>	strong in DRD1 ± important in PY 1	weak silicification	± important, strong at 779.5 m in PY 1, between 847.45 & 872.7 m in ASD 2	± important, strong at 817 m in ASD 2	weak silicification strong between 62.7 & 64 m
<b>Feldspars</b>	abundant altered Kfs - adular neoformation	abundant Kfs + Pl (Pl<<< Kfs)	abundant altered Kfs + rounded grains completely altered	abundant partly or completely altered Kfs	abundant Kfs + Pl (Pl<< Kfs) – locally adular neoformation
<b>micas</b>	rare musc. in DRD1 abundant musc. & Bt in PY 1	abundant musc., Bt & Chl	abundant musc., Bt & Chl	occasional musc. & Bt	abundant musc. & Bt (Bt > musc.)
<b>Other minerals</b>	hematite, Chl neoformation, carbonates	hematite	hematite	hematite, chlorite neoformation, dolomite, anhydrite, carbonaceous matter	hematite
<b>Accessory minerals</b>	Zrn, Tur, TiO <sub>2</sub> , Mnz, Mag	Mag, TiO <sub>2</sub> , Zrn, Tur, Mnz	Py, TiO <sub>2</sub> , Zrn, Mnz	TiO <sub>2</sub> , Zrn, Tur, Mnz, , Py, Ccp, pyrrhotite, sphalerite	Zrn, Tur, TiO <sub>2</sub> , Py
<b>Alteration</b>	argilization, chloritization, hematization	argilization, chloritization, hematization	bleaching, chloritization, hematization	argilization (around fractures), chloritization, hematization	argilization, chloritization, hematization

Table III. 1: characteristics of the sediments of the Cariewerloo and Itiledoo basins.

Figure (III. 13) represents the paragenesis in Cariéwerloo and Itiledoo sediments.

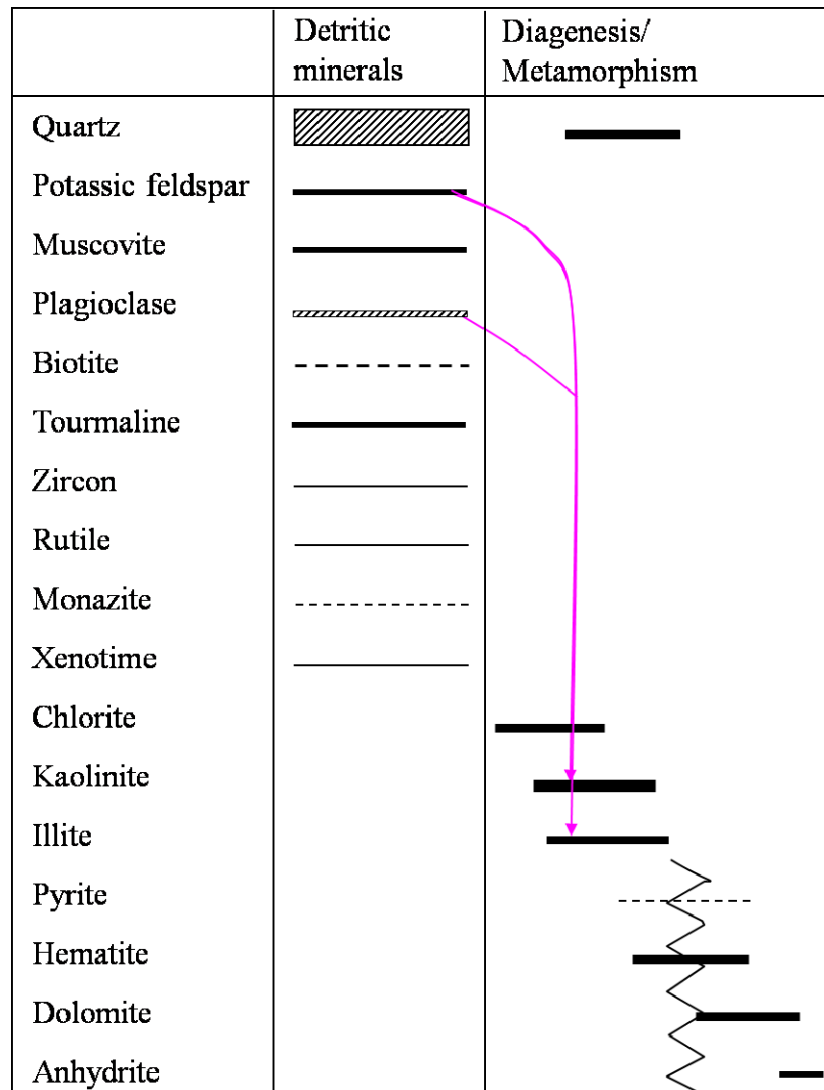


Figure III. 13: Mineral paragenesis established for the Cariéwerloo and Itiledoo sandstones. The diagram represents successively detritic minerals deposition, diagenesis and/or metamorphism stages.

## 6. Sandstone geochemical characteristics

### 6.1. Geochemistry of the major elements

Compared to the sediments of the Athabasca and Kombolgie basins, these sandstones are much poorer in quartz in the Q/A diagram (Fig. III. 14). They essentially represent a mixture in variable proportions of quartz and clays, with moderate amounts of feldspars. The most feldspathic samples are those closest to the Q axis. The proportion of carbonates is not very significant (no negative A values). A mudstone of the drill core PY 1 is the richest sample in clay. A gritstone of drill core PY 1 is the richest in feldspars and the poorest in quartz. Other more feldspathic samples belong to various drill cores. For example, sandstones of the CSD 1 drill core show very variable proportions of feldspars and clay minerals. Gritstones and one conglomerate of DRD1 drill hole are all relatively rich in kaolinite as well as a few sandstone of DDH 893-1 and one conglomerate of PY1 and one of drill holes.

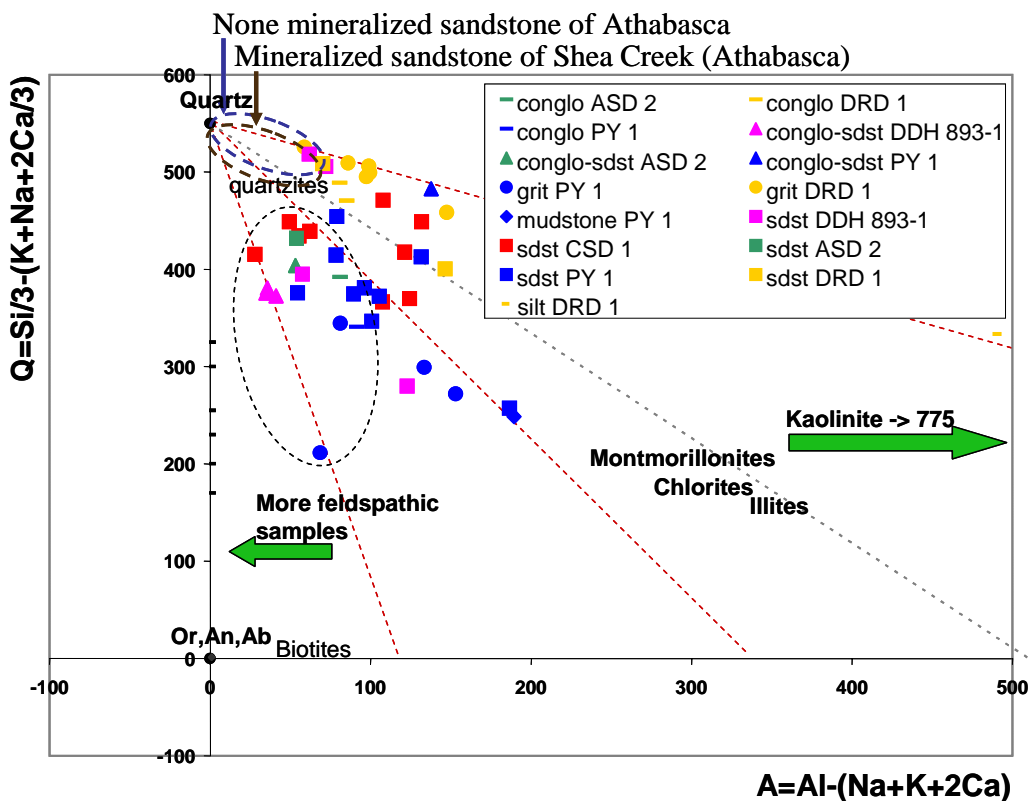


Figure III. 14: Diagram of quartz versus peraluminosity index for the sediments of the Cariéwerloo basin allowing the determination of the relative proportions quartz – clay minerals – feldspars – carbonates from whole rock geochemical analyses.

Conglomeratic sandstone and sandstone of DDH 893-1 drill core present the largest proportions of feldspars relative to clay minerals among all samples (Fig. III. 15). Sandstone,

gritstones and siltstones (except one) of DRD 1 drill core are the richest in kaolinite with variable proportions of chlorite. Two sandstones of DDH 893-1 drill core and two of CSD 1 drill core are composed of a mixture of illite and kaolinite. Other sediments seem to be rich in illite with variable proportions of feldspars, chlorite and kaolinite. Sandstone of DRD1 drill hole and a conglomerate of ASD 2 drill core is the richest in chlorite.

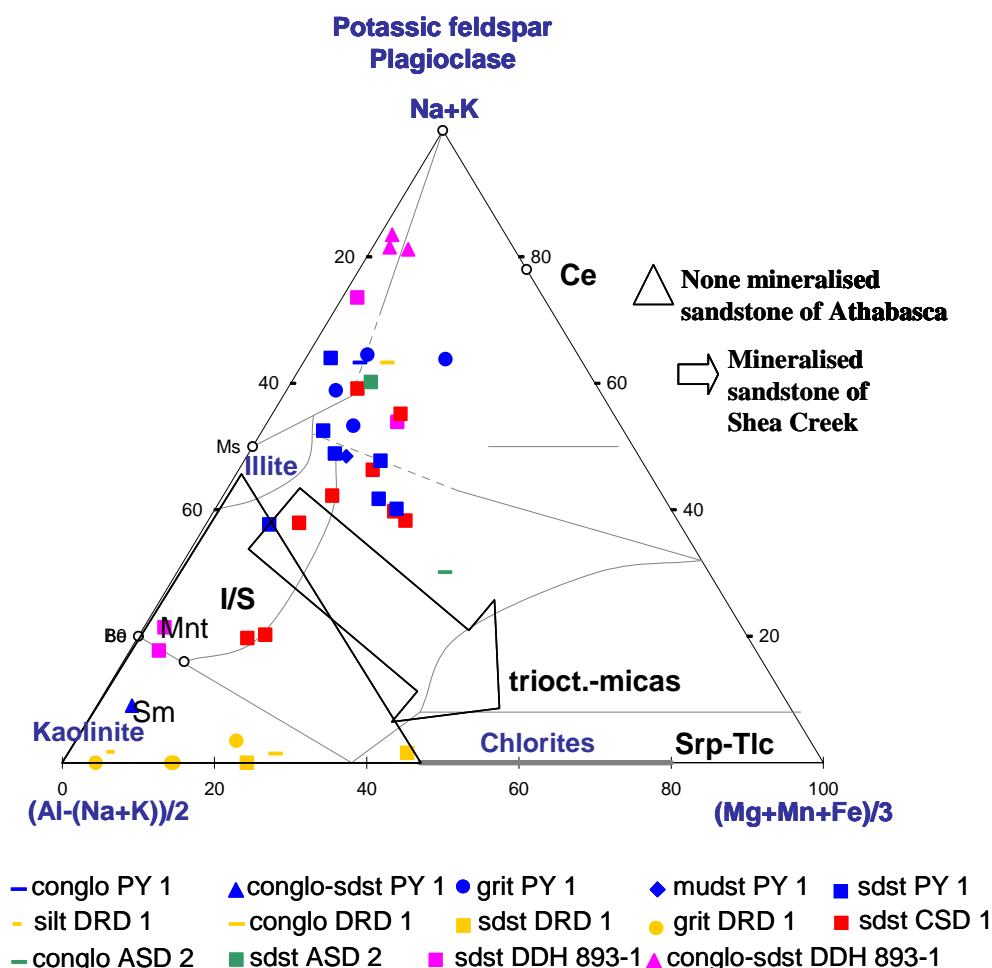


Figure III. 15: Diagram discriminating the relative proportions of feldspars-clay minerals-micas (independently of the quantity of quartz) for the sediments of Cariewerloo.

The diagram Na/Al versus K/Al (Fig. III. 16) shows the absence of plagioclase in the sediments of Cariewerloo. The small quantities of sodium present in the samples can be localised in the perthites of potassic feldspars. Plagioclase has been altered to clay during the diagenesis. Comparatively, the sandstone of Pasha-Ladoga (Karelia, Russia), also rich in feldspars, still presents a significant plagioclase fraction outside of the mineralized zones.

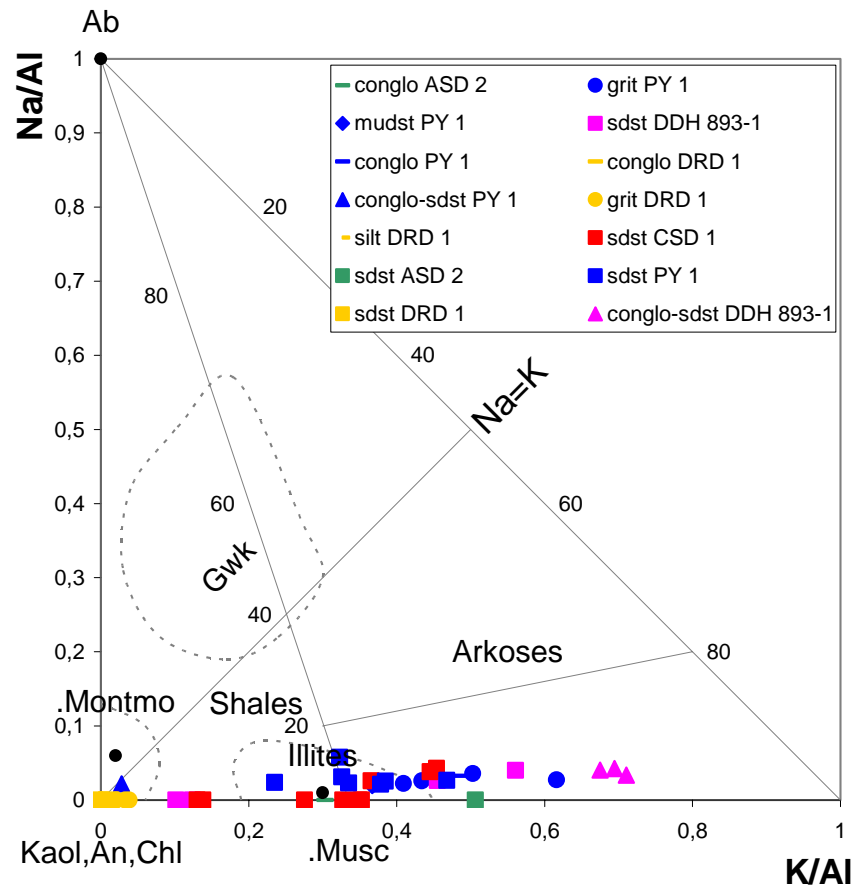


Figure III. 16: Na/Al versus K/Al diagram allowing discriminating the proportions of plagioclases - potassic feldspars - clay in the sediments of the Cariewerloo basin.

## 6.2. Geochemistry of the trace elements

Th contents of the sediments of Cariewerloo vary strongly from 4 to more than 100 ppm (Fig. III. 17). U contents are practically all higher than 1 ppm and vary largely (0.8 to 9 ppm) contrary to zones far away from mineralization in the Athabasca basin, where those are always lower than 1 ppm. Th/U ratios in most samples are close to the average crustal ratio (Th/U = 4) indicating a low global mobility of U. However, approximately 20 % of the samples show a uranium depletion with Th/U ratios reaching 10 (especially, one conglomerate, two gritstones and one sandstone from DRD 1 drill core, two conglomerate from DDH 893 – 1 drill core, two gritstones and sandstones of PY 1 drill core have Th/U ratio higher than 6). Thus, these high Th/U ratios show that a significant fraction of uranium was leached from approximately 20 % of samples. The conglomerate, the richest in thorium (> 100 ppm), has the highest Th/U ratio and is also the richest in kaolinite (Fig. III. 17) relative to quartz. Two gritstones from DRD 1 with Th/U~10 are also among the richest in kaolinite. Kaolinite is primary in this sample.

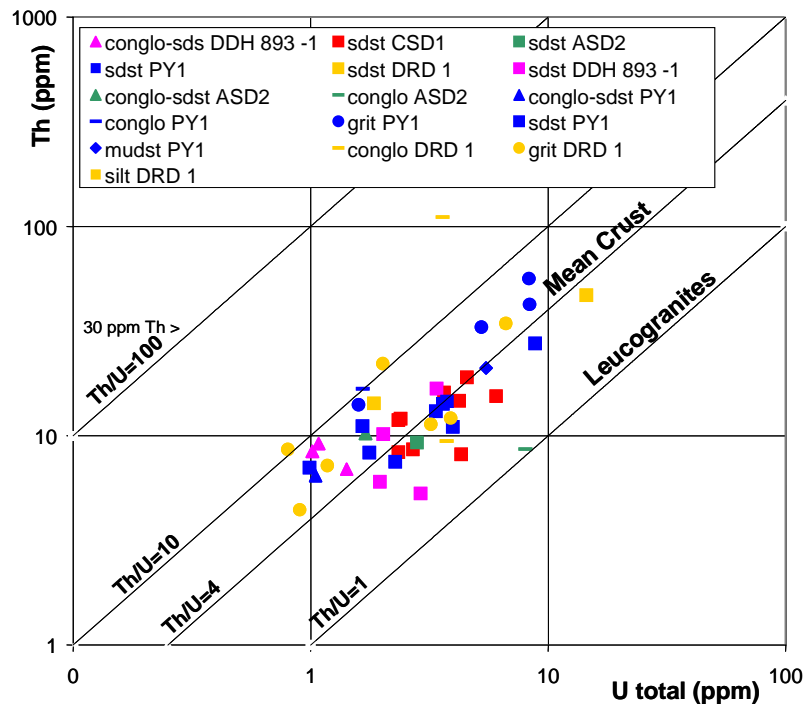


Figure III. 17: Th - U diagram for the sediments of Cariewerloo.

Some samples show a slight enrichment in uranium. A conglomerate of the ASD 2 drill core is enriched U (8 ppm) with the highest Th/U ratio close to 1. This sample is also one of the richest in chlorite. A sandstone from the CSD 1 drill core and one from the DDH 893-1 drill core present Th/U ratios equal to 2 (grains are completely altered or replaced by iron oxides can be observed in these samples). The sample the richest in U (15 ppm) - sandstone of the DRD 1 drill core - has a Th/U ratio close to the average crustal ratio. Thus, its uranium content reflects essentially its high content in accessory minerals indicated by its high Th content (47 ppm), with no significant leaching.

Many samples have Th/La ratios slightly higher than the reference domain for non altered siliciclastic rocks comprised between 0.2 and 0.4, but remaining below one ( $\text{Th/La} < 0.75$ ) (Fig. III. 18). This indicates a moderate leaching of LREE of a large part of the Cariewerloo samples, possibly in relation with a partial alteration of monazite by reference to the studies on the Athabasca and Kombolgie basins. Samples with the highest Th/La ratios correspond to:

- a conglomerate and two sandstones of the DDH 893-1 drill core although poor in thorium and thus in detrital monazite,
- a sandstone and two conglomerates of DRD 1 drill core,
- three sandstones of PY 1 drill core.



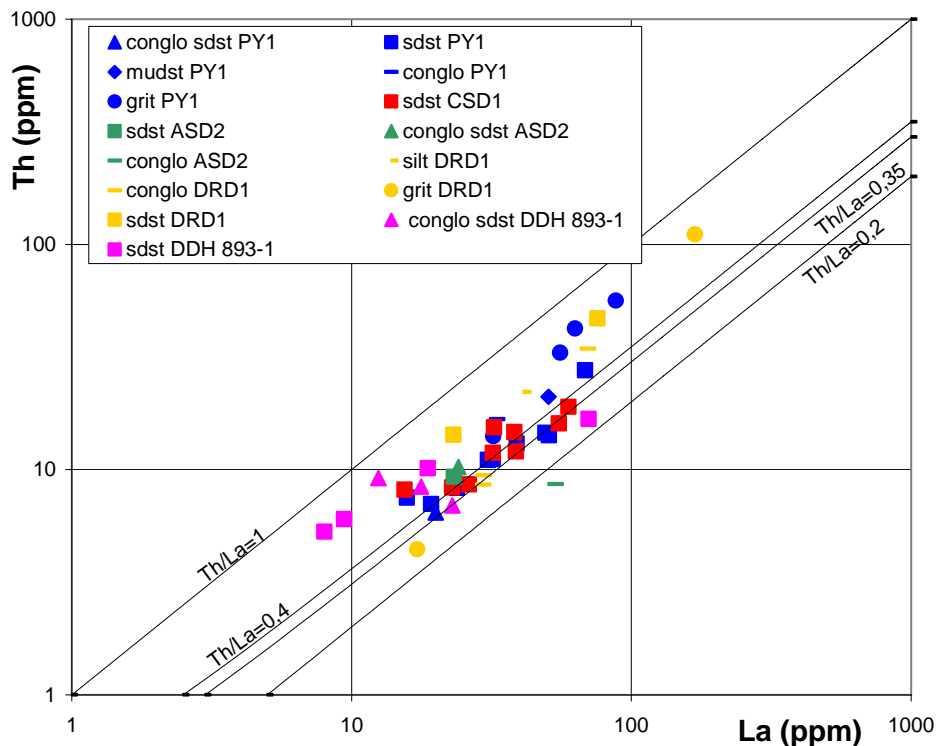


Figure III. 18: Diagram Th - La for the sediments of Cariewerloo.

Only one sample has a Th/La ratio lower than 0.2 (a conglomerate of ASD 2 drill core) indicating possible aluminophosphate-sulphate neoformation.

If the uranium loss in the samples was related only to the degree of alteration of monazite, we should expect to have a correlation between the increase of the Th/U ratio and the Th/La ratio.

In fact, in figure (III. 19) several trends are observed:

- the samples with Th/U ratios higher than 6 show a correlation between Th/U and Th/La values indicating simultaneous U leaching with LREE leaching indicating the alteration of monazite;
- the samples with Th/U ratios around the average crustal ratio (6 to 2) do not present the correlation despite the occurrence of variable Th/La ratios. Such behaviour may result from the in situ trapping of the uranium leached from monazite alteration or evidence of secondary U-enrichment especially for the rocks with the lowest Th/U ratios and the highest Th/La ratios.

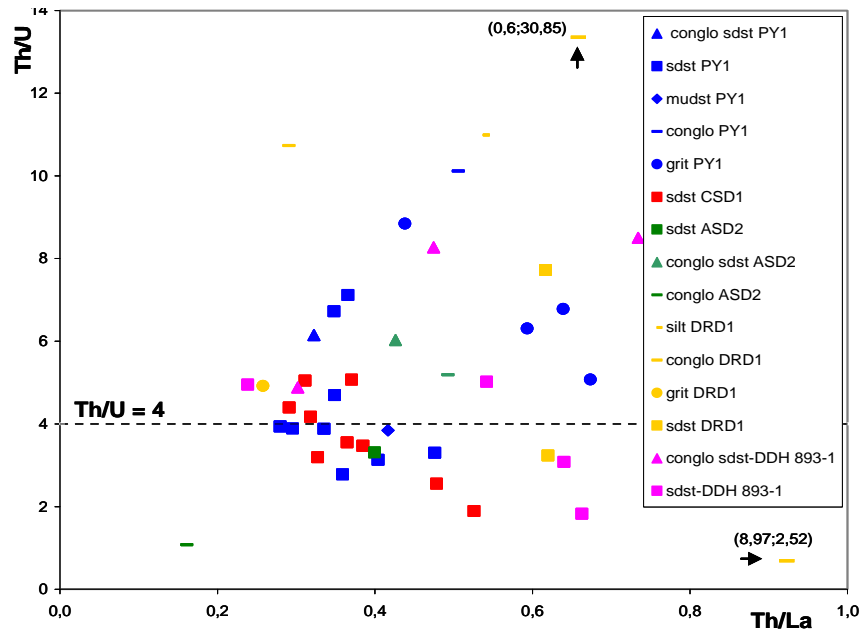


Figure III. 19: Th/U - Th/La diagram for the Cariewerloo sediments.

In the  $U_{\text{Partial}} - U_{\text{Total}}$  diagram (Fig. III. 20), about half of the samples present more than 50 % of mobile U, especially gritstone of Formation I in PY 1 drill hole, in sandstone of the formation III in PY1 and CSD 1 drill holes, sandstone of the formation IV in DRD 1 drill hole and in sandstone of the Blue Rang Formation. Such a relation represents a further evidence of the absence of significant uranium leaching in the Cariewerloo basin.

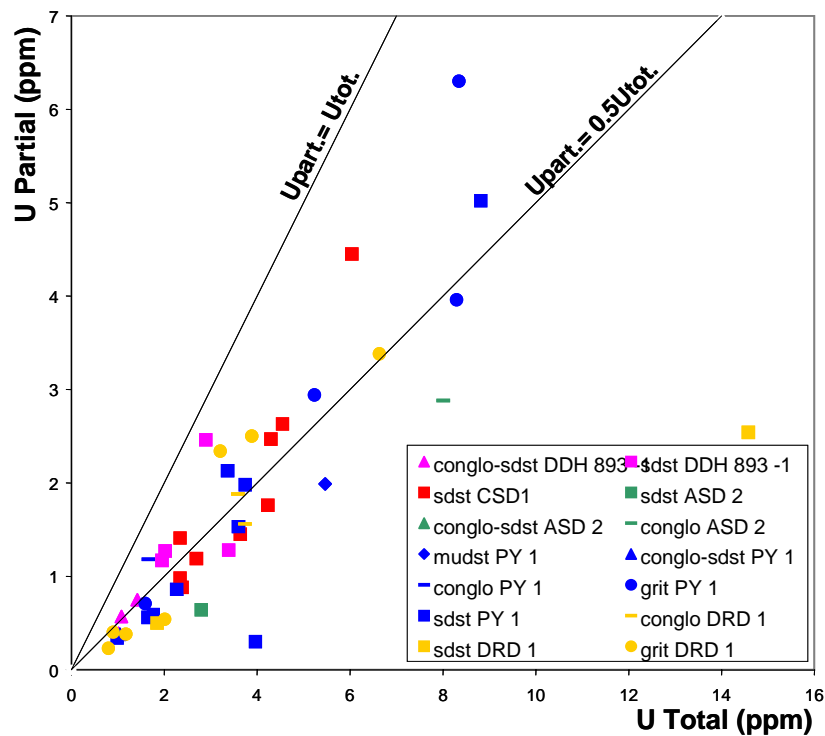


Figure III. 20: Partial U – Total U diagram for the sediments of Cariewerloo. It allows determining the proportion of mobile U in the samples.

The abundances of REE are extremely variable in the clastic rocks of the Cariewerloo basin. The patterns are typical for siliciclastic rocks (Fig. III. 21).

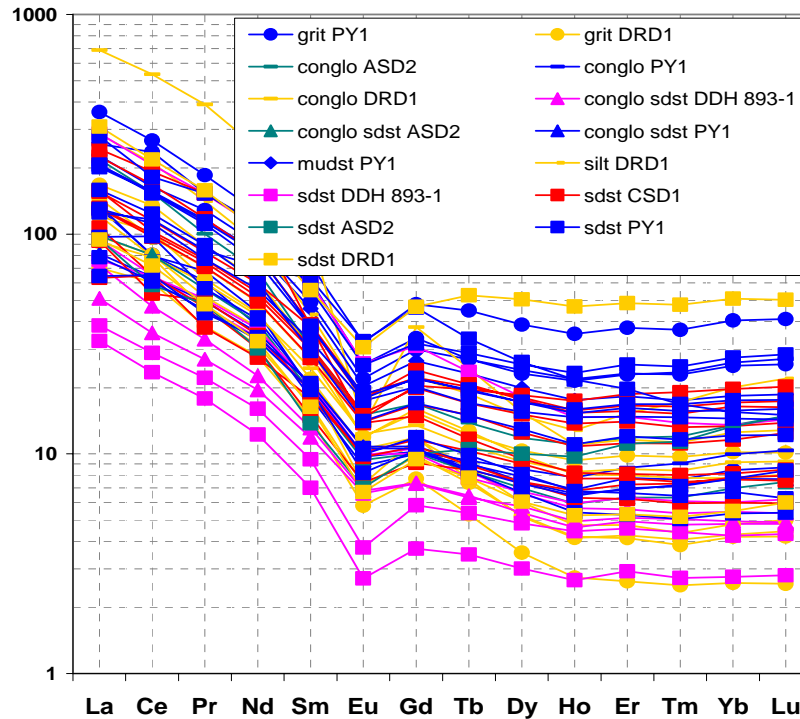


Figure III. 21: Rare Earth Elements patterns normalized to CI chondrites (Orgueil).

All samples of the DRD 1 drill core and three sandstones of PY 1 are among the richest in Th and REE probably in relation with the abundance of monazite. Some patterns show weak positive Ce anomalies, which can indicate a contribution in the sediments of a component deriving from paleolaterites in the source area. All samples show well marked negative Eu anomalies, indicating a material contribution deriving essentially from post-Archaean sources. Most HREE patterns do not show a basin shaped curve, indicating the absence of leaching of Intermediate Heavy Rare Earth Elements (IHREE) contrary to what has been observed in the mineralized basins of Athabasca and Kombolgie. One sample of conglomerate and sandstones from the DRD 1 drill core show a weak curvature indicating a moderate leaching of IHREE in accordance with the evidences of U leaching from the Th/U diagram.

The Zr/Y ratio in non altered zircons is higher than 100 and goes down up to 20 in altered zircons from Athabasca (*Kister et al., 2003*). Figure (III. 22) intends to show the correlation between abundances of Zr and Y, confirming the major control of the localization of Y by zircon. Many sediments of Cariewerloo basin present Zr/Y ratios lower than 20 indicating a

notable alteration of this mineral or the presence of other mineral phases rich in yttrium, such as xenotime.

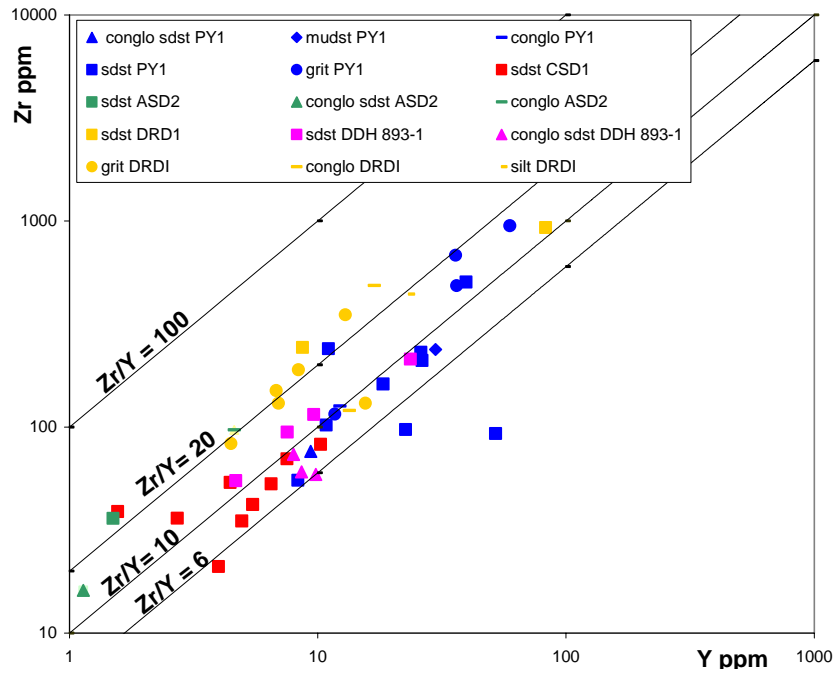


Figure III. 22: Zr - Y diagram for the Cariewerloo sediments.

**Zircon alteration in the Cariewerloo basin**

Detrital zircons are frequent in this basin; primary zoning is generally well developed (Fig. III. 23-i), but alteration is also observed (Fig. III. 23-ii-iii-iv-v-vi-vii). Sometimes, inclusions of hematite, sulphate, and Ti-dioxides are visible (Fig. III. 23-v-vi). The altered sections of the zircons are depleted in Zr and Si, and enriched in P, Y, Th, Fe, Ca, and U (Fig. III. 24 & 25).

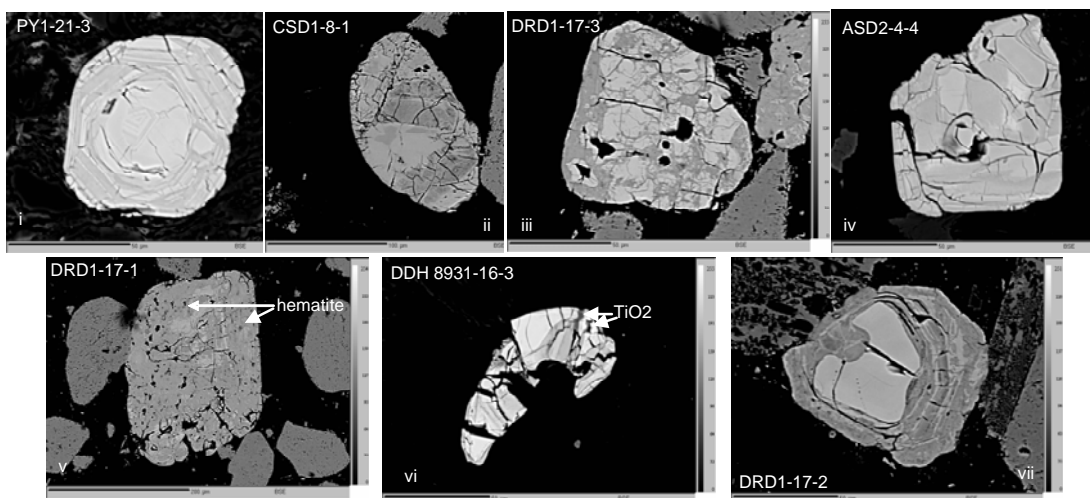


Figure III. 23: (i): primary zoning is generally well developed in zircon crystals. Alteration of the crystals is also observed (ii-iii-iv-v- vi-vii). Inclusions of hematite, sulphate, and Ti-dioxides are common (v-vi) in the Cariewerloo sediments.

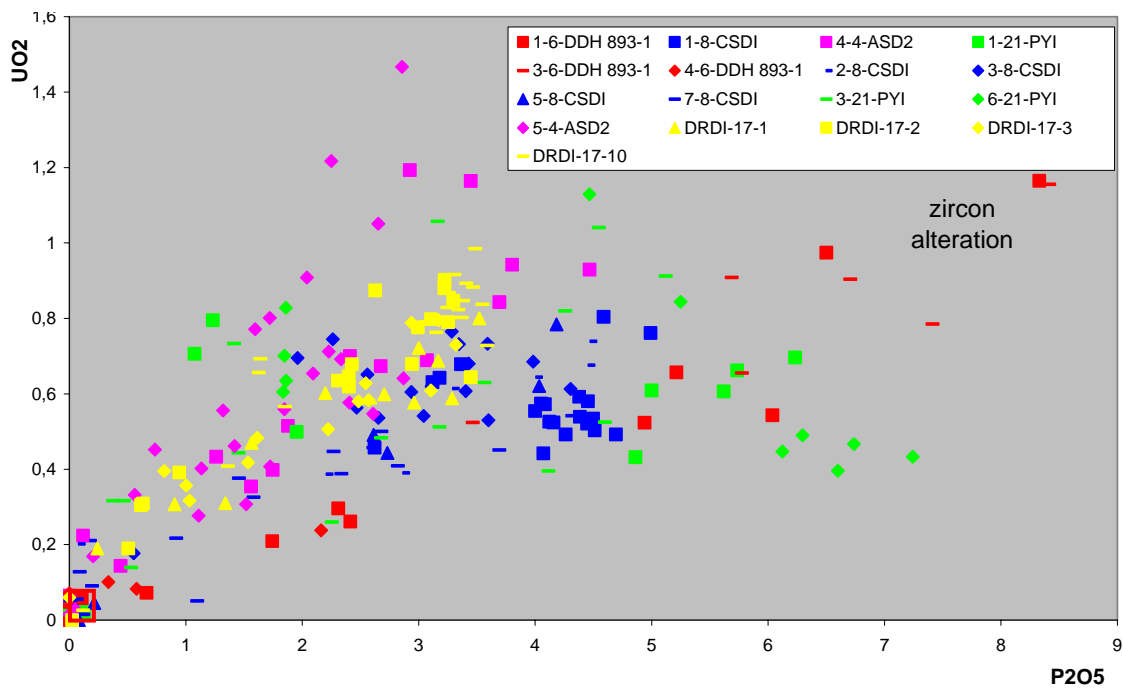


Figure III. 24: U versus P plot of unaltered (red square) and altered domains of zircons from the Cariewerloo sediments.

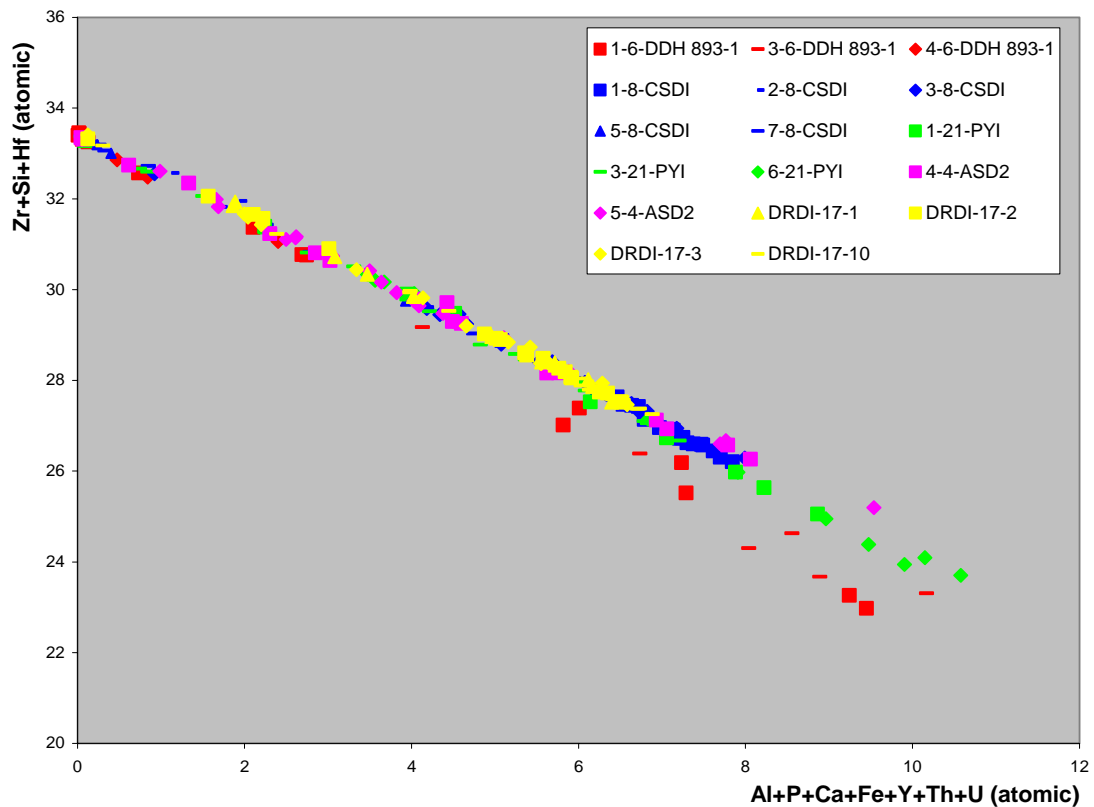


Figure III. 25: Substitution of Zr + Si + Hf by Al + P + Ca + Fe + Y + Th + U in zircons from the sediments of Cariewerloo.

### 6.3. Evolution of the geochemical parameters along the lithostratigraphic column

To know at which level of the sedimentary pile the most important mobility of elements and consequently important permeability of the sandstone during diagenesis and/or hydrothermal alterations has occurred, the preceding parameters have been plotted along the stratigraphic column in each drilling of the Cariewerloo basin.

#### Drill Hole PY 1 (9322)

In PY 1 (9322) drill core, the contents of quartz (Q) grow during deposition from Member 1 to Member 4 of the Pandurra Formation in a remarkable way (Fig. III. 26), reflecting the increasing of purity of the siliciclastic sediments. The clay content (A) vary in a more randomly, indicating that the quartz content is inversely correlated with the content of detrital feldspars, and that most clay minerals are probably not detrital but derive from diagenetic or hydrothermal alteration, which intensity is independent of the primary distribution of detrital minerals. The Nb, Ta and Th abundances (indicating accessory mineral abundances) decrease from unit I to unit IV in accordance with the increasing of purity of the sandstone. Th/U ratios higher than the average crustal ratio, are observed especially in Unit I, and to a lesser extend at the top of unit III and the base of Unit IV indicating a possible U leaching. Diagenetic fluid circulations are more important at the base of the column, in unit I, is also indicated by the highest Th/La ratios. The values of the Ho<sub>(N)</sub>/Ho\* ratios are only slightly lower than the “normal” values. Low Zr/Y ratios indicate zircon alteration.

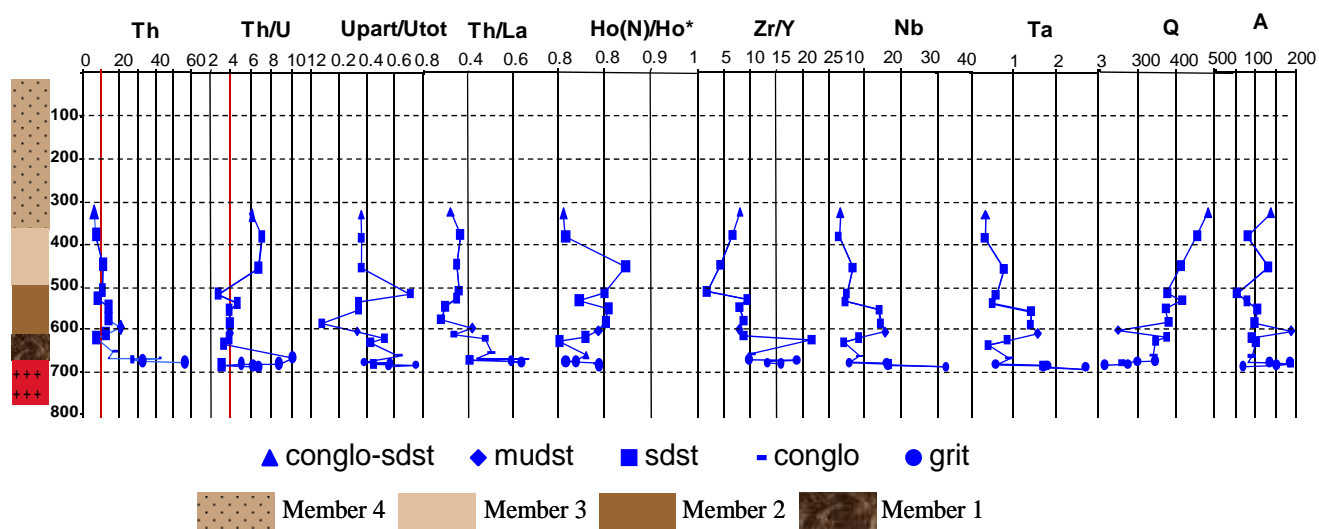


Figure III. 26: Variation of some geochemical parameters in the Pandurra formation of (drill core PY 1-9322), basin of Cariewerloo. Blue fields = non-altered sediments.

The most mobile uranium ratios are observed at the base of Formation I just above the unconformity and at the top of Unit 2 and correspond as expected to slightly lower Th/U ratios, indicating U enrichment. The less mobile uranium ratio occurs towards the base of Formation II, but does not correspond to the highest Th/U ratio as expected if uranium has been leached.

### Drill Hole CSD 1-9321

Sandstone tend to become richer in quartz (growth of the parameter Q), c.a. more pure, in accordance with decreasing Th and Nb contents (lower accessory mineral abundance) toward the top of the Pandurra Formation (Fig. III. 27). But they become more argillaceous (growth of the parameter A), confirming that detrital quartz abundance is not inversely correlated with clay but with feldspar which are the main detrital phases after quartz. The most quartzose sandstones are in the higher part of unit IV of the formation of Pandurra, but the most important fluid circulations indicated by Th/La ratios  $> 0.4$  (probable alteration of monazite) are observed at the base of the drill core as in the previous hole. Surprisingly, also the highest Th/U ratios ( $> 4$ ) indicating U leaching are localized in the upper part of the drilling. The  $Ho_{(N)}/Ho^*$  values are normal. The highest proportion of mobile U occurs towards the base of the drilling and in the intermediate part as in the preceding drilling, but do not correspond to the lowest Th/U ratios. Low Zr/Y ratios indicate zircon alteration.

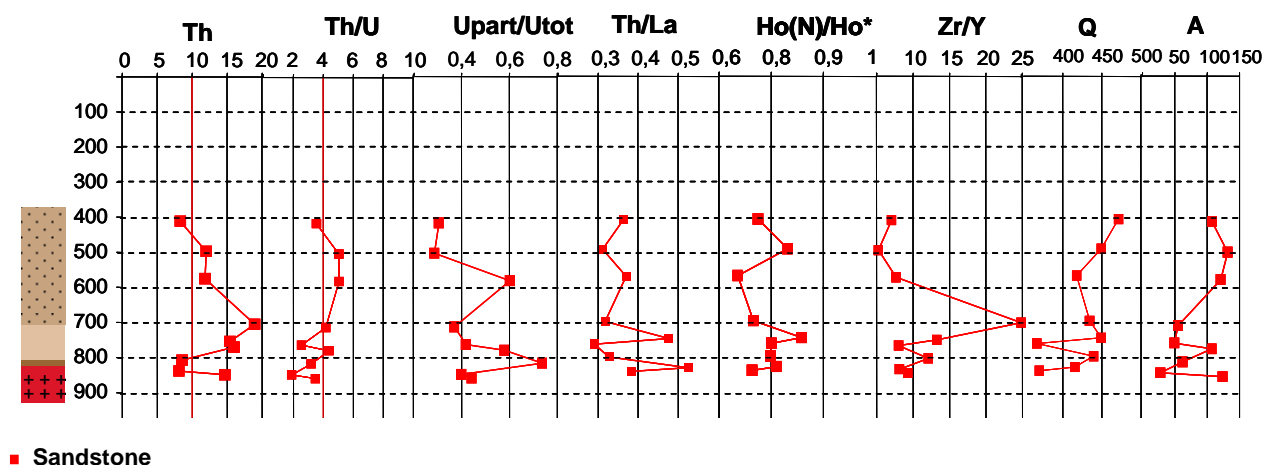


Figure III. 27: Variation of the geochemical parameters in the Pandurra formation along the CSD 1 - 9321 drill core in the basin of Cariewerloo.

### Drill Hole DRD 1 (9326)

Only unit IV, the last unit of the Pandurra Formation, was sampled in the DRD 1 (9326) drill hole. Most of the samples are the most quartzose from all the drill holes (Q~500), but not the

poorest in clays. A sample very rich in clay and poor in quartz is localized at the top of unit IV (Fig. III. 28). The sample the richest in Th, with highest Th/U ratio, and also with high Th/La ratio and low  $Ho_{(N)}/Ho^*$  ratio occurs in this drill hole indicating an important leaching of U and REE's in this sample. A significant circulation of diagenetic fluids is indicated by the Th/La ratios in half of the samples and by the two presenting  $Ho_{(N)}/Ho^*$  ratios lower than 0.7 corresponding to the leaching of intermediate heavy rare earth elements.

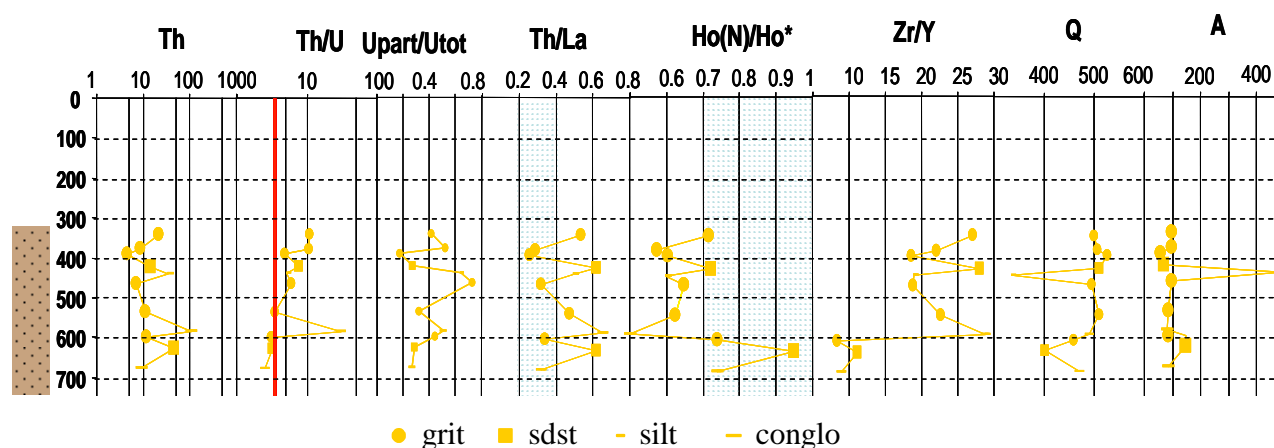


Figure III. 28: Variation of geochemical parameters in the formation of Pandurra along DRD 1 - 9326 drill core in of the basin of Cariewerloo.

**Drill Hole ASD 2-9312:**

In drill hole ASD 2-9312, mainly Formation II has been sampled. It is characterized by an increasing in quartz towards the top not correlated with Th and Nb (Fig. III. 29). The clay proportion is small. The high Th/U ratio for one sample indicates a leaching of uranium, but the Th/La report remains close to the average values of the non-altered sediments. The proportion of mobile U increases towards the top of the Formation, not correlated with Th/U ratios.

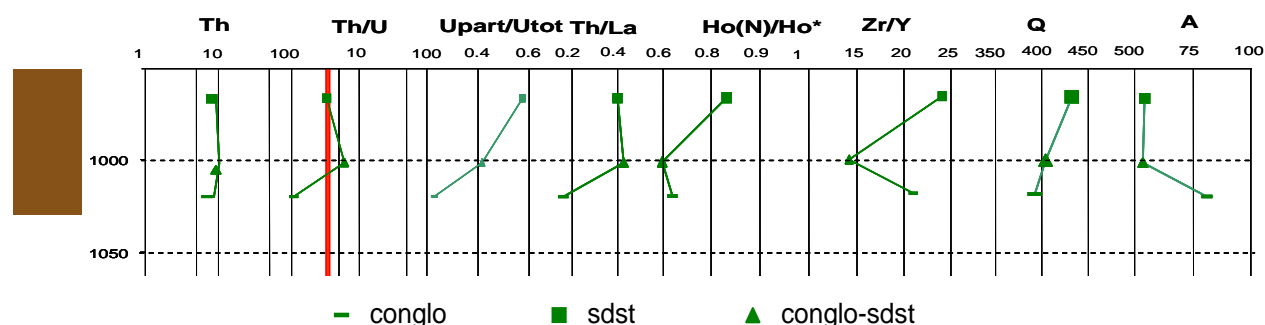


Figure III. 29: Variation of geochemical parameters in the Pandurra formation along drill hole ASD 2-9312 in the Cariewerloo basin.



**Drill Hole DDH 893-1-9316:**

Drill hole DDH 893-1-9316, was drilled in the Itiledoo basin and intersected the Blue Range Formation (0 - 87.5 m) and the Mangalo Schist Formation (87.5 - 126.2 m). Quartz content is relatively low, increases in the sandstone of the first half of the Formation and then decreases in the conglomerates (Fig. III. 30). Th and Nb are reversely correlated with the quartz abundance, especially in the sandstone. Clay proportion is also relatively low (A = 50) and tends to decrease from the sandstone to the conglomerates. The highest Th/U ratios observed at the base of the sandstone and in the conglomerates indicate some uranium leaching, but are not correlated with the Th/La ratios except for the sample with the lowest Th/U ratio. The values of the Ho<sub>(N)</sub>/Ho\* ratios are normal. Those of Zr/Y are low (less than 13) indicating zircon alteration. The proportions of mobile uranium are reversely correlated with the Th/U ratio: the samples presenting evidence of U-enrichment (low Th/U) have the highest proportion of mobile uranium and reversely.

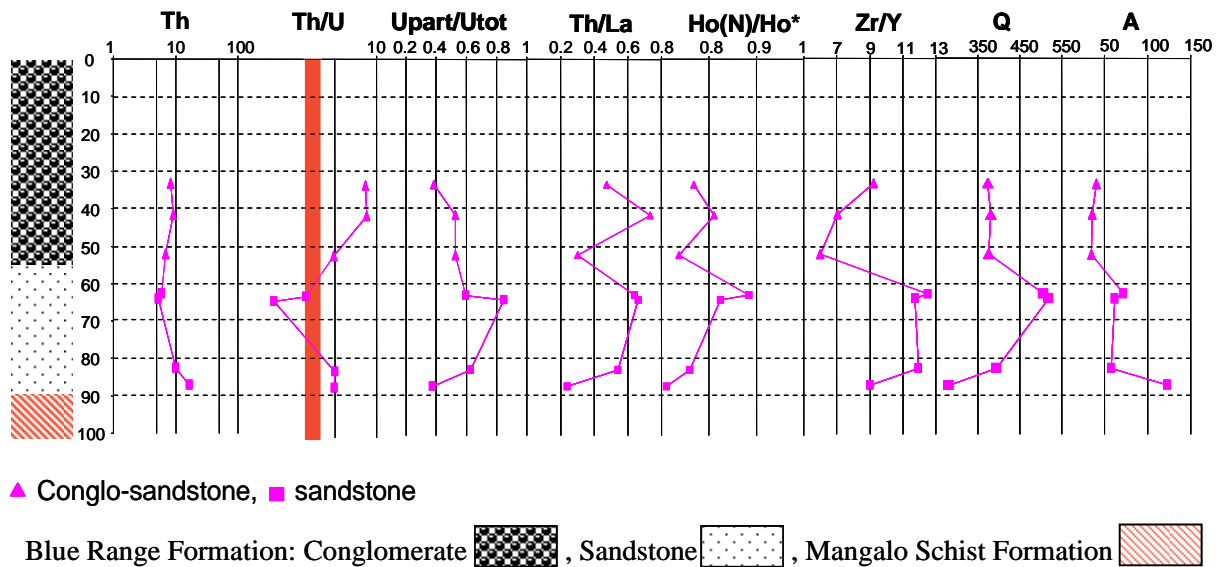


Figure III. 30: Variation of geochemical parameters in the DDH 893-1-9316 drill core in the basin of Itiledoo.

**6.4. Chemistry of the clay minerals**

**White-mica** form a well defined solid-solution between detrital muscovite and phengite (poorer in Al and richer in Fe-Mg-Si, Fig. III. 31) which crystallizes during diagenesis.

**Detrital biotites** in the diagram of Velde (Fig. III. 32) are almost all chloritized. Biotite and muscovite are abundant in all the samples sometimes as small flake.

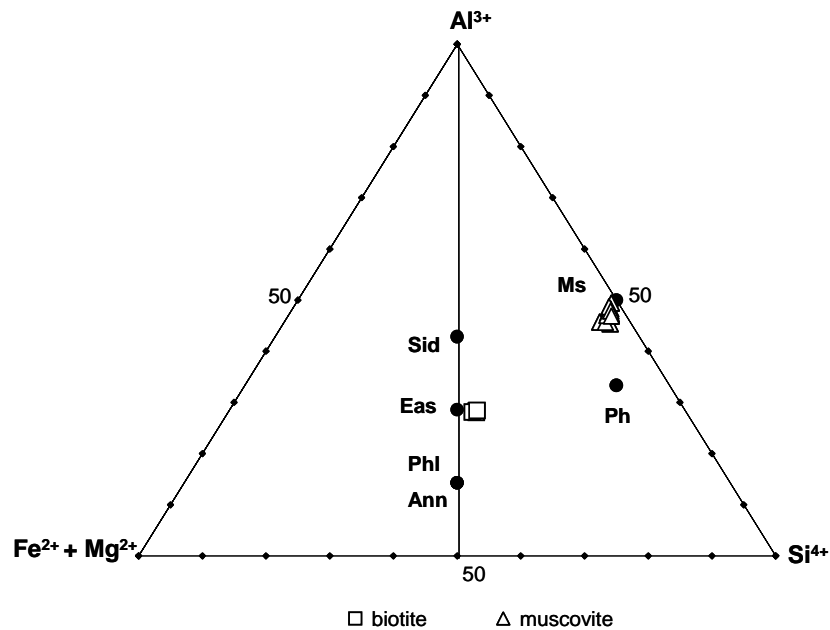


Figure III. 31: Classification of white micas of Cariewerloo in a diagram Si - Al - (Fe + Mg). (Monier, 1985).

**Chlorites** are distributed in the thuringite and chamosite fields (Fig. III. 33). They are neoformed. Chemical compositions of chlorite plotted in a triangular diagram (Fig. III. 34) show that the diagenetic chlorites of the Cariewerloo sediments are trioctaedric iron rich chlorite whereas the chlorites of the Athabasca basin sediments related to the mineralization are di-trioctaedric Al and Mg rich type (Lorilleux *et al.*, 2003). For the newly formed chlorites, it is possible to determine their temperature of crystallization from the proportion of Al in the tetrahedral site (Cathelineau and Nieva, 1985; Cathelineau, 1988) according to the formula:  $T (^{\circ}\text{C}) = -61.92 + 321.98 (\text{Al (IV)})$ . The majority of **newly formed chlorites** of Cariewerloo compared to chlorites of Los Azufres and Salton Sea (Cathelineau, 1988) were crystallized at temperatures **between 280 and 300 °C**. Chlorites from unit IV (CSD 1 drill hole) show temperatures less important (**230 - 315 °C**). Neoformed chlorite (brunsvigite) replacing rounded minerals are rich in Al (VI) (Fig. III. 35). It is noticed that the estimated temperatures are higher than those of Athabasca (150 to 200 °C) and Kombolgie (150 ± 15 °C) estimated from fluid inclusions for the diagenesis.

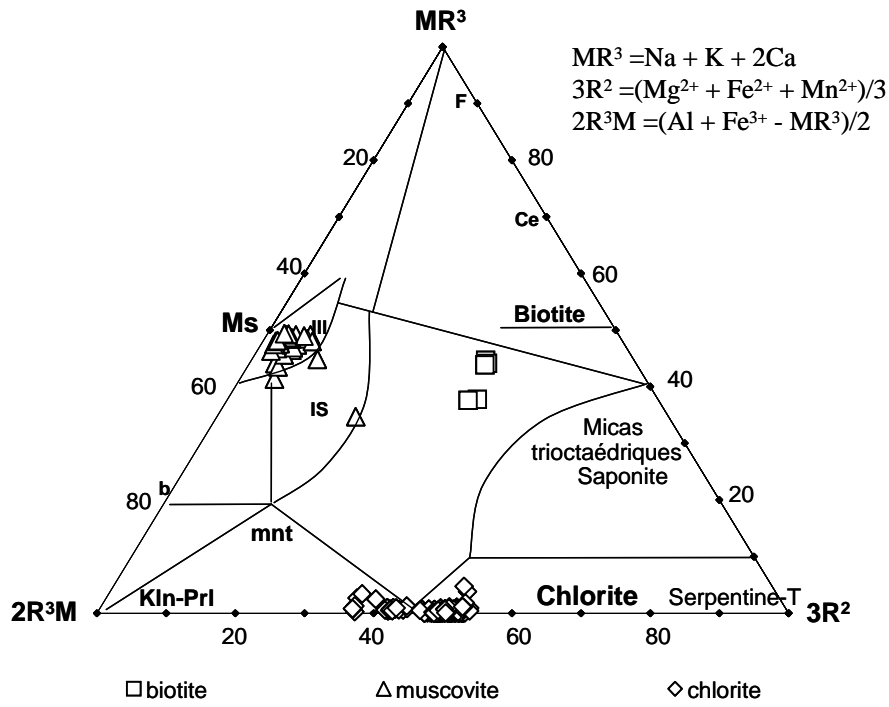


Figure III. 32: Characterisation of types of micas of Cariewerloo in the diagram of Velde (1977).

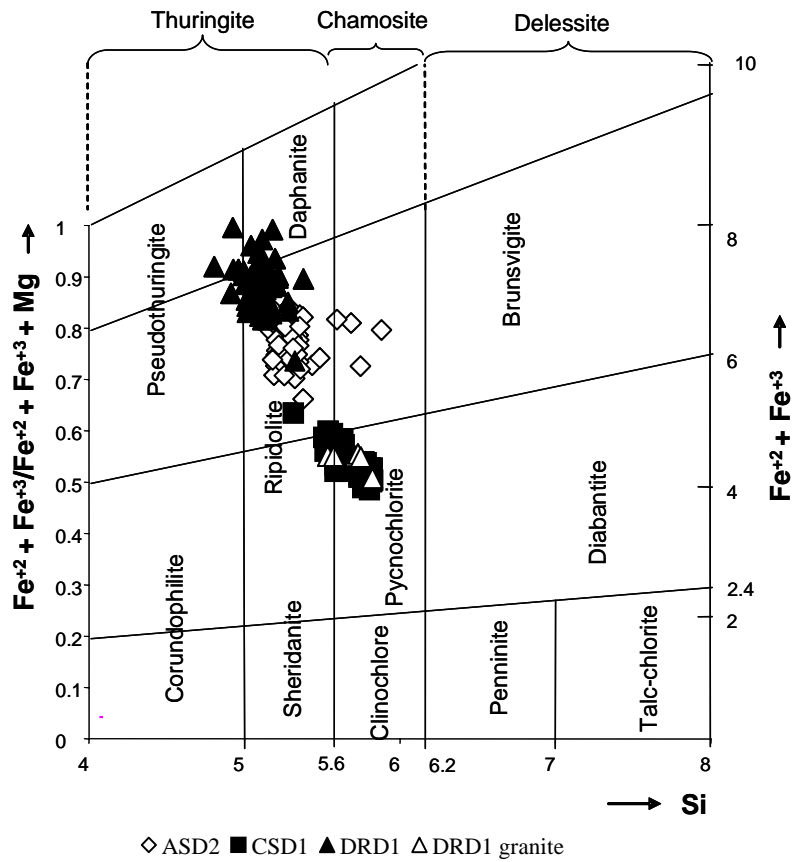


Figure III. 33: Nature of chlorites of Cariewerloo in the diagram of Hey (1954).

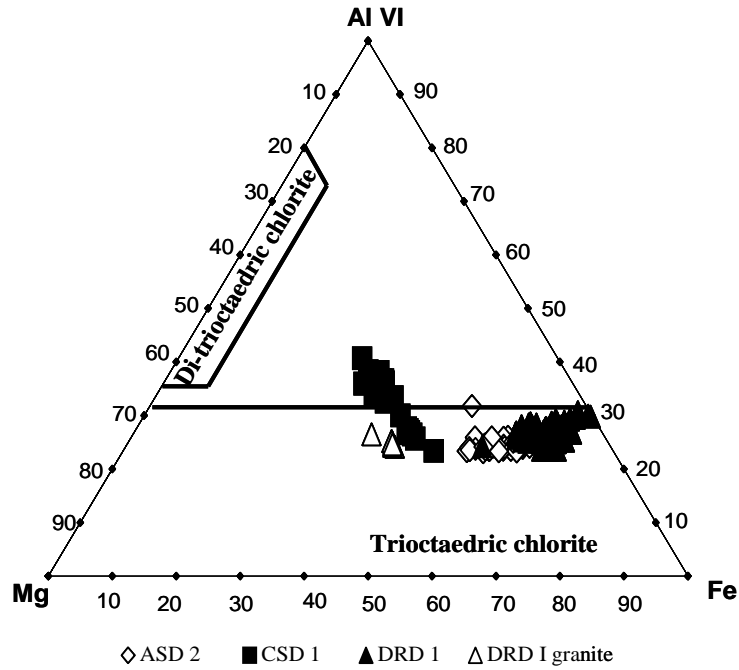


Figure III. 34: Classification of chlorites of Cariewerloo in triangular diagram Al (VI)-Mg-Fe (Chlorites of Athabasca in *Lorilleux, 2001*).

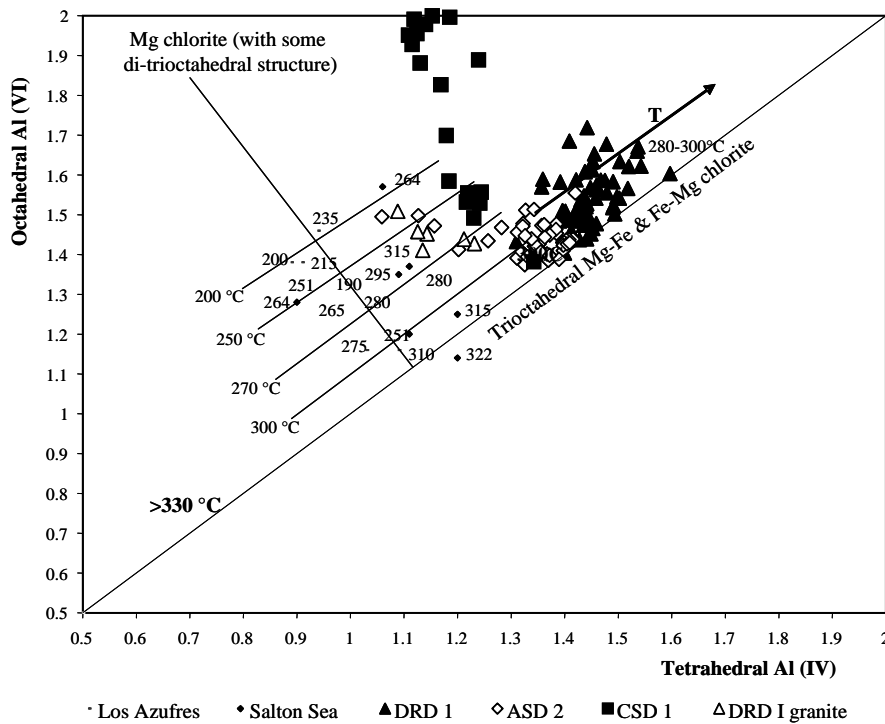


Figure III. 35: Diagram Al (VI)-Al (IV) applied on studied chlorites in the Cariewerloo samples.

## 7. Fluid inclusions study

Fluid inclusions have been studied in diagenetic quartz which cements the sandstones of the samples located at the depths of -646 m in CSD 1 and -800.65 m in ASD 2 drill holes.

### Petrography of fluid inclusions and microthermometry

Studied fluid inclusions are aqueous ( $L_w$ ) type.  $T_{m_{ice}}$  values are between  $-8$  and  $-15$  °C.  $T_e$  values are between  $-23$  and  $-54$  °C (Annexe III). Salinity is definitely lower than the salinities measured in the basins of Kombolgie and Athabasca ( $T_{m_{ice}}$  lower than  $-25$  °C corresponds to the Ca-dominated of the basin of Kombolgie, *Derome et al., 2003*).

The distribution of homogenisation temperatures defines three groups of fluids (Fig. III. 36):

- i. Fluid inclusions 1, with temperatures of homogenisation of  $\sim 160$  °C.
- ii. Fluid inclusions 2, with temperature of homogenisation of  $\sim 200$  °C.
- iii. Fluid inclusions 3, with temperature of homogenisation of  $\sim 340$  °C.

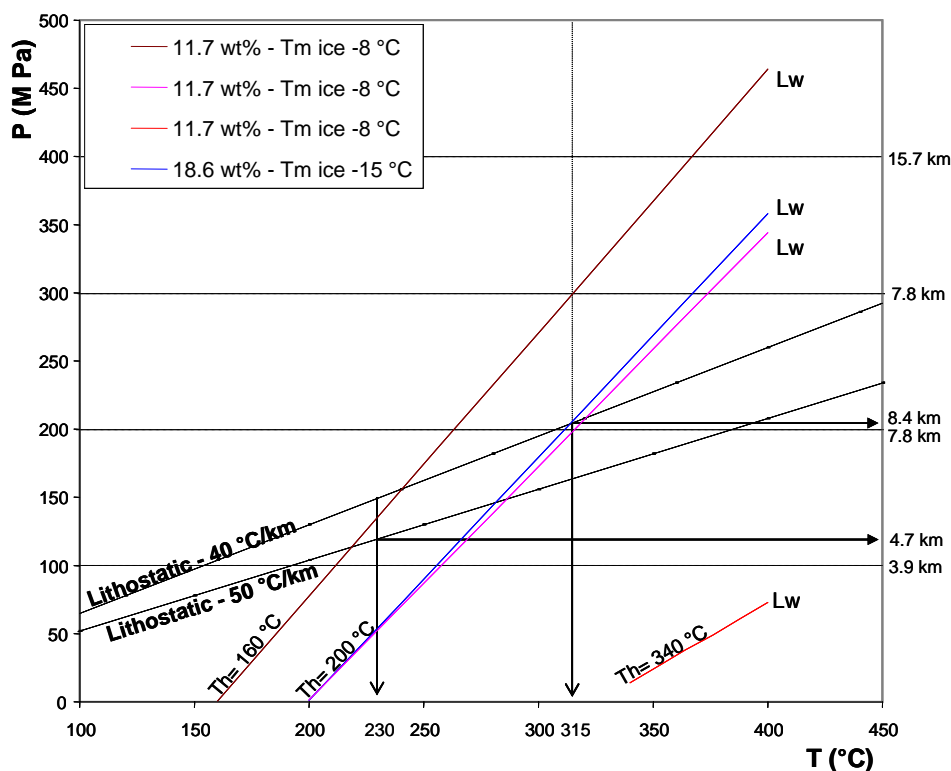


Figure III. 36: Isochores of the different types of fluid inclusions found in the diagenetic overgrowths of detrital quartz from the Cariewerloo basin.

For temperatures of  $230 - 315$  °C, estimated from chlorite thermometry, the corresponding pressures for the first two families of inclusions are  $150$  to  $215$  MPa, corresponding to depths

of burial from 5.9 to 8.4 km in lithostatic pressure conditions and to regional geothermal gradients of 40 to 50 °C/km. Such depths are comparable or slightly higher than those estimated for the Kombolgie and Athabasca basins. On the other hand, the isochores corresponding to the highest temperatures (340 °C) can only correspond to a late thermal event with low pressure, which can be connected to the emplacement of the Gairdner basic seams which are very abundant in the basin of Cariewerloo and emplaced at a late period (1100 - 1015 Ma) when the basin was probably already partly eroded.

## 8. Discussion and conclusions

### 8.1. Nature of the clastic material and conditions of sedimentation

The sediments of the Cariéwerloo basin are overall much poorer in quartz than the siliciclastic formations of the reference highly mineralized basins of the Athabasca (Canada) and Kombolgie (Australia). Cariéwerloo sediments still contain potassic feldspar and sometimes plagioclase and are also richer in clays. The conglomerates are frequently polymict, whereas they are essentially monomictic in the Athabasca. Thus, these sediments are deriving from less deeply weathered source rocks. 70 – 80 % of the clasts of the conglomerates, detrital quartz and feldspar grains are rounded. The remaining part, being angular, indicates a relatively shorter transport distance and/or more active tectonic activity during the sedimentation than Athabasca and Kombolgie basins. The main clay minerals are illite and then kaolinite. Chlorites corresponding to chamosite, ripidolite and brunsvigite are abundant in the matrix of unit I (close to the unconformity) and in unit IV as rosettes between grains, or replacing rounded unidentified minerals. Thus, chlorite appears to be the last mineral to crystallize in the sediments during late diagenesis.

Faulting is quite developed in the basin and corresponds to steeply dipping faults, breccia zones with strong hematitization and illitisation (especially units I and IV).

The preserved thickness of the formation is highly variable, according to post-depositional faulting and differential erosion. The thickest known intersection reaches 950 m in drill hole DRD 1, along the eastern border of the basin. A thickness of 1600 m was interpreted from aeromagnetic near Mount Eba, to the north of the basin.

The great thickness of the siliciclastic formations, the relatively short distance of transport of the clastic material and the low sandstone maturity seems to result mainly from the active tectonic conditions during sedimentation and possibly in association with weakly hydrolysing paleoclimatic conditions in the source area.

### 8.2. Importance of diagenesis and permeability of the sediments

The first diagenetic process corresponds to the overgrowths around the detrital quartz grains in which hematite, chlorite and clay minerals are trapped. These overgrowths result from the dissolution of the detrital quartz grains under the pressure of the sedimentary pile. Locally, important silicifications decrease the permeability of these formations for post-diagenetic fluid circulations (only 10 % of the sedimentary pile, in different levels of units III and IV).

Generally, the argillaceous matrix crystallizes at the level of the grain boundaries. Clay minerals replace sometimes detrital feldspar grains. However, they are absent in the zones where early quartz overgrowths are developed. These rocks are sometimes cemented by hematite or carbonate (dolomite) which crystallized after the early quartz overgrowths and fill completely the initial porosity (at 791.3 and 810.1 m in unit IV, ASD 2 drill hole). The most permeable units of the Pandurra Formation are located in units I and IV, but represent only 10 to 20 % of them. **These evidences indicate that strong and long percolation of the fluids, during and after diagenesis, have not occurred in the major part of the basin.**

### 8.3. pH conditions

The presence in the coarse siliciclastic sediments, the most permeable, of a significant proportion feldspars still stable, mainly K-feldspar (but not as abundant as in the Satakunta and Pasha Ladoga (*Lobaev et al., 2005*) basins) associated with illite, has conferred more alkaline pH conditions for the diagenetic and/or hydrothermal fluids in equilibrium with this paragenesis compared to the mineralized basins of the Athabasca and Kombolgie for which a kaolinite-illite paragenesis is observed. **Near neutral pH conditions are much less favorable for uranium solubility, because the U solubility curves have their lowest values for neutral pH conditions.**

### 8.4. Redox conditions

During sediment deposition and diagenesis, strongly oxidizing conditions are indicated by hematite located around the detrital quartz grains overgrowths and disseminated within the matrix, conferring a deeply brown-red colour to the entire sedimentary sequence. The red regolithic-type alteration developed in the metamorphic and volcanic basement below the unconformity, represent also a possible evidence for the interaction of the basinal oxidized brines with basement rocks.

The presence of anhydrite (sulphate) in fractures of unit IV also indicates the infiltration of oxidized evaporite derived brines during late diagenesis.

But, bleaching **has been locally observed in units I, III and IV** (PY 1 - CSD 1 - ASD 2 - DRD 1 drill holes), but globally tends to decrease towards the unconformity. Remarkable vertical zones with important alteration (bleaching) are observed in unit I. **This reflects the circulation of reduced fluid**, necessary to be able to leach hematite from the sandstone) after diagenesis.



The absence of dravite and sudoite, and the new formation of diagenetic Fe-rich chlorites also indicate more reducing conditions during alteration.

Other evidences of reducing conditions during late diagenesis or hydrothermal alteration, but much more localized, are given by the presence of:

- a black carbonaceous globule observed a gritstone of formation IV, similar to the globules described in the vicinity of the unconformity related uranium deposits from Saskatchewan,
- and the presence of pyrite, chalcopyrite and pyrrhotite in formation IV, associated with grains of carbonate and sulphates (sometimes replaced by sulphurs) in fractures or disseminated in the rock.

a favorable indication for the formation of uranium mineralization.

The strongly oxidized character with the whole lithologic succession, its important thickness (probably > 1000 m) and the reddening of the basement below the unconformity, show that **the siliciclastic formations have represented a huge reservoir of oxidized fluids which has to some extent percolated into the basement.** Such fluids may have been able to mobilize uranium. Despite the presence of anhydrite, indicating infiltration of evaporitic brine, the salinities of the diagenetic fluids, determined from fluid inclusion study, remain much lower than in the Athabasca and Kombolgie basins. It is possible that the infiltration of the evaporitic brines in the Cariewerloo has been only locally and relatively late in the diagenetic process, as shown by the occurrence of anhydrite in fractures and to be able to be preserved in the sediments.

**Besides evidences of the circulation of a reduced fluid during late diagenesis or a hydrothermal event (bleaching, organic matter, sulfides) in relation with a structural reactivation is a favorable indication for the possible reduction of U.**

### 8.5. Evidence of evaporites

Fractures filled by carbonates and anhydrite have been observed in the unit IV of the Pandurra Formation. They represent infiltration of fluids derived from an evaporitic sequence which may have been present above the siliciclastic formations, but presently eroded. In fact brine type fluid inclusions with high eutectic melting temperatures (-40 to -50 °C) indicate the presence of diagenetic brines rich in calcium as observed in the Athabasca and Kombolgie basins and probably correspond to an evaporite derived fluid trapped as fluid inclusions, but with much lower salinities according to ice melting temperature in analyzed fluid inclusions.

### 8.6. P-T conditions of the thermal events

Temperatures estimated from the composition of the newly formed chlorites vary from 230 to 315 °C. Temperatures measured in fluid inclusions define three groups of fluids: 160, 200 and 340 °C. It is noticed that these temperatures estimation are higher than those of Athabasca (150 to 200 °C) and Kombolgie ( $150 \pm 15$  °C) basins, estimated from fluid inclusions for the diagenetic event. The corresponding pressures for the first two families of inclusions (160 and 200 °C) are 150 to 215 MPa, corresponding to depths of hiding from 5.9 to 8.4 km in conditions of lithostatic pressure and for regional geothermic gradients from 40 to 50 °C/km. Such depths are comparable with those estimated for the Kombolgie and Athabasca basins. On the other hand, the isochors corresponding to the highest temperatures (340 °C) can correspond only to a late low pressure thermal event which can be connected to the emplacement of the Gairdner basic seams intrusions, very abundant in the Cariewerloo basin .

### 8.7. Evidence of hydrothermal alteration

The hydrothermal alteration event is accompanied by significant dissolution of the clastic minerals (feldspar, hematite and quartz), neoformation of chlorite (chamosite, ripidolite and brunsvigite) and carbonates, and subsequent intensive (unit I in PY 1 drill hole and unit III and IV in CSD 1 drill hole), bleaching and sulfidization (pyrite, pyrrhotite, and chalcopyrite) of the sandstone. Such features may reflect the percolation of a fluid more reduced than the diagenetic one and favorable for the precipitation of a uranium mineralization.

The third generation of fluid with temperatures of 340 °C represents a fluid circulation having occurred at high temperature and low pressure possibly related to the late emplacement of the widespread Gairdner basin dykes at 827 Ma.

### 8.8. Diagenetic/hydrothermal alteration of accessories

All Th/La ratios are lower than 1 (0.75 maximum) indicating a moderate leaching of light rare earth elements, therefore a weak alteration of monazite, and consequently a weak mobilization of the potential sources of uranium in sandstones. Only one sample shows a Th/La ratio lower than 0.2, indicating the possible aluminophosphate-sulphate neo-formation deriving from monazite alteration, but this mineral has not been observed.

All whole rock Zr/Y ratios are low (lower than 20) and in agreement with the evidences of alteration observed in the zircons crystals with enrichments in Al, P, Ca, U and Y, but in such immature basin may reflect the presence of other Y-bearing minerals. **U-enrichments up to 1.4 wt % more or less correlated with the strong P substitution (up to 8 wt%) both**

**observed in the altered zircon confirm that a certain amount of U has been liberated from the alteration of the detrital monazite crystals and trapped in the zircon structure.**

### **8.9. The basin and/or basement as a uranium source**

The relatively high abundance of uranium-bearing accessory minerals, in the Cariewerloo basin is given by the high concentrations of Th (from 4 to more than 100 ppm Th,  $m = 17$  ppm for  $n = 46$ ) and LREE for monazite (31.8 to 679.5 ppm), Zr for zircon (54.9 to 947.3 ppm), Y (4.5 to 82.9 ppm) and HREE (2.9 to 45.5 ppm) for xenotime and Nb-Ta (1.1 to 35 ppm) for niobotantalates. These data indicate the much higher abundance of accessory minerals than in the Athabasca and Kombolgie basins with, for example, only 9 ppm Th ( $n = 264$ ) and 7 ppm Th ( $n = 122$ ), respectively and in average.

As a consequence, total uranium contents are also much higher ( $m = 3.5$  ppm) than those measured in the zones far away from uranium mineralization of the Athabasca basin where those are always lower than 1 ppm, but vary largely (0.8 to 14.5 ppm U). Most samples show Th/U ratios close to the crustal mean ( $\text{Th/U} = 4$ ), which indicate the absence of an overall significant uranium depletion. However, some high Th/U ratios (up to 31) indicate that uranium was significantly leached in approximately 20 % of samples. Some samples (5 over 46) show an important enrichment in U (up to 8-14.4 ppm) and with Th/U ratios down to 1. The absence of overall significant uranium depletion in the basin by the oxidized diagenetic and/or hydrothermal fluids is also indicated by the fact that half of the samples have still more than 50 % of mobile uranium. This may also reflect, for some samples, the local addition of uranium during a late diagenetic to hydrothermal event. The moderate leaching of uranium from the siliciclastic formations of the Cariewerloo basin is also explained by the presence of more abundant clay minerals than in the Athabasca basin which may retain uranium adsorbed at their surface.

The moderate alteration of monazite (indicated by the samples with moderately high Th/La ratios) represents a further indication of a moderate liberation of uranium from possible source lithologies. However, the detrital zircons present an important alteration similar to that observed in the Athabasca and Kombolgie basins, with large substitution of U and P into its structure, evidencing the interaction of the diagenetic brines with monazite and zircon.

**The overall moderate fluid circulations within the basin is further corroborated by the rarity of basin shaped HREE patterns in the Cariewerloo sediments which represent a nearly systematic feature of the Athabasca basin sandstone.**

### 8.10. Nature and favourability of the basement lithologies as uranium sources

The basement mainly composed of the highly potassic calcalkaline Gawler Range Volcanics, most of them being enriched in uranium together with thorium and potassium, just below the unconformity in a large part of the Cariewerloo basin, and the evidence of red regolith alteration (with hematitization and chloritization) developed at the expense of the volcanics, both represent favourable features for the mobilization of significant amounts of uranium from these sources during diagenesis or hydrothermal events.

Fractures parallel to schistosity, in Mangalo Schist Formation in the Itiledoo Basin, sometime coated with graphite (*Bruneton, 2005*), may represent equivalent of the graphite bearing structures controlling the location of the uranium deposits in the Athabasca and Kombolgie basins.

Despite the highly oxidized character of the siliciclastic sequence, its important thickness, the evidence of brine infiltration and of late diagenetic to hydrothermal fluid circulation with saline, relatively hot fluids and of local bleaching and uranium leaching, a large part of the evidences given above (low permeability due to an important clay content, the good preservation of K-feldspar implying more alkaline pH conditions for the fluids in equilibrium with, high total and mobile U contents, near crustal average Th/U ratios, moderate Th/La ratios, scarcity of the holmium anomaly, lower salinity of the diagenetic fluids, the limited bleaching of the sediments) indicates that **the diagenetic fluids were much less aggressive and the fluid circulations were less intense (aquitar-like behaviour) than in the strongly mineralized basins of Athabasca or Kombolgie**. The initial uranium content of the sediments seems to have been essentially preserved except in some very limited more permeable layers. **Locally favourable conditions have existed, but their regional distribution seems to be much too limited and is not particularly focussed at the base of the basin as in Australia. The general characteristics of the Cariewerloo basin are more akin with those of the weakly mineralized Pasha Ladoga in Russia** (*Lobaev, 2005*).

**REFERENCES**

- Bruneton, P., (2005). Geological Reassessment of the Cariewerloo basin, South Australia. *Report*. 43 P.
- Cowley, W.M., (1991). The Pandurra Formation. *South Australia. Department of Mines and Energy, Report Book*, 91/7.
- Cowley, W.M., (1993). Cariewerloo Basin. In Drexel, J.F., Priess, W.V. & Parker, A.J. (eds) *The Geology of South Australia, Volume 1, The Precambrian*, P. 139 - 142.
- Creaser, R.A., and White, A.J.R., (1991). Yardea Dacite; large-volume, high-temperature felsic volcanism from the middle Proterozoic of South Australia. *Geology*, V. 19, P. 48 - 51.
- Creaser, R.A, and Cooper, J.A., (1993). U-Pb geochronology of middle Proterozoic felsic magmatism surrounding the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag and Moonta Cu-Au-Ag deposits, South Australia. *Economic Geology*, V. 88, P. 186 - 197.
- Cuney, M. & Mathieu, R., (2000). Extreme Light Rare Earth Element mobilization by diagenetic fluids in the geological environment of the Oklo natural reactor zones, Franceville basin, Gabon. *Geology*, V. 28, P. 743 - 746.
- Cuney M, Brouand M., Cathelineau M., Derome D., Freiburger R., Hecht L., Kister P., Lobaev V., Lorilleux G., Peiffert C., Bastoul A., (2003). What parameters control the high grade – large tonnage of the Proterozoic unconformity related uranium deposits? Abstracts in the International conference «Uranium Geochemistry – 2003: Uranium deposit, natural analogs, environment». Nancy, France, P. 123 – 126.
- Daly, S. J., Fanning, C. M., and Fairclough, M. C., (1998). Tectonic evolution and exploration potential of the Gawler Craton: *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, V. 17, P. 145 - 168.
- Debon, F., and Le Fort, P., (1983). A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations, V. 73, P. 135 - 149.
- Debon, F., and Le Fort, P., (1988). A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: principles, method, applications. *Bulletin de Minéralogie*, V. 111, P. 493 - 510.
- Foster, M. D., (1962). Interpretation of the composition and classification of the chlorites. U. S. Geological Survey Professional Paper 414-A, 33 P.
- Hey, M., H., (1954). *Min. Mag.*, V. 30, 277 P.

- Kister, P., (2003). Mobilité des éléments géochimiques dans un bassin sédimentaire clastique, du Protérozoïque à nos jours: le bassin Athabasca (Saskatchewan, Canada). Unpub. Ph.D. thesis. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 331 P.
- Lobaev, V., Cuney, M., Bylinskaya, L., Kharlamov, M., Polekhovsky, Y., (2005). Alteration of zircon and monazite in the Riphean clastic sediments and their host rocks of the Karku unconformity-type uranium deposit example, Pasha – Ladoga basin, Russia. Proc Int IAEA Symp., Vienna, June 21-24.
- Lobaev, V., (2005). PhD thesis. Henri Poincaré, Nancy I, 326 P.
- Lorilleux, G., (2001). Les brèches associées aux gisements d'uranium de type discordance du bassin Athabasca (Saskatchewan, Canada). PhD thesis. INPL, Nancy, 319 P.
- Mathieu, R., Zetterstrom, L., Cuney, M., Gauthier-Lafaye, F., and Hidaka, H., (2001). Alteration of monazite and zircon and lead migration as geochemical tracers of fluid paleocirculations around the Oklo-Okélonbondo and Bangombé natural reactor zones (Franceville basin, Gabon). *Chemical Geology*, V. 171. P. 147 - 171.
- Monier, G., (1985). Cristallochimie des micas des leucogranites, nouvelles données et applications pétrologiques. Ph.D. thesis. Université d'Orléans, 299 P.
- Poty, B., Leroy, J., and Jachimowicz, L., (1976). A new device for measuring temperatures under the microscope: The Chaixmeca microthermometry apparatus, *Bull. Soc. Franc. Mineral. Cristallogr.*, V. 99, P. 182 – 186.
- Velde, B., (1977). Clay and clay minerals in natural and synthetic systems. Developments in sedimentology, 21, Elsevier, Amsterdam, 218 P.

---

*CHAPITRE IV*

*LES BASSINS DU BOUCLIER BALTIQUE*

---





## CHAPITRE IV

### LES BASSINS DE BOUCLIER BALTIQUE

---

#### Introduction

Les bassins sédimentaires sont parmi les plus grandes structures à la surface de notre planète et renferment les ressources les plus importantes en produits énergétiques tels que pétrole, gaz naturel, charbon, uranium et de nombreux autres métaux (*Kyser & Hiatt 2002*).

La plupart des gisements métalliques dans les bassins résultent de la circulation de fluides à un moment donné de leur histoire diagénétique et ceci parfois sur de très grandes distances. Au cours de cette migration, de nombreux échanges géochimiques se produisent en relation avec l'évolution diagénétique des lithologies contenant les aquifères (*Sverjensky, 1989*) ainsi qu'avec les formations du socle sous jacentes (*Derome & al., 2003; 2004*).

Les grès Mésoprotérozoïques intracontinentaux sont en particulier des roches hôtes très favorables au dépôt de l'U dans différentes régions du monde. Des minéralisations uranifères à très forte teneur sont situées à l'interface socle - couverture. Ce type de minéralisation n'est connu que depuis la découverte du gisement de Rabbit Lake en 1968. Les principaux districts producteurs sont d'âge Mésoprotérozoïque et localisés, dans les bassins du Saskatchewan (Athabasca, Canada) et d'Alligator River (Northern Territory, Australie).

Deux mécanismes principaux ont été proposés pour la formation des minéralisations uranifères associées à ces bassins:

- ❖ Mélange entre une saumure de bassin oxydante et un fluide de socle réducteur.
- ❖ Réduction de la saumure oxydante de bassin par interaction avec les lithologies riches en graphite et sulfures du socle.

Une meilleure compréhension des percolations fluides dans les bassins est primordiale non seulement pour appréhender l'évolution de la partie supérieure de la lithosphère mais également pour formuler des modèles génétiques et des stratégies d'exploration pour la recherche des gisements de matières premières. Les successions sédimentaires observées dans les bassins sont soumises au cours de leur enfouissement à une diagenèse croissante au cours de laquelle les assemblages minéralogiques initiaux subissent des rééquilibrages plus ou moins intenses. Chaque bassin suit une évolution qui lui est propre qui est fonction des assemblages minéralogiques initiaux, de l'intensité des circulations fluides diagénétiques et de

leur caractéristiques physicochimiques (*Kotzer & Kyser, 1994; Hiatt & al., 2000*). De plus, à la base des bassins, au voisinage avec le socle, des interactions très importantes peuvent se produire entre ces deux environnements à caractéristiques pétrogéochimiques contrastées (*Lorilleux & al., 2003; Derome & al. 2004; Kister & al., 2003*) et peut engendrer le dépôt de minéralisations telles que les minéralisations d'uranium associées aux discordances protérozoïques.

L'objectif de ce chapitre, est à partir des caractéristiques minéralogiques et chimiques du socle cristallin sous-jacent, des roches sédimentaires, et de l'évolution de celles-ci lors de la diagenèse et d'évènements hydrothermaux ultérieurs de définir la potentialité des bassins clastiques Mésoprotérozoïques de Satakunta et de Muhos en Finlande à pouvoir générer des minéralisations uranifères semblables à celles associées aux bassins de même âge de l'Athabasca au Canada et de Kombolgie en Australie.

---

## TABLE OF CONTENT

TABLE OF FIGURES .....	152
ARTICLE III.....	155
Mineralogy, geochemistry and diagenetic evolution of the continental clastic Proterozoic basins. The example of the Jotnian in the Fennoscandian shield. Implications on the genesis of unconformity related U- deposits .....	155
Abstract.....	155
1. Introduction.....	157
2. Methodology .....	158
3. Geological setting.....	160
4. Characteristics of the basement .....	163
5. Characteristics of the sediments .....	165
6. Sandstone geochemical characteristics .....	173
Zircon in the Satakunta basin .....	177
Monazite in the Satakunta basin.....	182
7. Cristallography of argillaceous minerals .....	183
8. K - Ar analyses on potassic feldspars .....	188
9. Fluid inclusions (FI) study.....	188
10. Discussion and conclusions .....	190
10.1. Characteristics of the diagenetic evolution of the sediments.....	190
10.2. Degree of maturity of the sediments .....	191
10.3. pH conditions .....	191
10.4. Redox conditions .....	191
10.5. P-T conditions of the thermal events .....	192
10.6. Evidence of hydrothermal alteration.....	192
Perspectives.....	193
REFERENCES.....	194

## TABLE OF FIGURES

Figure IV. 1: Simplified geological map of Finland highlighting the Mesoproterozoic Phanerozoic rock units ( <i>Kohonen and Rämö, 2005</i> ). .....	161
Figure IV. 2: Geological map of the basin of Satakunta. 1-sandstone, 2-diabase 1260 ± 10 Ma, 3-rapakivi granite, 4-Paleoproterozoic rocks. (Geological Survey of Finland: GTK). .....	162
Figure IV. 3: Geological map of the basin of Muhos. (Geological Service of Finland: G T K). Position of the drill cores (Tupos 001, MH39-001 and R 03). .....	163
Figure IV. 4: biotite and muscovite (R01/30 m); micaschists with plates of graphite in the micas (R06/39.50 m). Pegmatoid (R06/34.70 m). Iron oxides underline cleavages of white mica (R06/34.70). .....	164
Figure IV. 5: In Pori 1 drill hole, detritic micas at 619.00 m, sericitic/hematitic plages in Satakunta sandstone (219.50, 324.80 and 479.20 m). .....	166
Figure IV. 6: Laumontite between detritic grains (Pori 1/401.80 m), calcic matrix around detritic grains of quartz (Pori 1/236.50 m), microconglomerate with accessory minerals (especially zircon) (Pori 1/31.50 m). .....	167
Figure IV. 7: Silicified sandstones with overgrowths in Satakunta (Pori 1 drill hole). ..	168
Figure IV. 8: Concentrations of accessory minerals in Satakunta sandstone (Pori 1 drill hole). .....	169
Figure IV. 9: disseminated accessory minerals in Satakunta sandstone: tourmaline (236.50 - 324.80 m), titanite (249 & 424.25 m), monazite (236.50 m), zircon (324.80 m). .....	170
Figure IV. 10: In Muhos basin, silicified sandstone with overgrowths (R 03 drill hole / 85.50 and 54.10 m). Disseminated accessory minerals in sandstone and siltstone of Muhos: anatase-R03/85.50 m, titanite-Tupos1/975.00 m, tourmaline and monazite-R03/85.50 m. .....	171
Figure IV. 11: Neoformations of titanite and allanite on detrital rounded titanite and epidote in the Satakunta sandstones; drill core Pori 1. .....	172
Figure IV. 12: Mineral paragenesis established in the Satakunta sandstones. The diagram represents successively detritic minerals deposition, diagenesis or metamorphism stages. ....	173

Figure IV. 13: Satakunta and Muhos sediments in the quartz – peraluminous index diagram.....	174
Figure IV. 14: Satakunta and Muhos sediments in the feldspars – clays – micas diagram. ....	175
Figure IV. 15: Satakunta and Muhos sediments in a Na/Al – K/Al diagram. ....	175
Figure IV. 16: Normalisation of trace elements of the sandstones of Satakunta and Muhos to the sandstones of Erica1 drill core (Athabasca). ....	176
Figure IV. 17: Th-U diagram for the sediments of Muhos (ringed symbols) and Satakunta. ....	178
Figure IV. 18: Th-La diagram for the sediments of Muhos and Satakunta. ....	178
Figure IV. 19: K - Rb diagram for the sediments of Muhos and Satakunta. ....	179
Figure IV. 20: Spectra of rare earth elements of sediments of Satakunta and Muhos basins Normalized to chondrites.....	179
Figure IV. 21: Zr - Y diagram for the sediments of Muhos and Satakunta. ....	180
Figure IV. 22: Evolution of Th/La, Th/U, Zr/Y ratios and $\sum$ REE, $Ho_{(N)} / Ho^*$ , Th, U values with depth in Pori 1 drill core. ....	180
Figure IV. 23: Substitution of Zr + Si + Hf by P + Ca + Fe + Y + U in zircons from the sandstone of Satakunta. ....	181
Figure IV. 24: Substitution of Zr + Si + Hf by U in zircons from the sandstone of Satakunta. ....	182
Figure IV. 25: Substitution of P + REE by Si + Ca + Th + U + Y in detrital monazites from the conglomerates of R1 and R6 drill holes of Satakunta basin.....	183
Figure IV. 26: Classification of white micas of Satakunta and Muhos in a diagram Si – Al - (Fe + Mg) ( <i>Monier, 1985</i> ). ....	184
Figure IV. 27: Characterization of types of micas in the diagram of <i>Velde (1977)</i> .....	184
Figure IV. 28: Nature of chlorites of Satakunta and Muhos in the diagram of <i>Foster (1962)</i> . ....	185
Figure IV. 29: Classification of chlorites of Satakunta and Muhos in triangular diagram Al (VI)-Mg-Fe, (Chlorites of Athabasca in <i>Lorilleux, 2001</i> ). ....	186
Figure IV. 30: Diagram Al (IV)-temperature of crystallization applied on chlorites of Satakunta and Muhos.....	186

Figure IV. 31: Diagram Al (VI)-Al (IV) applied on studied chlorites in the Satakunta and Muhos samples. ....	187
Figure IV. 32: Diagram Al versus (Ti + Fe + Y + Ce + Nd) for detrital titanites and their overgrowths in the sandstones of Satakunta. ....	187
Figure IV. 33: Fluid inclusions in the overgrowths of Satakunta sandstone. ....	189
Figure IV. 34: Isochore of the inclusion fluids found in diagenetic overgrowths of detrital quartz of Satakunta basin. ....	190

**ARTICLE III****Mineralogy, geochemistry and diagenetic evolution of the continental clastic Proterozoic basins. The example of the Jotnian in the Fennoscandian shield. Implications on the genesis of unconformity related U- deposits**

**Ahlam IBRAHIM<sup>a</sup>, Michel CUNEY<sup>a</sup>, Marc BROUAND<sup>a</sup>, Claude CAILLAT<sup>b</sup>, Olli AIKAS<sup>c</sup>**

<sup>a</sup>G2R, Nancy-Université, CNRS, BP 239, 54506, Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>b</sup>AREVA, BU Mines, BP4, 78141, Velizy Villacoublay, Cedex, France

<sup>c</sup>Geological Survey of Finland, P.O. Box 1237, FIN - 70211 Kuopio, Finland

**Abstract**

The Satakunta and Muhos basins in Finland represent intracontinental clastic Mesoproterozoic basins unconformably overlying a Paleoproterozoic metamorphic basement, a situation similar to other sedimentary basins associated with unconformity related U ore deposits (Athabasca basin, Canada; Kombolgie basin, Australia; Pasha-Ladoga basin, Russia).

The study of 56 samples from 6 different boreholes has shown that the sediments of the Satakunta and Muhos basins are characterized by an extreme immaturity, a strong oxidation, as well as a high temperature diagenesis or metamorphism ( $\geq 300$  °C). The stability of K - feldspar, plagioclase, titanite and epidote in the sandstone indicates that the source area was subjected to limited pedogenic alteration, and the common angular shape of quartz that the sediments were transported over a short distance from the source area. These characteristics imply a very active tectonic context during sedimentation which is surprising for an anorogenic geotectonic period. Such characteristics are very different from those of the Athabasca and Kombolgie sediments, but closer to those of the Pasha-Ladoga basin. Fluid circulations in the sandstone were limited as shown by the good preservation of the detrital mineral paragenesis, the strong silicification of the sandstone especially in the Satakunta basin and the non depleted Th/U, Th/La and Ho<sub>(N)</sub>/Ho\* ratios in most samples. The K - feldspar - illite - quartz paragenesis indicates a higher alkalinity of the pH of the diagenetic fluid compared to uranium mineralized basins, which is less favorable for uranium solubility. The sandstones from both basins are slightly enriched in uranium,

especially at the base of the Muhos basin with Th/U ratios down to 1. Significant fluid circulations occurred at the basement roof, as shown by the presence of an argillaceous alteration below the unconformity. This alteration remains however moderate compared to that observed in the Athabasca and Kombolgie basins and basement. A lower temperature event (about 200 °C) is indicated by the new formation of laumontite in the sandstones from Satakunta. If the temperatures of about 300 °C deduced from neofomed minerals correspond to peak diagenetic conditions, this would mean an initially extremely thick basin (8.5 to 10 km) which may have covered all the basement of southern Fennoscandia. Globally, the favorability for the development of uranium mineralisation in both basins appears to be very limited, but their lateral extensions, presently eroded or located below the Bothnian sea, may have been more mature and permeable and thus more favorable for U transport and deposition.

Keywords: Satakunta, Muhos, Mesoproterozoic basins, unconformity related uranium deposits, sandstone maturity.



## 1. Introduction

Sedimentary basins are the largest structures on the surface of our planet and the most significant sources of the energy-related commodities, such as petroleum, natural gas, coal, uranium and many metals (*Kyser and Hiatt 2002*). Most of these metalliferous deposits are products of later fluid flow systems, at one time given from their diagenetic history and this sometimes at very long distances. During this migration, many geochemical exchanges occur in relation to the diagenetic evolution of lithologies containing the aquifers (*Sverjensky, 1989*) as in the formations of the underlying basement (*Derome et al., 2003; 2004*).

Uranium deposits are found throughout the world in a variety of geological environments. They can be grouped into 14 major categories based on geological setting (*OECD/NEA and IAEA 2002*).

The largest and richest uranium deposits are Mesoproterozoic in age, and located in the basins of Athabasca (Saskatchewan, Canada) and Alligator River (Northern Territory, Australia).

Mesoproterozoic intracontinental unconformity sandstone-hosted deposits (>33 % of the world resources in Canada and Australia) represent the most significant high grade, and low cost uranium resource currently being exploited on a worldwide basis (*Jefferson et al., 2005; Thomas et al., 2000*). This type of mineralisation is known only since the discovery of Rabbit Lake deposit in 1968.

The deposits of uranium in this category are formed following the interaction of the oxidizing fluids of the sedimentary cover and the formations of the basement (*Laverret, 2002*). Two principal mechanisms were proposed for the formation of the uranium associated to these basins:

- ❖ mixture between an oxidizing brine of basin and a fluid of reducing basement,
- ❖ reduction of the oxidizing brine of basin per interaction with lithologies rich in graphite and sulphides of the basement.

A better understanding of the fluid percolations in the basins is of primary importance, not only for understanding the evolution of the higher part of the lithosphere, but also for formulating genetic models and strategies of exploration of mineralization. The

sedimentary successions observed in the basins are subjected during their burying to an increasing diagenesis during which the initial mineralogical assemblages undergo more or less intense re-equilibrium. Each basin follows an own evolution, which is a function of the initial mineralogical assemblages of the intensity of diagenetic fluid circulations and their physico - chemical characteristics (*Kotzer and Kyser, 1995; Hiatt et al., 2000*). Moreover, at the base of the basins, at the vicinity of the basement, very significant interactions can occur between these two environments with contrasted petrogeochimic characteristics (*Lorilleux et al., 2003; Derome et al., 2004; Kister et al., 2003*) and can generate the deposit of mineralizations such as mineralisation of uranium associated with the Proterozoic unconformity.

The Satakunta and Muhos basins in Finland are Mesoproterozoic (Jotnian in Fennoscandia, Riphean in Russia) clastic basins unconformably overlying Paleoproterozoic metamorphic basements (Fig. IV. 1). These basins share similarities with the Athabasca (Canada) and Kombolgie (Australia) basins, which are associated with large unconformity-related uranium deposits. The aim of this study is to characterize the mineralogical and chemical characteristics of crystalline basement, sedimentary rocks, and their evolution at the time of the diagenesis and the later hydrothermal events, to evaluate the interest for uranium exploration, and to compare them to the mineralized basins. The samples for this study have been taken from existing drill cores stored at the Loppi drill core depot of the Geological Survey of Finland.

## 2. Methodology

In order to achieve these objectives, 45 samples were taken on 3 boreholes in the basin of Satakunta (Fig. IV. 2). Major drill hole PORI 60-1(M52) is localized in the deepest part of the basin. It recuts the majority of the formations of the basin. It reached 618.55 m without recutting the basement. 30 samples were taken with regular intervals. Two short boreholes (R1 of 30 m depth with 5 taken samples and R6 of 39.50 m depth with 6 taken samples) were selected on the western edge of the basin because they present coarser facies at the base of the basin and the formations of the basement below (they recut the unconformity at 30.00 m and 34.70 m, respectively).

In the basin of Muhos, 3 drill holes were selected according to a profile EW (Fig. IV. 3). The drill hole Tupos 001 located in the center of the basin reaches 992.4 m depth (depth to which it intersects the basement). 7 samples were carried out. The drill hole R 03 located at the north-west of the basin (Hailuoto) reached a depth of 122.90 m and intersects the basement at 109.35 m. 4 samples were taken there. Finally, drill hole MH39 - 001 located in the south east of the basin reached a depth of 523.70 m without intersecting the basement. 4 samples were taken there.

- The chemical composition of the sandstones and the basement rocks was determined on these samples using ICP - AES for major elements and ICP - MS for trace elements (CRPG, Vandœuvre-lès-Nancy, France).

- Interpretation of the chemical rock composition with main geochemical diagrams was acquired with “Litho geochemistry” software - version 1.0 beta (COGEMA CREGU, 2001, developer: Patrick Fratzak).

- Petrographic and mineralogical analysis of the rocks (66 polished thin sections) were observed through optical observation (transmitted and reflected light). It was possible to determine the nature of the initial detrital assembly and the succession of crystallizations during the diagenesis and the hydrothermal evolution. The nature of the no determinable microphases in optical microscopy and possible zonings of minerals were studied using a Scanning Electron Microscope (SEM) Hitachi S2500 Kevex (“Service Commun de microanalyse” of the Université Henri Poincaré, Vandœuvre-lès-Nancy, France).

-In order to characterize the various types of lithologies and the transfers of elements, the silicates were analyzed with a CAMECA SX-50 and 100 electron microprobe (EMP) at the “Service Commun d’analyse” of the Université Henri Poincaré (Vandœuvre-lès-Nancy, France). An electron beam focused over a surface of approximately 6  $\mu\text{m}^2$  was used (running primary: 10 nA, tension: 15 kV, diameter of beam: 1.5  $\mu\text{m}$ , time of counting: 10 s (peak), 5 s (background noise)). Analytical conditions for accessory minerals analysis were 20 nA, 20 kV for major elements and 100 nA, 30 kV for trace elements.

- Fluid inclusions in Satakunta basin were studied by CHAIX-MECA microthermometry, coupled with Labram (Dilor – Jobin Yvon) Raman microspectrometer (G2R laboratory-Nancy), in order to characterize the gas phases.

- K - Ar on potassic feldspars analyses were realized in the Argon Isotope Facility at the Scottish Universities Environmental Research Centre, East Kilbride, UK. Feldspars were separated in G2R laboratory by using:

- LST Fastfloat (contains hydrated sodium heteropolytungstates (80 wt %) in water; density = 2.82 g / mL),
- Bromoforme ( $\text{CHBr}_3$ ; density = 2.9 g/mL).

### 3. Geological setting

Most of Finnish bedrock is composed of Paleoproterozoic metamorphic and igneous of the Svecofennian Domain (*Paulamäki, 2002*). The long history of volcanism, sedimentation and igneous activity of the Svecofennian domain culminated in the Svecofennian orogeny (1.9 – 1.8 Ga ago; *Koistinen, 1996*). Later the crust was intruded by anorogenic rapakivi granites (1.65 – 1.54 Ga in age) with associated mafic dyke swarms. It is covered by the small Mesoproterozoic clastic basins. The two principal basins are those of Satakunta and Muhos. Other occurrences are known in the Fennoscandian shield (*Kohonen et al., 1993*).

The Jotnian of Satakunta has been preserved in NW-SE - trending graben structure formed by block movements over 100 km for a width of 20 km. The Satakunta sandstone is connected to the Bothnian Sea sedimentary basin, which is almost completely composed of Jotnian sandstone (*Axberg, 1980; Winterhalter et al., 1981*). The sandstone is predominantly subhorizontal, but in the north-eastern contact, the sandstone layers are dipping about 35° to the southwest, towards the centre of the basin. The depth of the basin would decrease by the SW towards until a faulted contact subvertical with the base (*Laurén, 1970; Elo, 1982*). No direct evidence of the thickness of the sandstone is available, but in a borehole Pori-1, it is at least 600 m. According to gravimetric studies, the maximum thickness could be to the NW of Pori about 1880 m (*Elo, 1976; 1982*). In the south-eastern part of the sandstone, the thickness is probably less than 200 m (*Elo et al., 1993*). Offshore, north-west of the town of Pori, the sandstone is interpreted to be underlined by marine continuation of the Pori rapakivi granite (*Korja et al., 2001*). The

sediments were deposited between 1570 Ma, age of the Laitila rapakivi granite (Vaasjoki, 1977) and  $1260 \pm 10$  Ma, age of the diabase sills crosscutting the basin (Suominen, 1991). The sedimentological features of the outcrops indicate a deposition in a continental fluvial environment (Marttila, 1969; Kohonen et al., 1993). These lithofacies are characterised by structureless fine-gravel conglomerates, trough-cross bedded, planar-cross-bedded, laminated, and massive-structureless sandstone, as well as horizontally laminated mud-and siltstone. The red colour of the sandstone is interpreted by Simonen and Kouvo (1955) to indicate a terrestrial oxidizing environment.

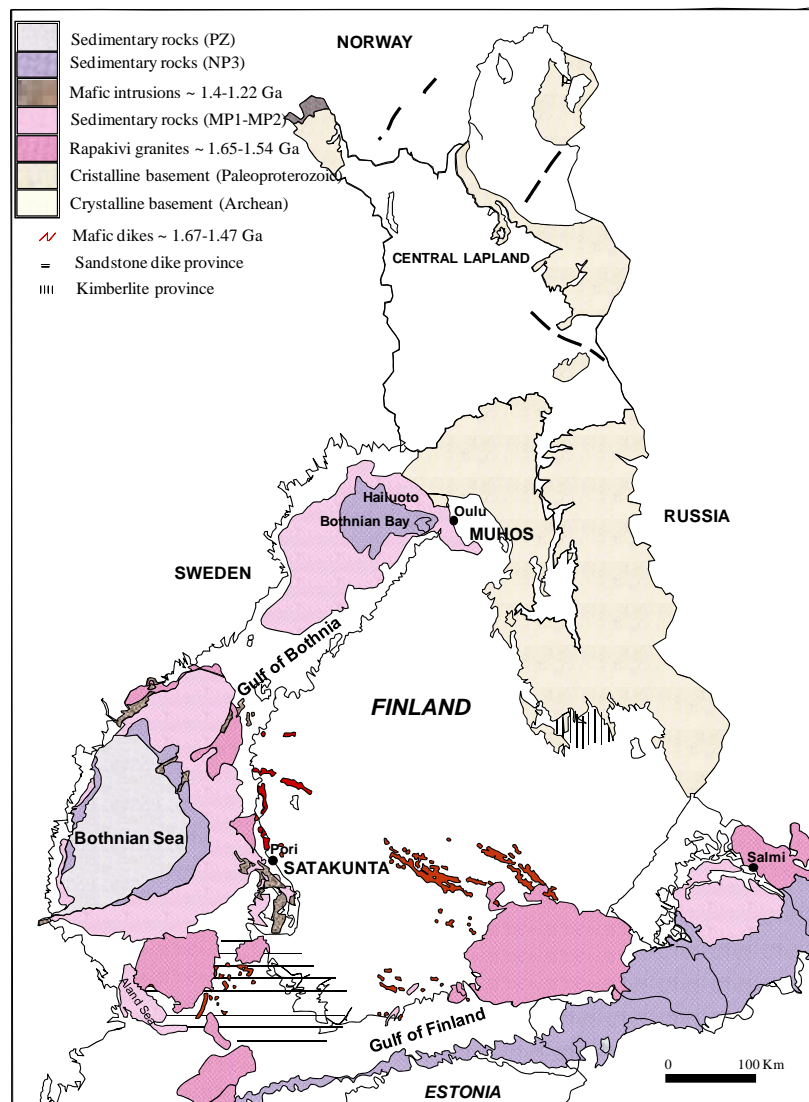


Figure IV. 1: Simplified geological map of Finland highlighting the Mesoproterozoic Phanerozoic rock units (Kohonen and Rämö, 2005).

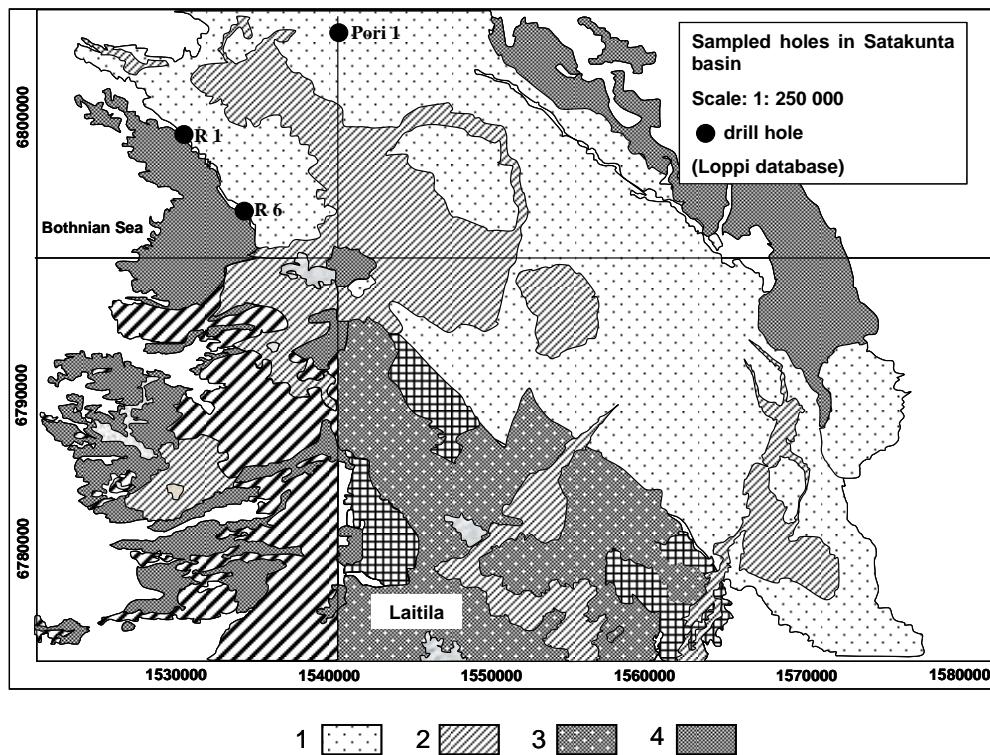


Figure IV. 2: Geological map of the basin of Satakunta. 1-sandstone, 2-diabase  $1260 \pm 10$  Ma, 3-rapakivi granite, 4-Paleoproterozoic rocks. (Geological Survey of Finland: GTK).  
 ● Position of the drill cores (Pori 1, R1 and R6).

The Muhos basin (MuF), localised at the NW of Finland, is elongated WNW from Muhos city to island Hailuoto. It also continues under the Bothnian Gulf (Fig. IV. 3). It is almost completely covered with quaternary deposits (*Kousa and Lundqvist, 2000*). It reaches 975 m in the Tupos 001 borehole. The formation of Muhos was correlated with the sandstones of Satakunta, on the basis of dating  $^{40}\text{K} - ^{40}\text{Ar}$ , of the micas, which indicates a diagenesis about 1300 Ma (*Simonen, 1960*). At present the age of the Muhos formation is estimated at 1300-1400 Ma on the basis of K - Ar and Rb - Sr dating (*Simonen, 1980*), but based on the biotype an age of about 1200 Ma would be more correct (*Tynni and Uutela, 1984*). In the western part of the Hailuoto Island the sediments have a thickness probably less than 300 m (*Veltheim, 1969*). The sedimentary succession on Hailuoto may be composed of two different units. The lower unit, lying directly on the metamorphosed Svecofennian bedrock, consists of conglomerates, red arkoses and red shales. The upper unit, deposited on the red shale, is composed of inter-fingering beds of arkoses,

sandstones, siltstones and shales. Thus, the lower unit can be correlated with the Muhos Formation (Veltheim, 1969). The upper unit, named the Hailuoto Formation (HIF), has been suggested to be Vendian, based on microfossil evidence (Tynni and Donner, 1980).

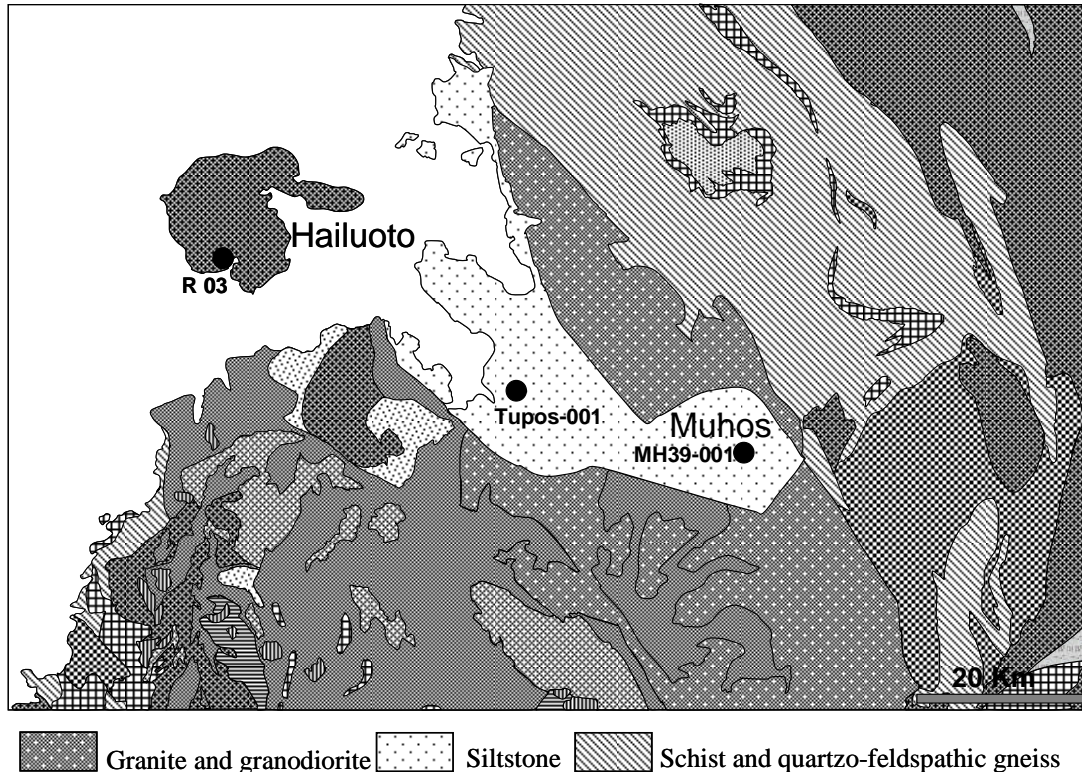


Figure IV. 3: Geological map of the basin of Muhos. (Geological Service of Finland: G T K). ● Position of the drill cores (Tupos 001, MH39-001 and R 03).

#### 4. Characteristics of the basement

The basement of the Satakunta basin, intersected by the studied drill cores, consists of graphitic schists in which plagioclase is sericitized and fibrous sillimanite is retrograded to muscovite. Biotite is chloritized and contains abundant graphite plates (Fig. IV. 4), monazite, zircon and anatase. Microperthites is argilized with pyrites in their cleavages. Calcite appears locally in fractures. Coarse pegmatoid (Fig. IV. 4) with entirely sericitized plagioclase and altered potassic feldspar; iron oxides are present between cleavages and in periphery of the micas.

The basement formations of the Muhos basin correspond to granites and mafic gneisses. The mafic gneisses are strongly altered to clay minerals. Biotite cleavages are underlined

by iron oxides. The granite is brecciated and cemented by adular, euhedral quartz and chlorite rosettes. Deformed biotite is chloritized. Zircon, pyrite and dioxides of titanium are frequent.

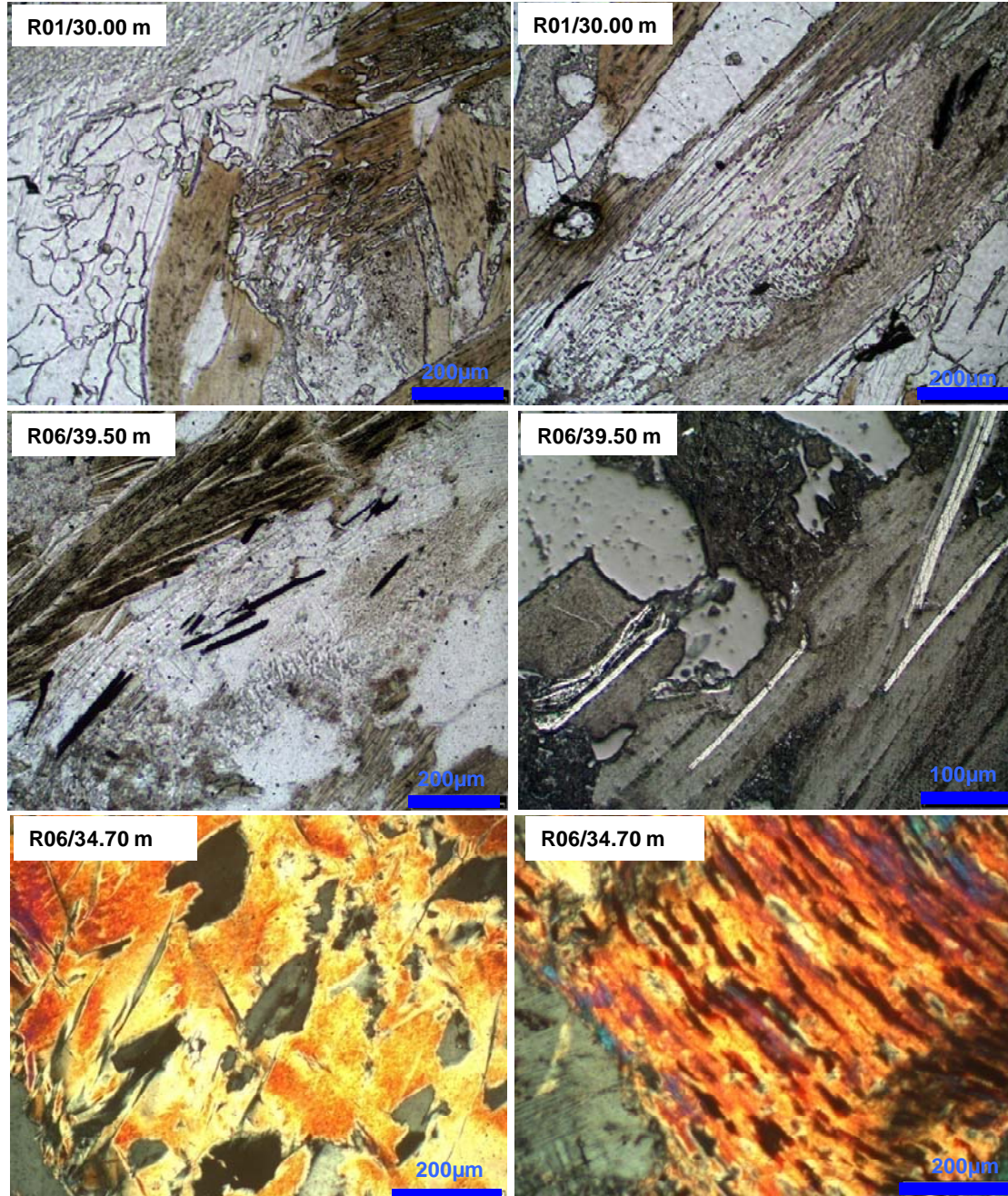


Figure IV. 4: biotite and muscovite in micaschist (R01/30 m) ; micaschist with graphite along micas cleavages (R06/39.50 m). Pegmatoid (R06/34.70 m) with iron oxides underlining the cleavages of white mica (R06/34.70).



## 5. Characteristics of the sediments

The Satakunta basin microconglomerates, mostly developed at the base, are followed by fine grained sandstones and siltites. Microconglomerates are polymict. Sandstones are fine grained, pink and red to violet red, rich in angular quartz, K - feldspar and plagioclase, poor in muscovite (Fig. IV. 5). Dark biotite-rich beds may underline cross bedding structures. Sandstones are cemented by laumontite (Fig. IV. 6), which crystallized after the early quartz overgrowths (Fig. IV. 7), filling porosity completely initial. It is often associated hematite. Detrital zircon, magnetite, monazite, tourmaline, apatite, rutile, epidote and titanite are abundant (Fig. IV. 8; 9).. Locally pyrite and chalcopyrite are observed in mica cleavages or between quartz grains. The silts are rich in angular quartz, feldspars and biotite, but muscovite is rare. The lower 50 m of the Pori 1 drill hole are bleached, with whitish silicifications and green chloritized zones.

In the Muhos basin reddish conglomerates, medium sized, well rounded, quartz and quartzite pebbles are more or less corroded in a hematite - rich argillaceous matrix. Sandstone grains close to the unconformity are microfractured (Fig. IV. 10). Then, brown siltstones, rich in angular quartz hosted by an abundant argillaceous seldom carbonated matrix, occur. The quartz grains may be corroded, by green chlorite spots. Carbonates and pyrite veinlets and pyrite nodules occur.

The main diagenetic event observed is the extremely strong silicification developed around the detrital quartz grains in the Satakunta basin, which is less important in the Muhos basin. Thus, the permeability of the Muhos basin was more important after diagenesis as also shown by the larger development of post-diagenetic alterations. Hematite is very abundant at the contact with the detrital grain and its abundance decreases in the quartz overgrowths, but sulphides may locally occur. Detrital feldspar grains have no overgrowths. But, overgrowths were observed around the detrital crystals of titanite and epidote in the Satakunta fine grained sandstone and siltites (Fig. IV. 11). Sometimes titanite is developed as cement around the other detrital accessory minerals.

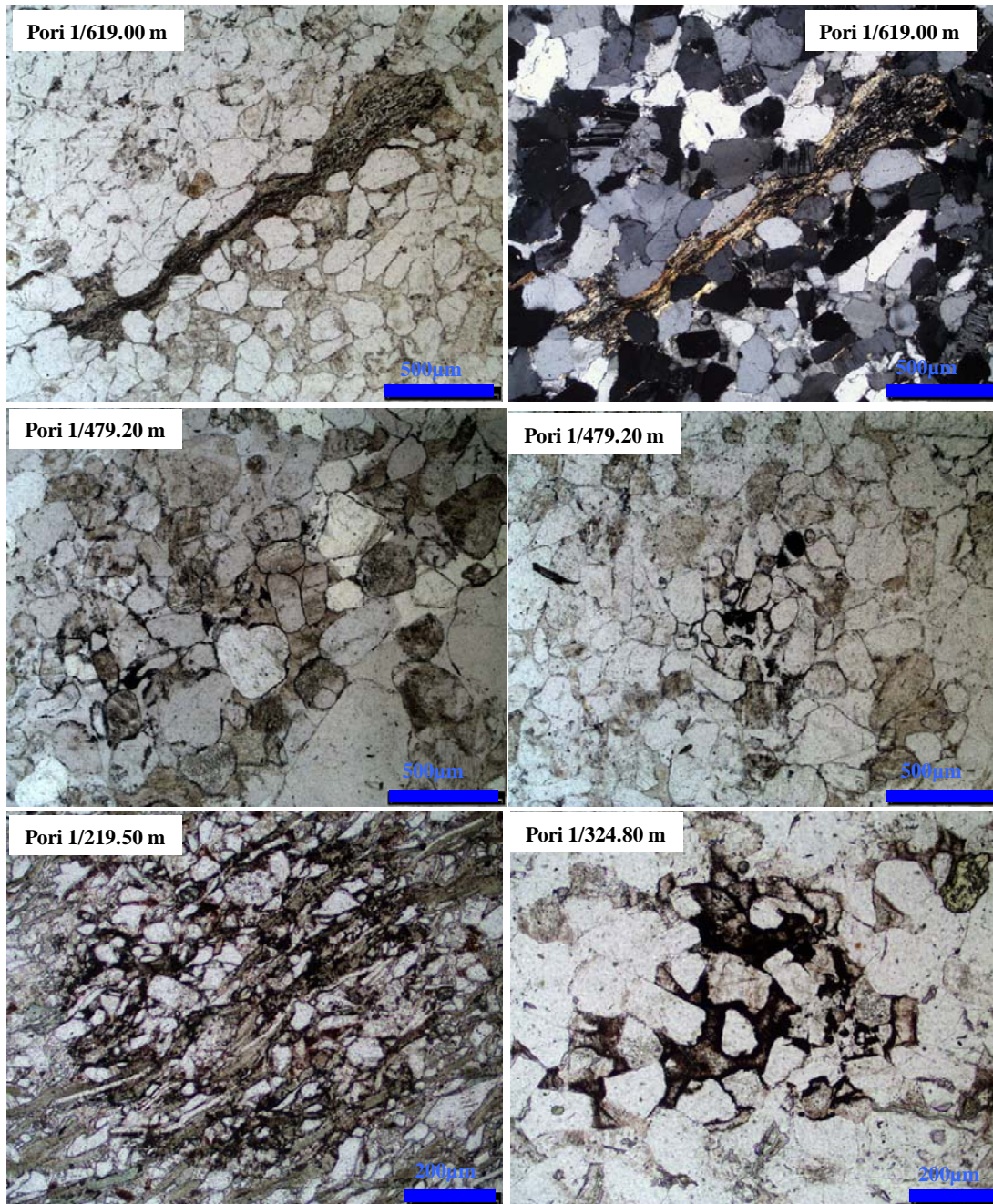


Figure IV. 5: Pori 1 drill hole: angular detritic quartz crystals detritic micas at 619.00 m in plain light (left) and with crossed nicols (right); 479,20m : sandstone with rounded quartz and feldspars ; 219.50 m : siltstone with angular quartz shards and micas; 324.80 sandstone with angular quartz and a sericitic/hematitic cement.

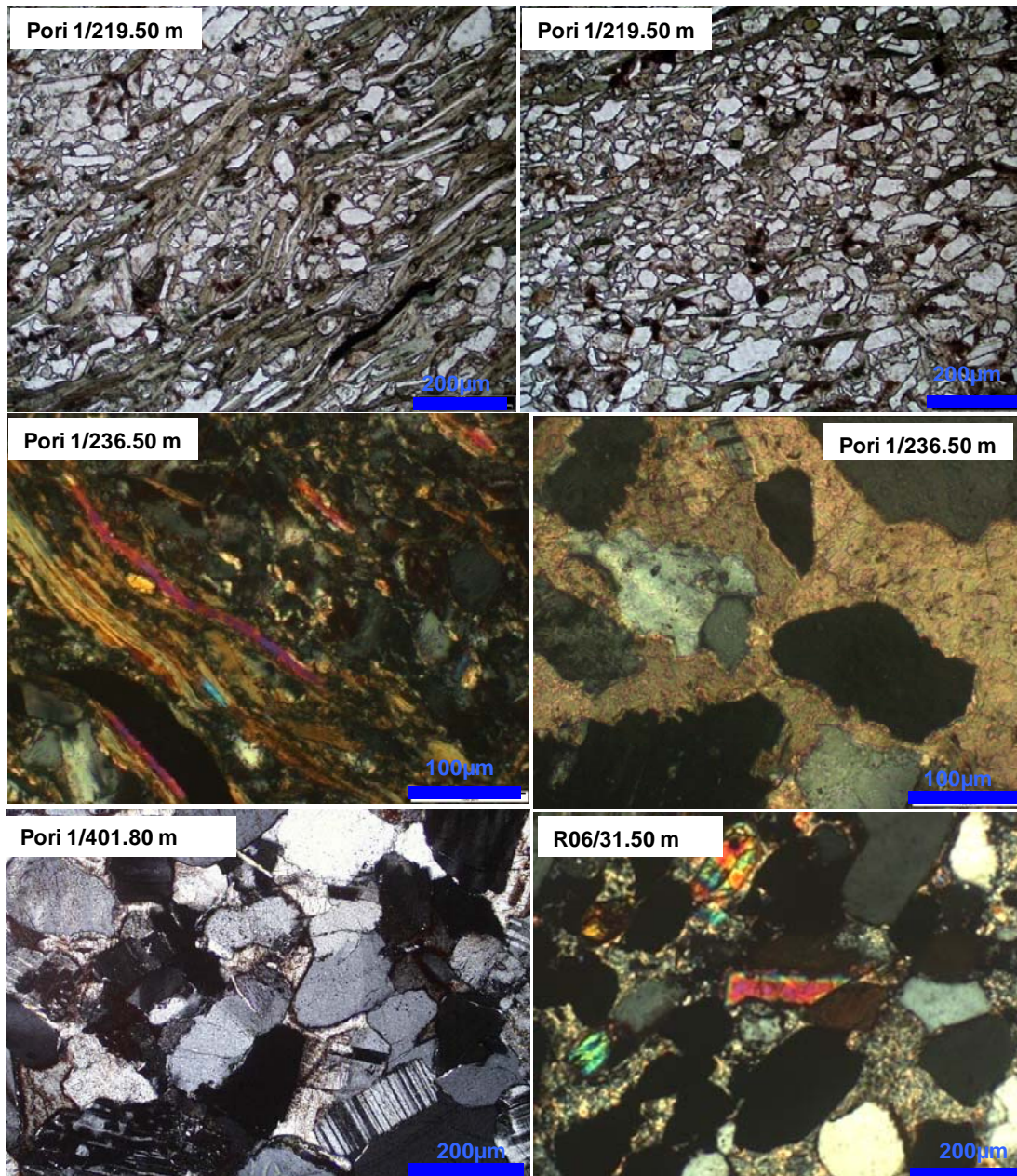


Figure IV. 6: Pori 1 drilling: 210.50 : siltstone with angular detrital quartz and micas ; 236.50 m left : siltstone layer rich in micas with fine grained quartz and feldspars; 236.50 m right : calcite matrix around detrital corroded quartz grains ;401.80 m: laumontite between detrital quartz and feldspars ; 31.50 m microconglomerate rich in accessories

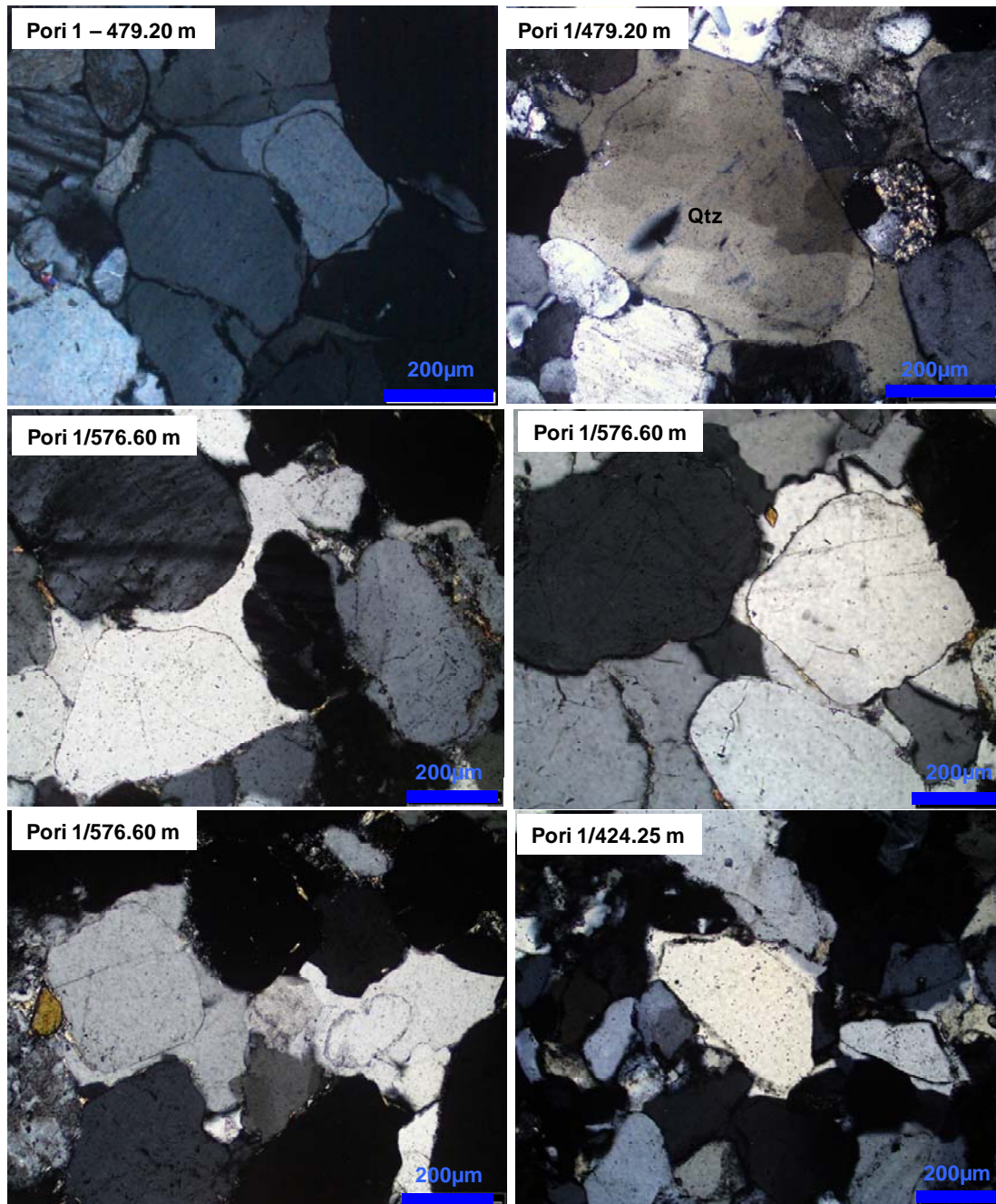


Figure IV. 7: Pori 1 : 479.20 and 576.60 m : highly silicified sandstones with overgrowths over semi-rounded quartz ; 424.25 m over angular quartz crystals.

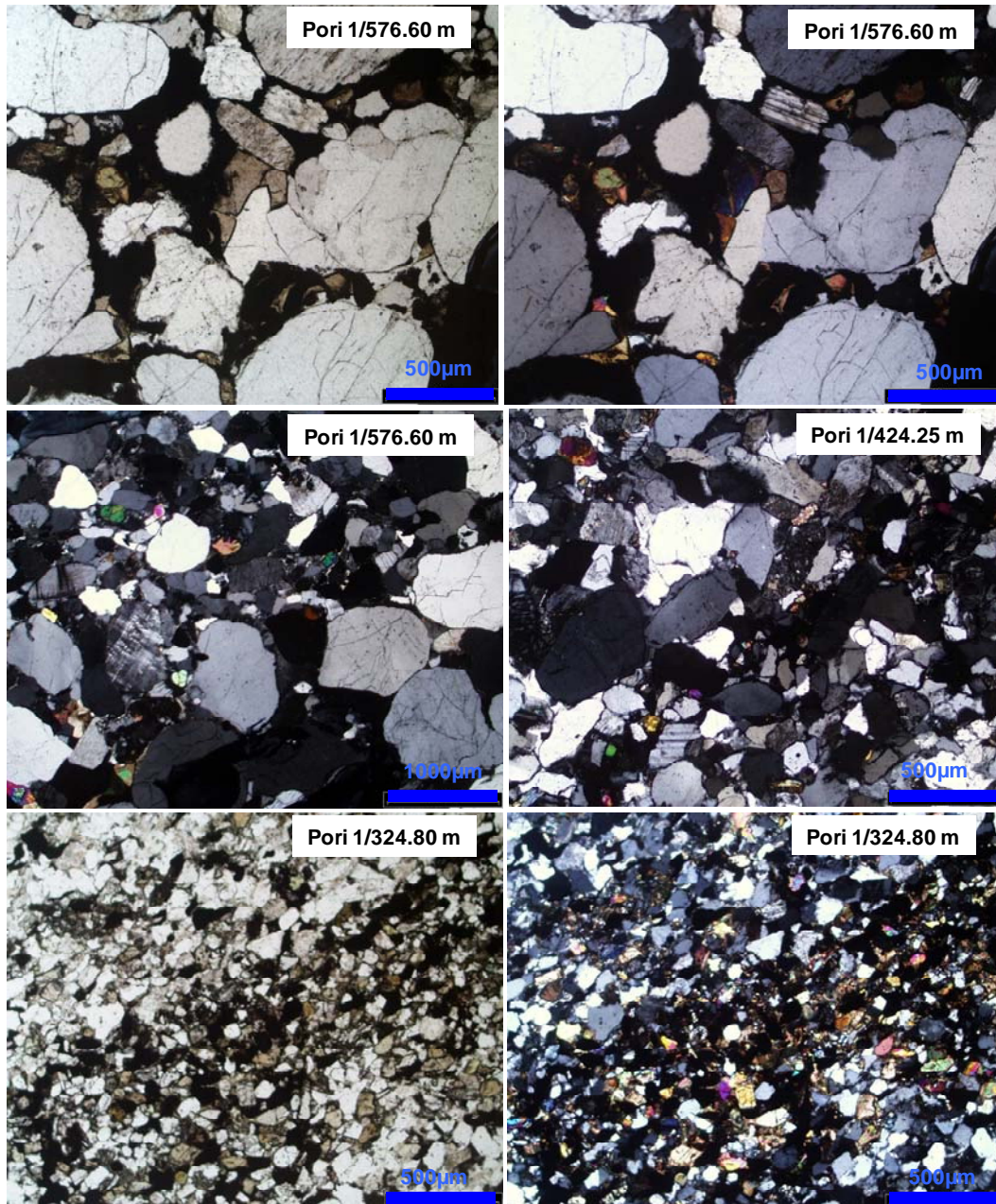


Figure IV. 8: Pori 1 : concentrations of accessory minerals in Satakunta sandstone, with moderate silicification and a hematite rich cement, 576.60 m upper left : plain light, upper right : crossed nicols ; 576.60 m and 424.25 cross nicols; 324.80 : accessory mineral rich layer in siltstone : lower left : plain light, lower right : crossed nicols .

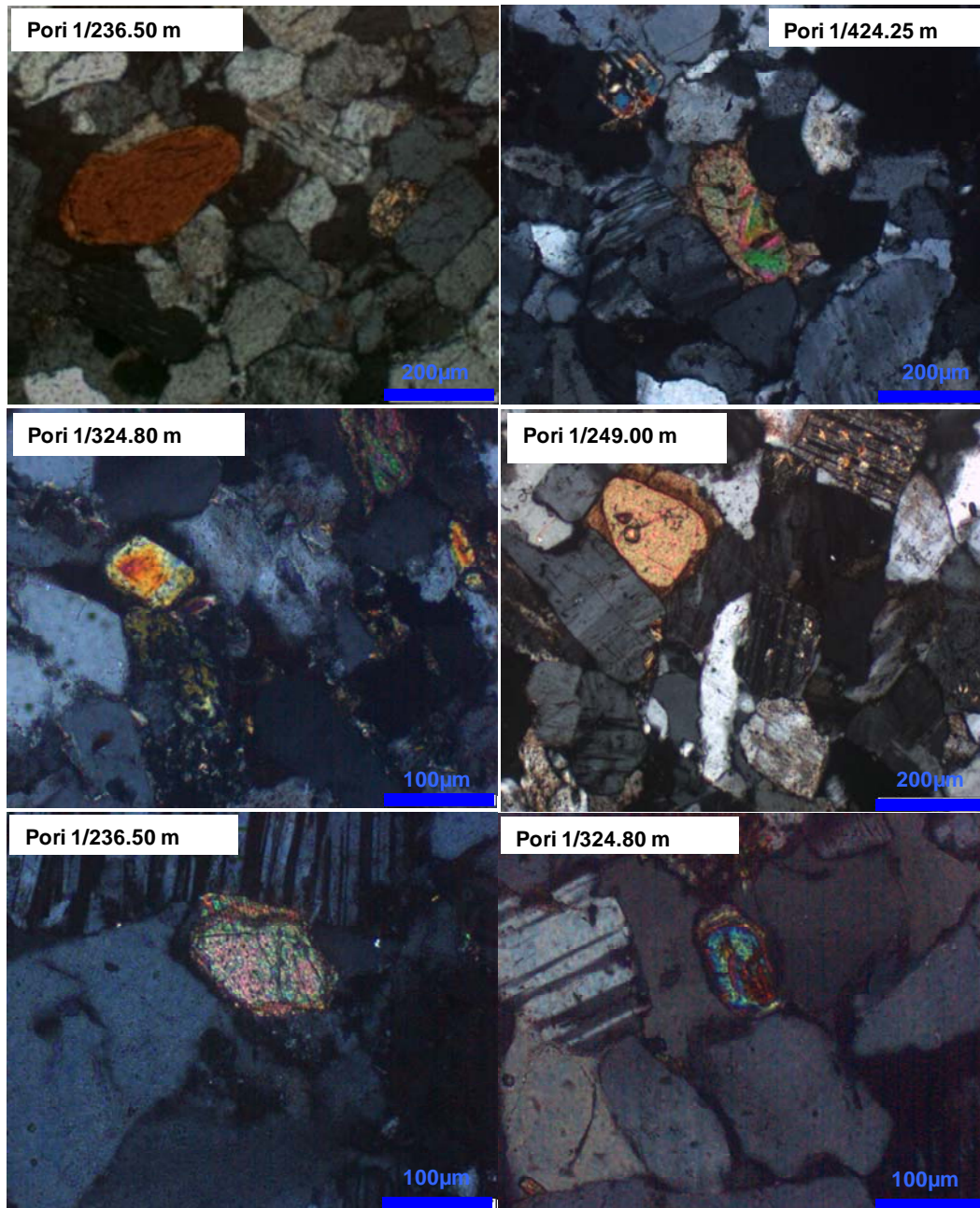


Figure IV. 9: Pori 1 drill hole : disseminated accessory minerals in Satakunta sandstone: 236.50 and 324.80 m : tourmaline; 249 and 424.25 m : titanite ;236.50 m : monazite; 324.80 m : zircon.

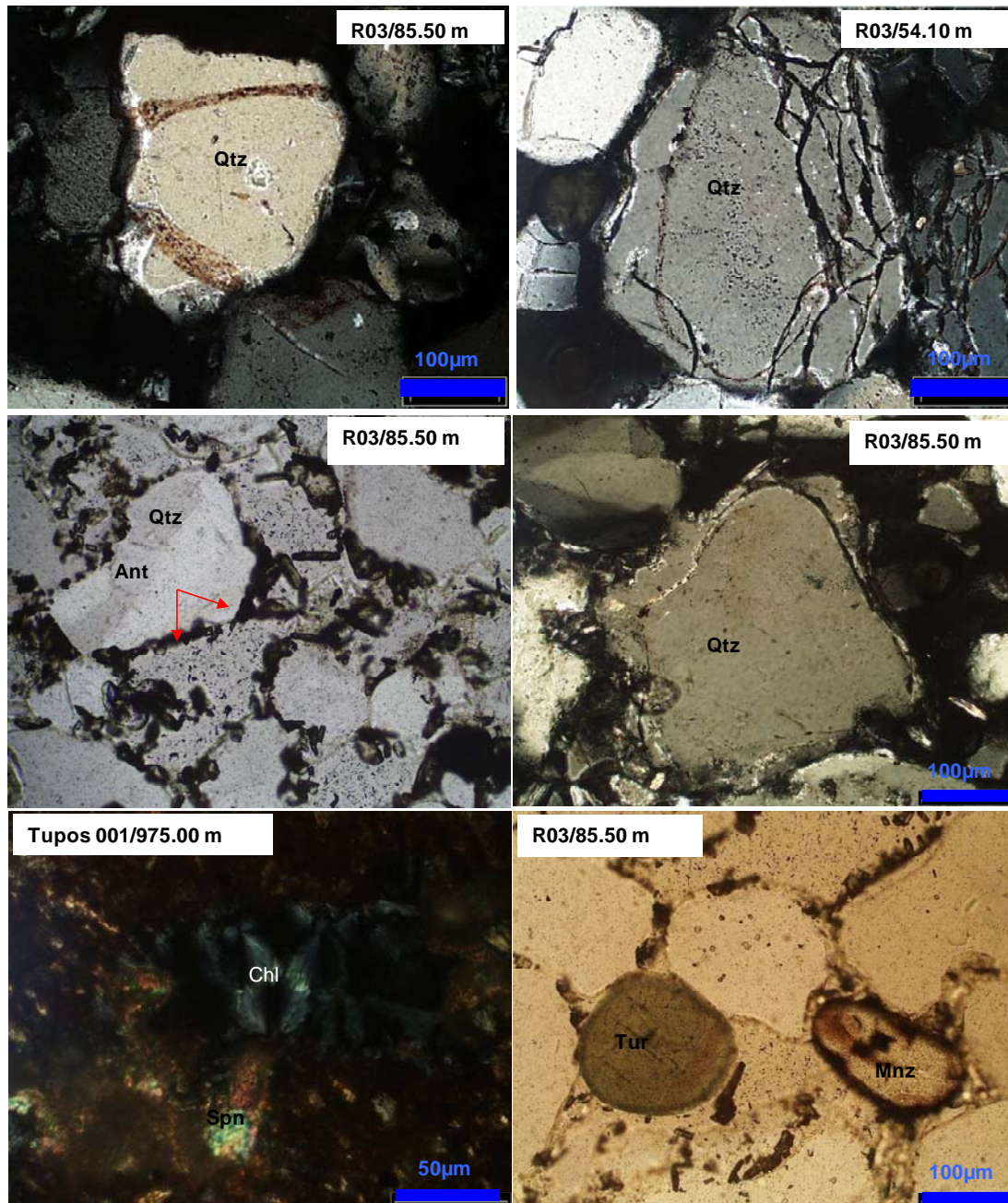


Figure IV. 10: In the Muhos basin, drill hole R03 : 85.50 and 54.10 m: silicified sandstone with overgrowths on semi-rounded detrital quartz; disseminated accessory minerals in sandstone and siltstone : anatase in R03 at 85.50/, titanite in Tupos1 at 975.00 m, tourmaline and monazite in R03 at 85.50 m.

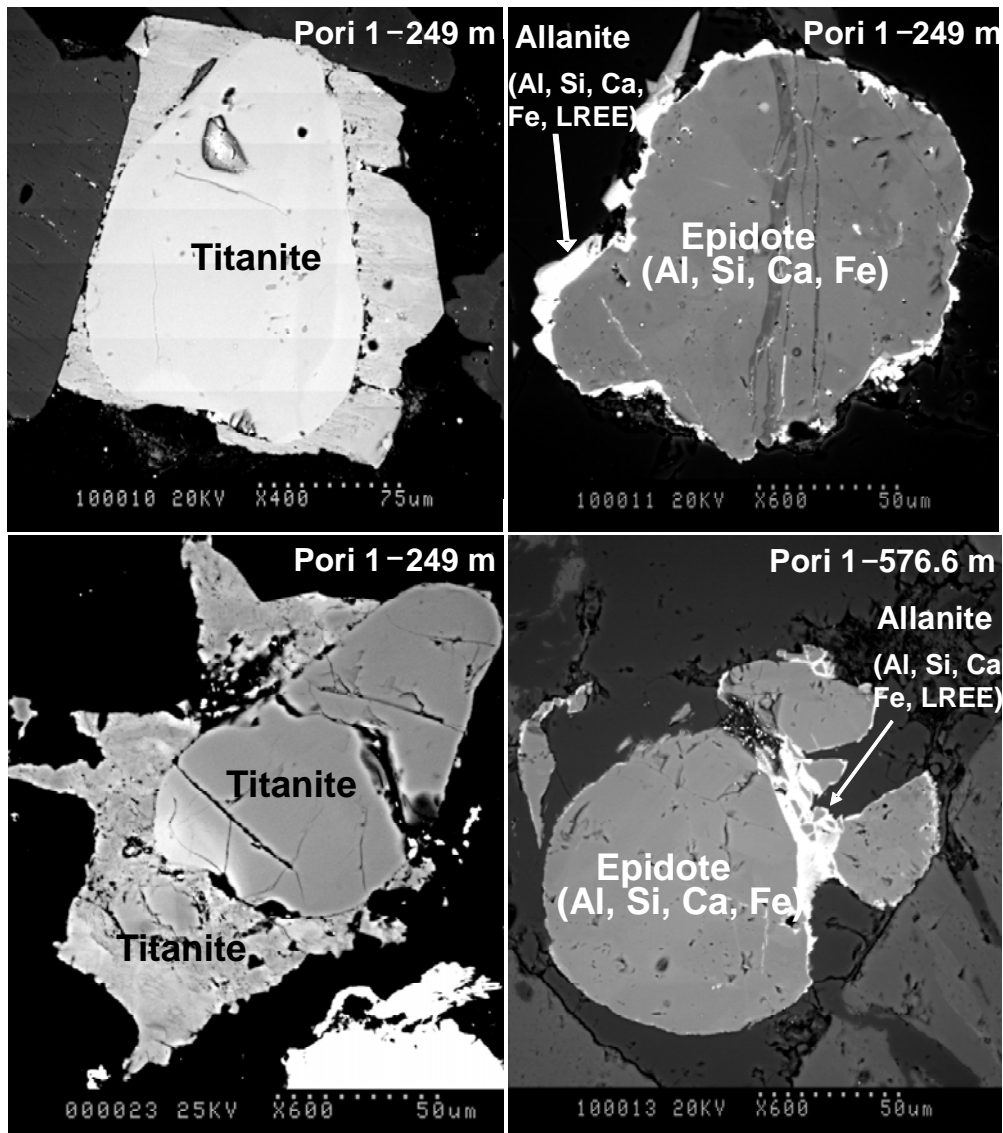


Figure IV. 11: Neoformations of titanite and allanite on detrital rounded titanite and epidote in the Satakunta sandstones; drill core Pori 1.

Post - diagenetic alterations are weak. The feldspars are moderately altered to clays. Illite, kaolinite and / or montmorillonite are abundant in fine grained sandstone levels and in a laminated siltstone, but weakly abundant in the silicified sandstones and arkoses. Few trioctahedric green Fe - rich chlorites are neofomed. At the base of the basin, in the conglomerates and sandstone, carbonates and pyrite veinlets and pyrite concretions were developed later.

Figure (IV. 12) represents the paragenetic succession in the Satakunta sediments.



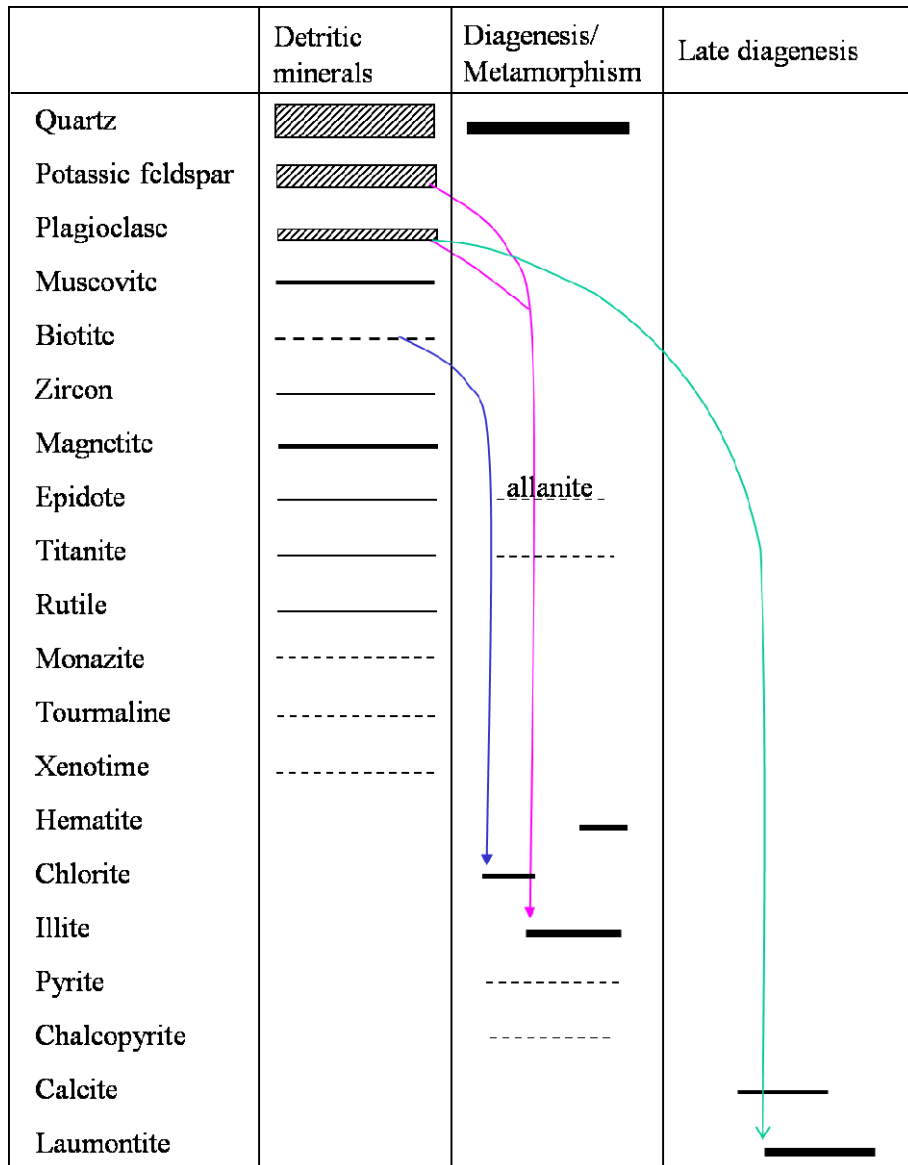


Figure IV. 12: Mineral paragenesis established in the Satakunta sandstones. The diagram represents successively detritic minerals deposition, diagenesis or metamorphism stages.

### 6. Sandstone geochemical characteristics

Satakunta and Muhos basin sediments mainly consist of quartz and feldspars with minor clay except for the Satakunta microconglomerates (Fig. IV. 13). Satakunta sandstones are richer in feldspars but poorer in clay (Fig. IV. 14) than those of Muhos. Muhos microconglomerates have calcite cement ( $A < 0$ , Fig. IV. 13). Muhos and Satakunta

siltstones are the richest in feldspars with variable clay mineral proportions. Comparatively, the Athabasca basin is much more quartzose. In Figure (IV. 14), Satakunta microconglomerates and Muhos sandstones have an intermediate composition between illite and feldspars. Some Muhos siltstones are intermediate between chlorite - feldspars - illite poles. Non - mineralized Athabasca sandstone mainly contains illite and kaolinite, chlorite only appears in mineralized sandstone. The feldspathic fraction in the Satakunta sediments consists of variable proportions of K - feldspar and plagioclase (Fig. IV. 15).

The lower part of the “Pori 1” borehole is K - feldspar rich and becomes plagioclase-rich in its intermediate part. Such a variation reflects a change in the nature of the source. In the Muhos basin, the K/Al – Na/Al diagram shows the rarity of plagioclase. Satakunta and Muhos sediments are richer in trace elements (high Rb and Ba = K - feldspar; high Ti, Th, Y, REE, Zr = detrital accessories) than those of Athabasca reflecting their immaturity (Fig. IV. 16).

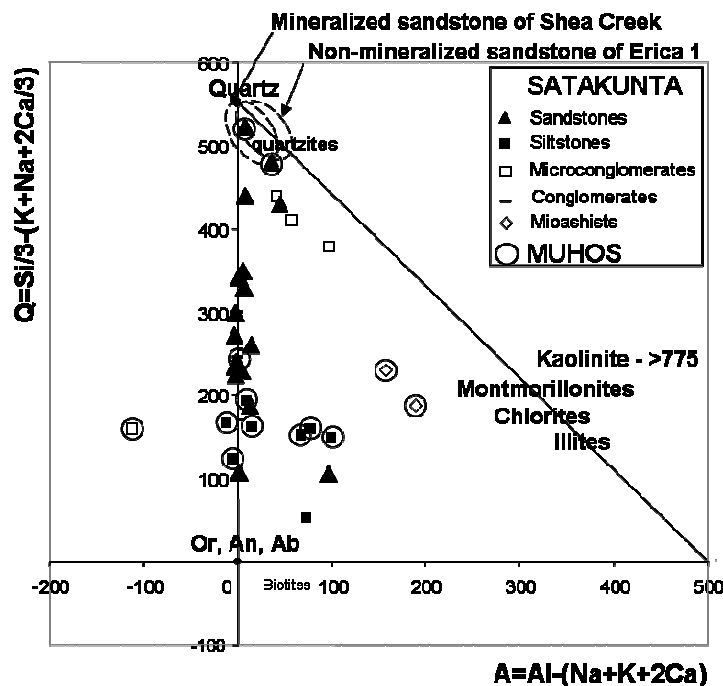


Figure IV. 13: Satakunta and Muhos sediments in the quartz – peraluminous index diagram.

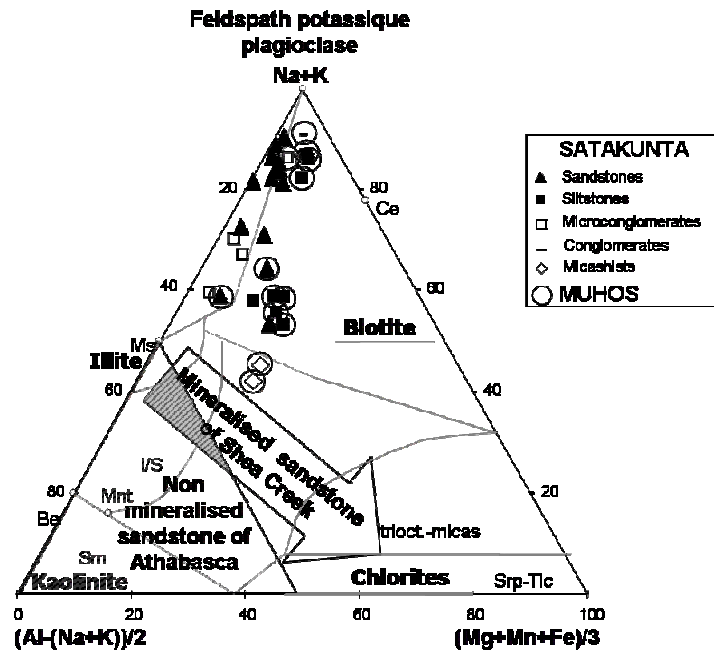


Figure IV. 14: Satakunta and Muhos sediments in the feldspars – clays – micas diagram.

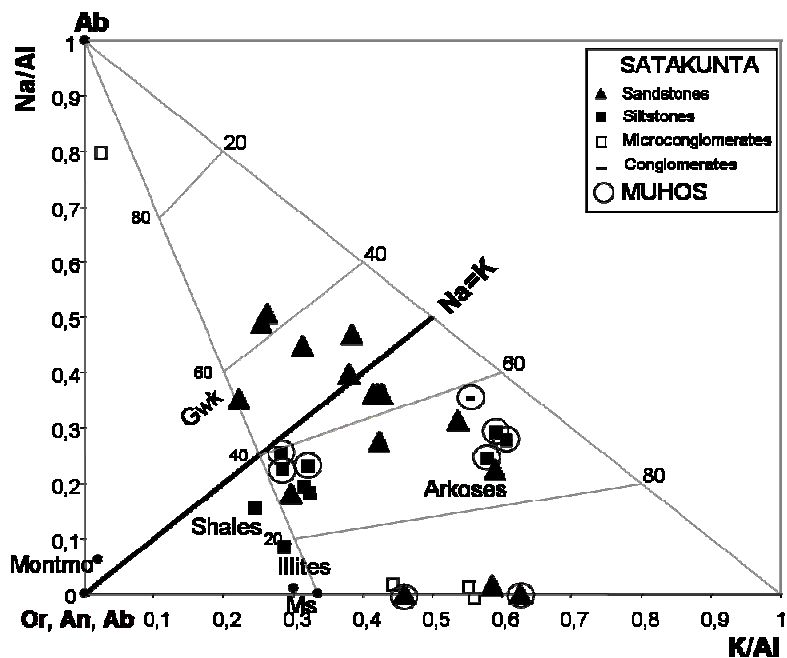


Figure IV. 15: Satakunta and Muhos sediments in a Na/Al – K/Al diagram.

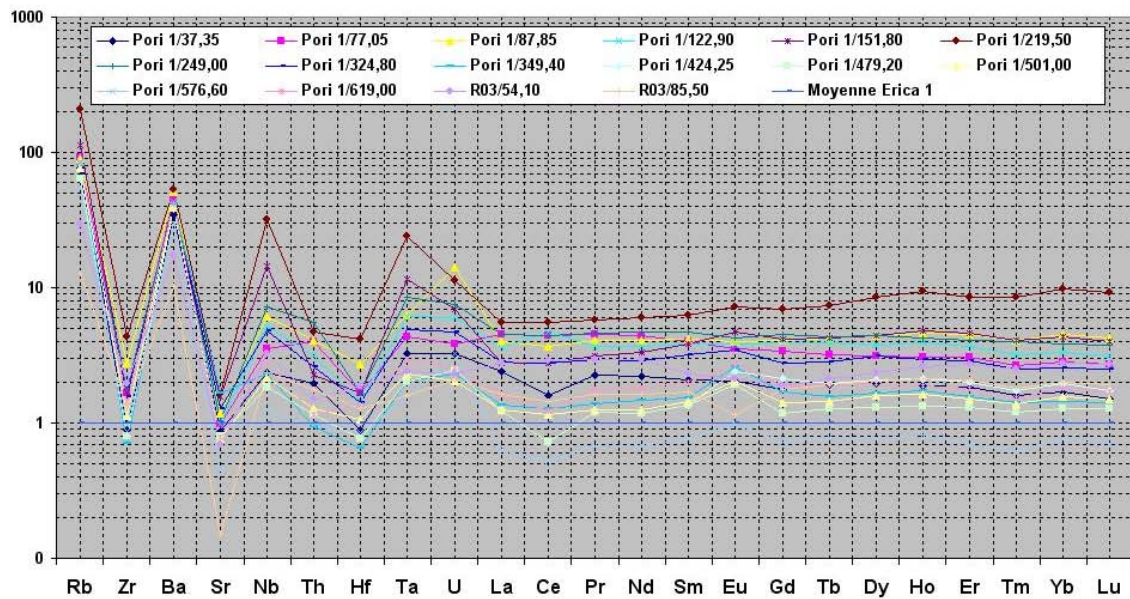


Figure IV. 16: Normalisation of trace elements of the sandstones of Satakunta and Muhos to the sandstones of Erica1 drill core (Athabasca).

The Th/U ratio in most samples of the two basins shows values around the average crustal ratio between 2 and 5 (Fig. IV. 17). Muhos siltstones, upper Satakunta sandstones and Satakunta microconglomerate are richer in U ( $2 < \text{Th}/\text{U} < 1$ ). In the Pori 1 drill core we can see that most samples have the value of Th/U ratio between 2 and 4 with strong correlation between Th and U. The richness of Th and U in the intermediate part of the drill core corresponds with the high content in accessories minerals.

Most Satakunta and Muhos samples have Th/La ratios between 0.2 and 0.4 similar to those of the non - altered Archaean and Proterozoic sediments (Fig. IV. 18). Only the Satakunta microconglomerates which are more permeable and some sandstones have lower ratios ( $0.5 < \text{Th}/\text{La} < 1$ ) indicating a LREE loss, Th being immobile.

The K/Rb ratio in the sediments of Satakunta and Muhos are weak,  $< 300$  for the least potassic sediments ( $\text{K} < 3.5$  % wt) and  $< 200$  for the values higher than 3.5 % K (Fig. IV. 19), with ratios of 166.79 and 134.60 for the sandstones of Satakunta - Pori 1 / 151.8 and 219.5 m. Highest values indicate a dominating control of K/Rb ratio by potassic feldspars, whereas the weakest ratios mark a major control by micaceous phases (biotite, muscovite, illite) correspondent with what is observed in thin sections and with the values

of parameter "A". **K/Rb ratios of sediments are typical of non - altered sediments deriving from a metamorphic or plutonic source.** They are definitely weaker than those observed in sandstones of the Athabasca basin (> 400). Strong values of K/Rb ratio of Athabasca come either from a leaching of Rb during diagenesis, alteration of rare detrital feldspars to kaolinites, or represent the signature of a granulitic source of the sediments. In the same way, in Mesoproterozoic basins associated with U mineralization, sandstones present heavy rare earth elements spectra in a curved form at the level of intermediate heavy rare earth elements (Fig. IV. 20) indicating their leaching by mineralizing fluids. In order to quantify the loss of rare earth elements a new index:  $Ho^* = (\sqrt{Gd_{(N)}} * Yb_{(N)})$  was conceived. Values of the ratio  $Ho_{(N)}/Ho^*$ , calculated for the sediments of Muhos and Satakunta, are only slightly lower than 1 and lie between 0.66 and 0.83. The lowest values, corresponding to a significant leaching of intermediate heavy rare earth elements, are (i) from base until -350 m poor in rare earths, Th and U reflecting a small proportion of accessory minerals and (ii) from -350 m to the top presenting contents definitely higher (x 3 to 4) and irregular of these elements.

### **Zircon in the Satakunta basin**

Enrichments in Y were observed in altered parts of zircons typical of the Mesoproterozoic sandstones associated with uranium mineralization and neof ormations of xenotime (Kister, 2003). Zr/Y ratio is an indicator of the degree of zircon alteration: in fresh zircons this ratio exceeds 100, while altered zircons are typically characterized by Zr/Y ratios between 100 and 20 (it's close to 20 in Athabasca basin). Sandstones of Satakunta and Muhos present Zr/Y ratios definitely lower than 20 (Fig. IV. 21), but they contain detritic accessory minerals such as xenotime, titanite richer in yttrium than the detritic accessory mineral phases of Athabasca. Zr/Y ratio increases towards the base with the reduction of the abundance of accessory minerals. Accessories are abundant between 224.80 and 349.40 m. These minerals are presented then either in disseminated way or concentrated in fin layers. Titanite, epidote and allanite are very frequent at 249 and 347.40 m, zircon is also frequent at 249 m but they are small and little altered. Monazite was observed too. In R6 drill core, starting from -23.70 m these identical

accessories become very frequent until the discordance. Zircons here are the most altered (Fig. IV. 22).

Altered sections of zircons are depleted in Zr and Si and enriched in P, Y, Fe, Ca, and U (Fig. IV. 23; IV. 24).

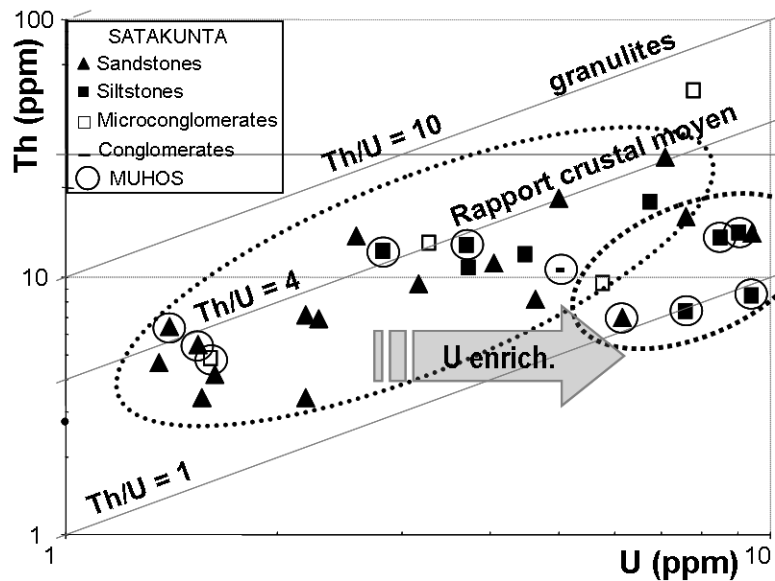


Figure IV. 17: Th-U diagram for the sediments of Muhos (ringed symbols) and Satakunta.

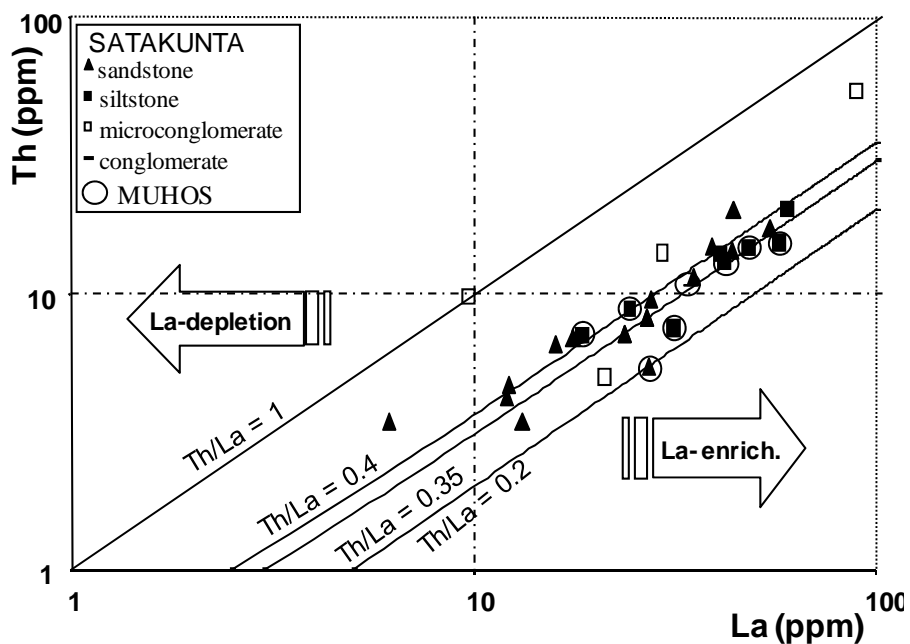


Figure IV. 18: Th-La diagram for the sediments of Muhos and Satakunta.

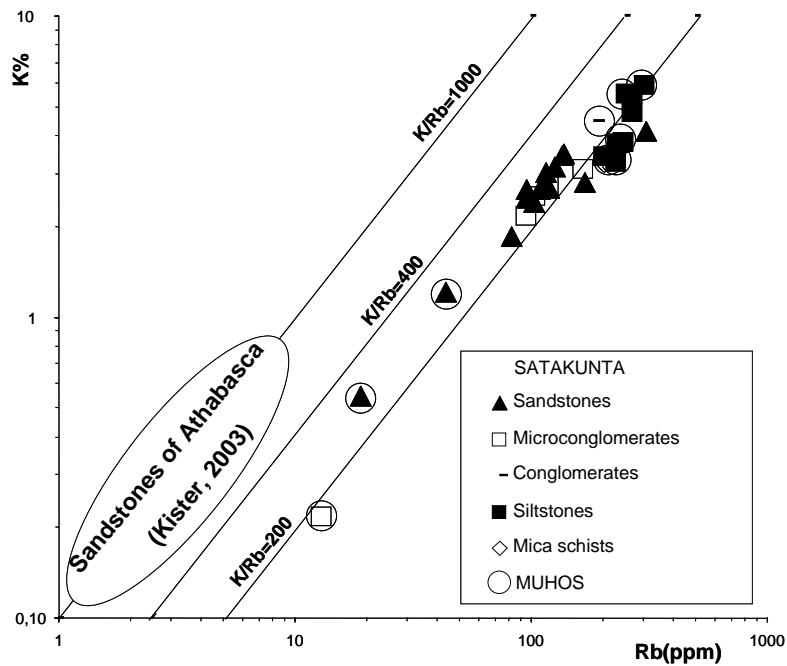


Figure IV. 19: K - Rb diagram for the sediments of Muhos and Satakunta.

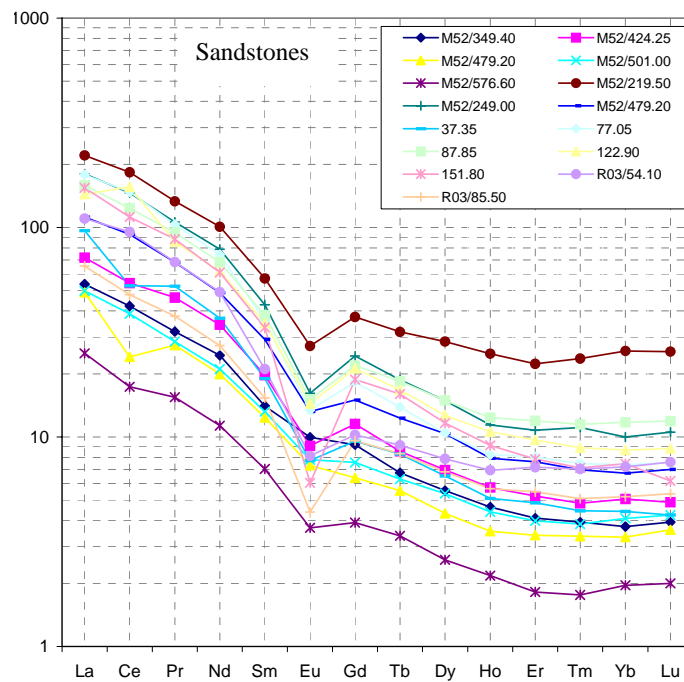


Figure IV. 20: Spectra of rare earth elements of sediments of Satakunta and Muhos basins Normalized to chondrites.

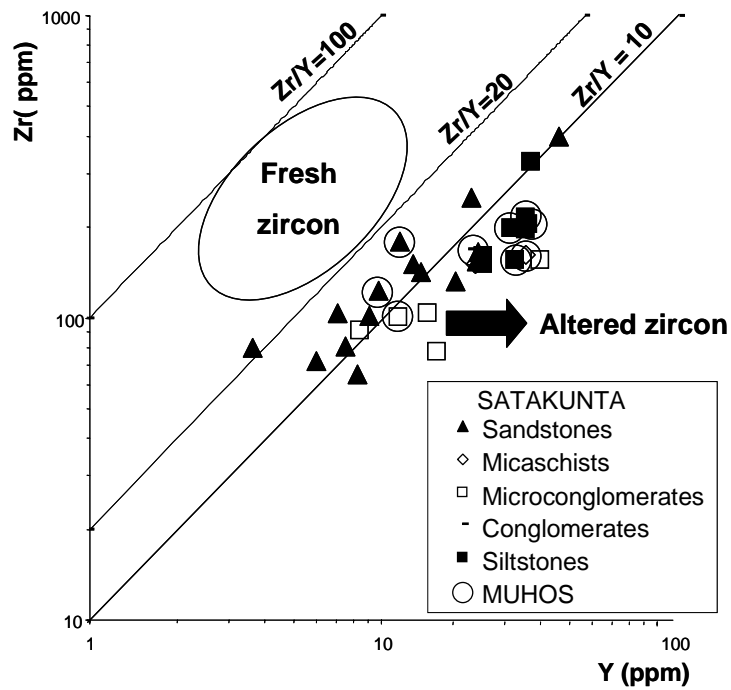


Figure IV. 21: Zr - Y diagram for the sediments of Muhos and Satakunta.

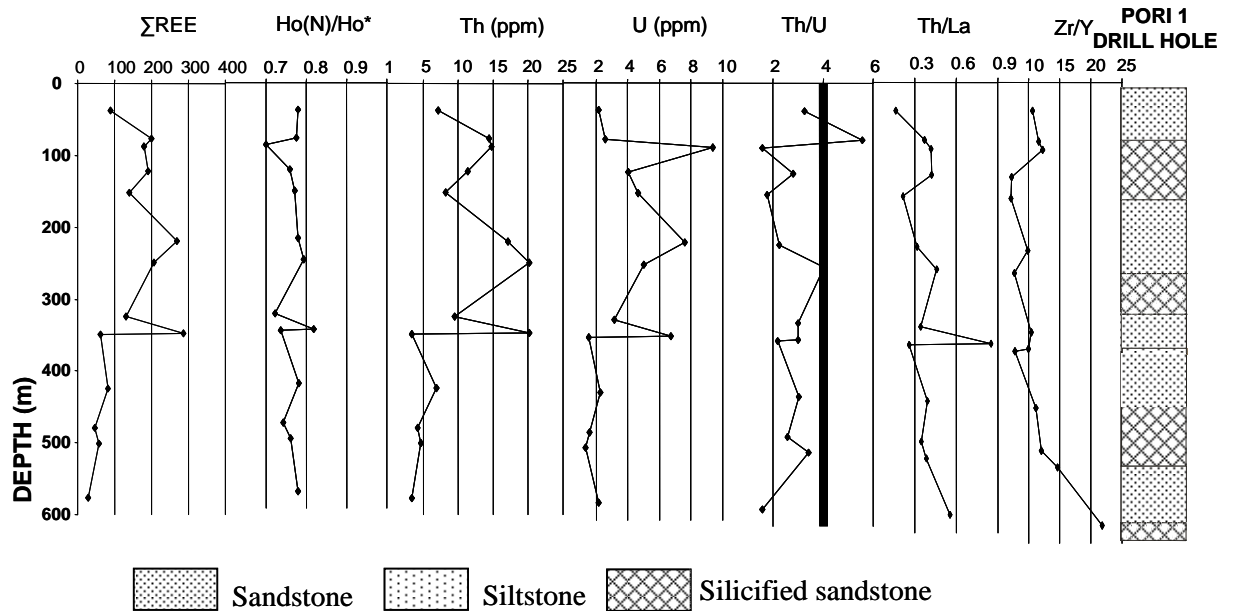


Figure IV. 22: Evolution of Th/La, Th/U, Zr/Y ratios and  $\Sigma$  REE,  $Ho_{(N)}/Ho^*$ , Th, U values with depth in Pori 1 drill core.



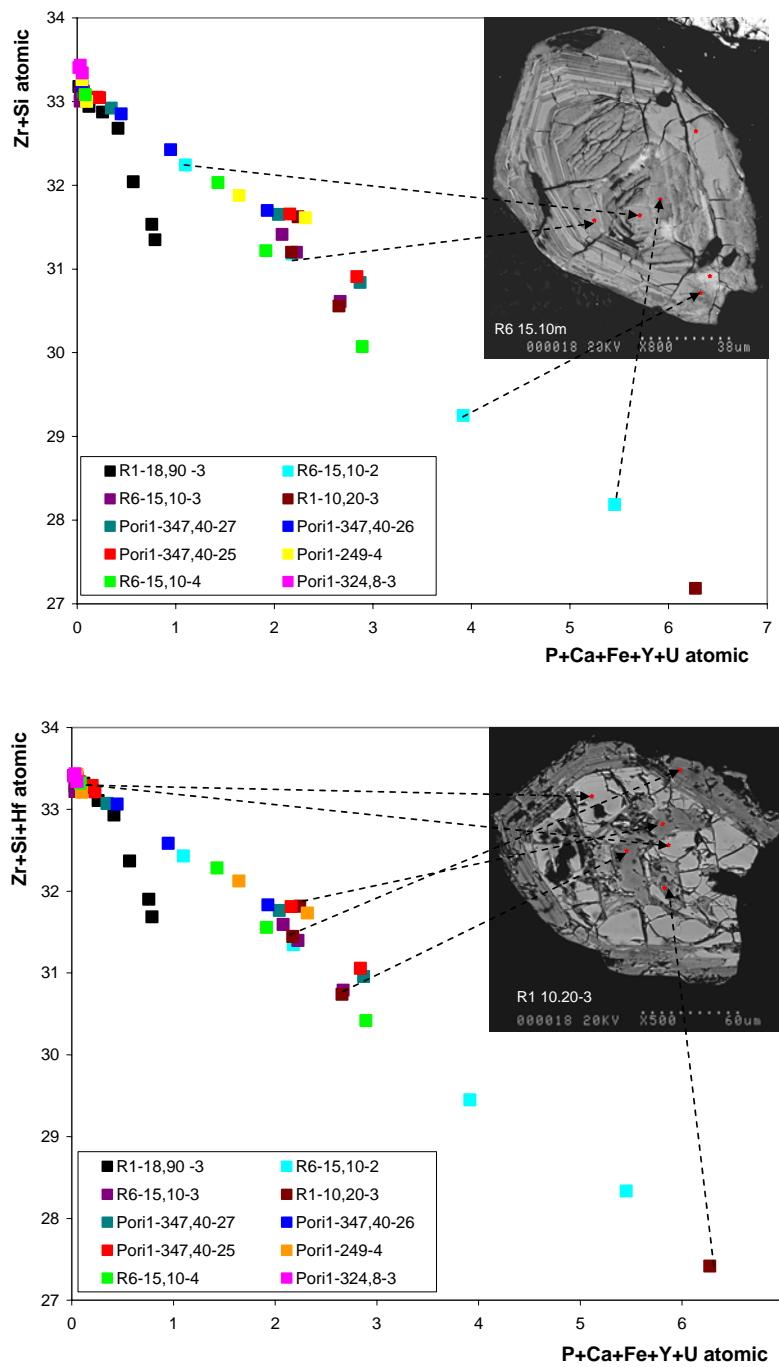


Figure IV. 23: Substitution of Zr + Si + Hf by P + Ca + Fe + Y + U in zircons from the sandstone of Satakunta.

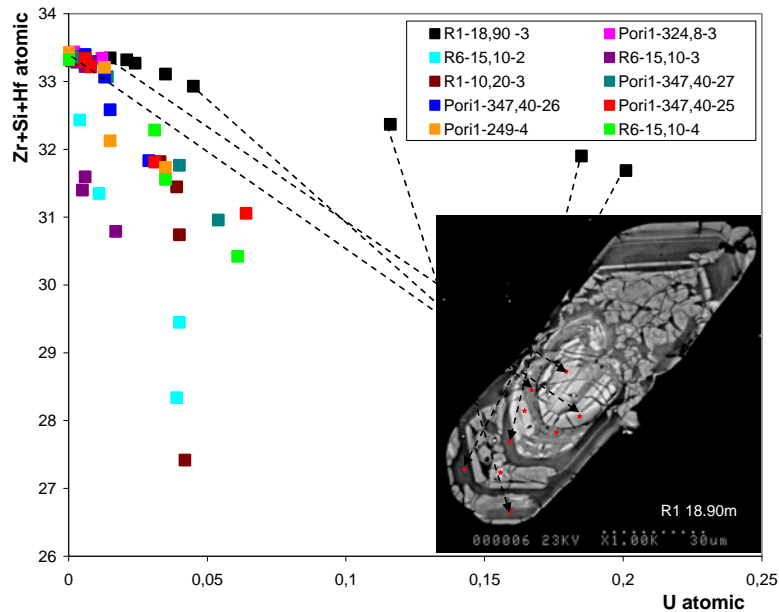


Figure IV. 24: Substitution of Zr + Si + Hf by U in zircons from the sandstone of Satakunta.

### Monazite in the Satakunta basin

In the sandstones of Pori 1 and the conglomerate of R1 and R6 drill holes, preserved detrital Monazite crystals are common unlike as in the Athabasca basin where it is only preserved when included in detrital quartz grains (Hecht and Cuney, 2000). At the margin up to 10 atoms of Si, Ca, Th, U and Y are substituted to P - REE in the monazite structure (Fig. IV. 25).

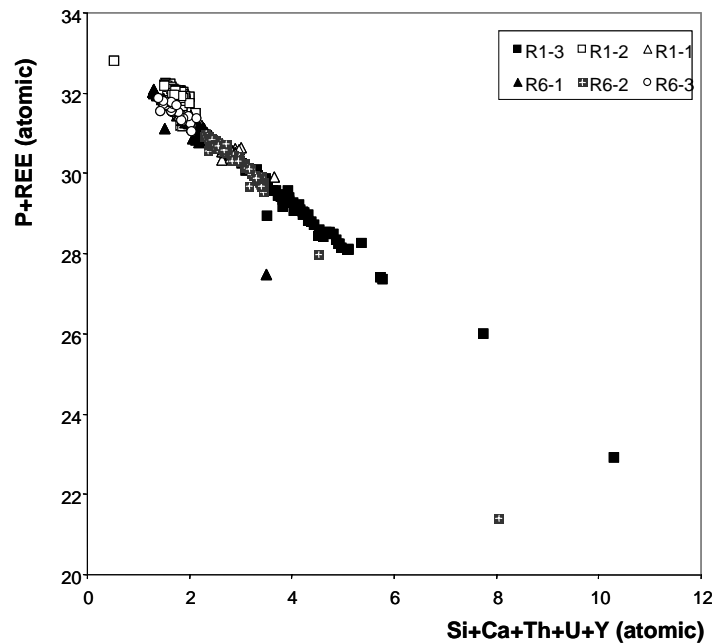


Figure IV. 25: Substitution of P + REE by Si + Ca + Th + U + Y in detrital monazites from the conglomerates of R1 and R6 drill holes of Satakunta basin.

## 7. Cristal-chemistry of clays minerals

The analyses by electron microprobe of chlorite in a triangular diagram make it possible to show that the chlorites of Satakunta and Muhos are trioctaedric iron rich chlorite, whereas the chlorites of Athabasca are di-trioctaedric Al and Mg rich type. The temperatures calculated according to the geothermometer Cathelineau and Nieva from the newly formed chlorites vary from 260 to 300 °C in the basin of Satakunta, and from 280 to 330 °C in the basin of Muhos. It is noticed that the temperatures estimated are higher than those of Athabasca (150 to 200 °C) and Kombolgie (150 ± 15 °C) estimated from fluid inclusions for the diagenesis.

**White - mica** forms a solid - solution well defined between detrital muscovite and phengite (poorer in Al and enriched in Fe - Mg - Si, Fig. IV. 26) which recrystallized during the diagenesis.

**Detrital biotites** of the sediments in the diagram of Velde (Fig. IV. 27) are almost all chloritized. The variation of the contents of Al and Fe + Mg for the same K content probably reflects the heterogeneity of sources of these detrital micas.

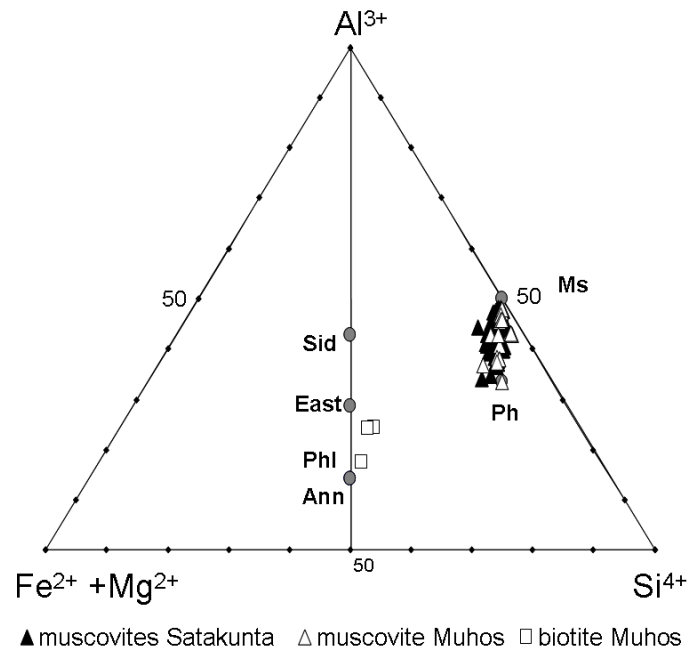


Figure IV. 26: Classification of white micas of Satakunta and Muhos in a diagram Si – Al - (Fe + Mg) (Monier, 1985).

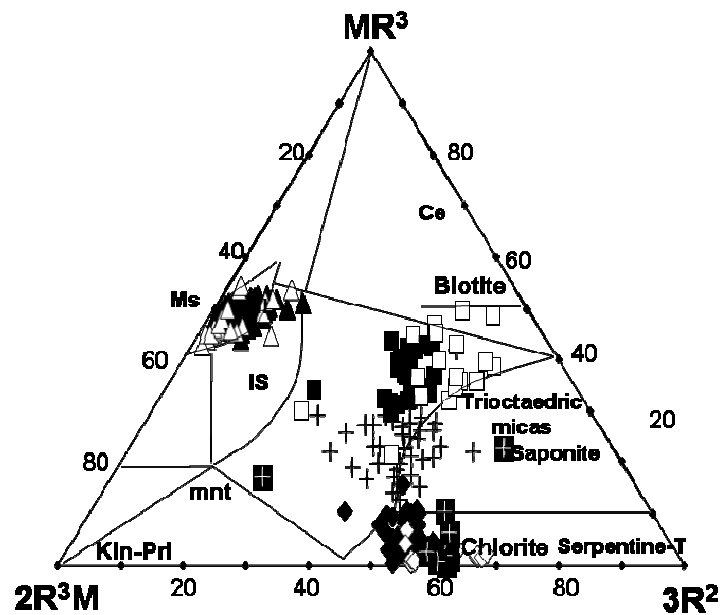


Figure IV. 27: Characterization of newly formed micas types in the diagram of Velde (1977).

$$MR^3 = Na + K + 2Ca; 3R^2 = (Mg^{2+} + Fe^{2+} + Mn^{2+})/3; 2R^3M = (Al + Fe^{3+} - MR^3)/2.$$

The chlorites are distributed in the diabantite fields; pycnochlorite and brunsvigite (Fig. IV. 28). They derive either from biotite's alteration or from neo-formations. They correspond to chlorites trioctaedric (Fig. IV. 29). They differ from the chlorites of Athabasca which are chlorites di-trioctaedric rich in Al - Mg (Lorilleux *et al*, 2003). For the newly formed chlorites, it is possible to determine their temperature of crystallization from the proportion of Al in the tetrahedral site (Cathelineau and Nieva, 1985; Cathelineau, 1988) according to the formula:  $T (^{\circ}\text{C}) = -61.92 + 321.98 (\text{Al (IV)})$  (Fig. IV. 30). The majority of **newly formed chlorites** of Muhos mudstones are close to the right side of substitution of Tschermak in figure (IV. 31). Compared to chlorites of Los Azufres and Salton Sea (Cathelineau, 1988), the majority are crystallized at temperatures ranging between 300 and 330  $^{\circ}\text{C}$ . A second group located a little further from the right side of substitution from Tschermak gives temperatures of 280 and 300  $^{\circ}\text{C}$ . The rare newly formed chlorites of Satakunta give also temperatures of 260 to 300  $^{\circ}\text{C}$ .

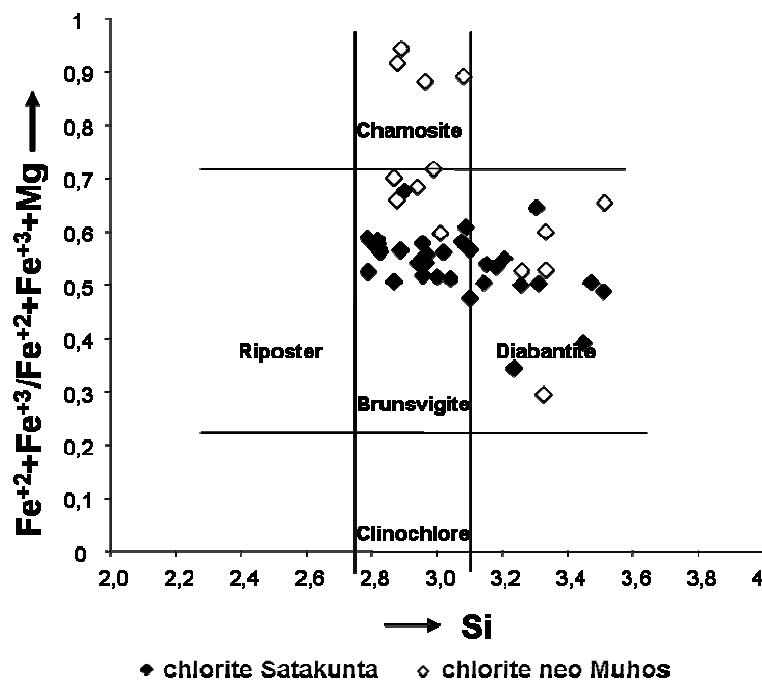


Figure IV. 28: Nature of the newly formed chlorites from the Satakunta and Muhos sediments in the diagram of Foster (1962).

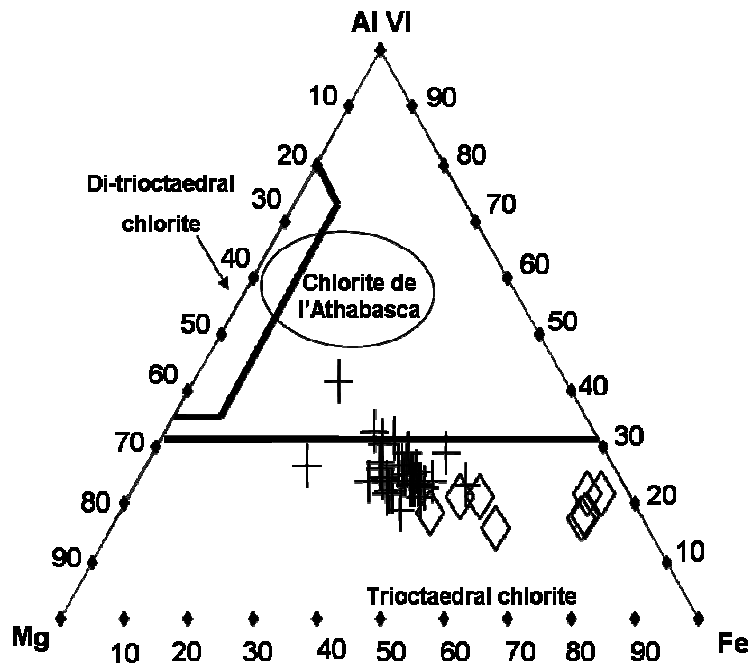


Figure IV. 29: Classification of chlorites of Satakunta and Muhos sediments in the triangular diagram Al (VI)-Mg-Fe, (Chlorites of Athabasca in *Lorilleux, 2001*).

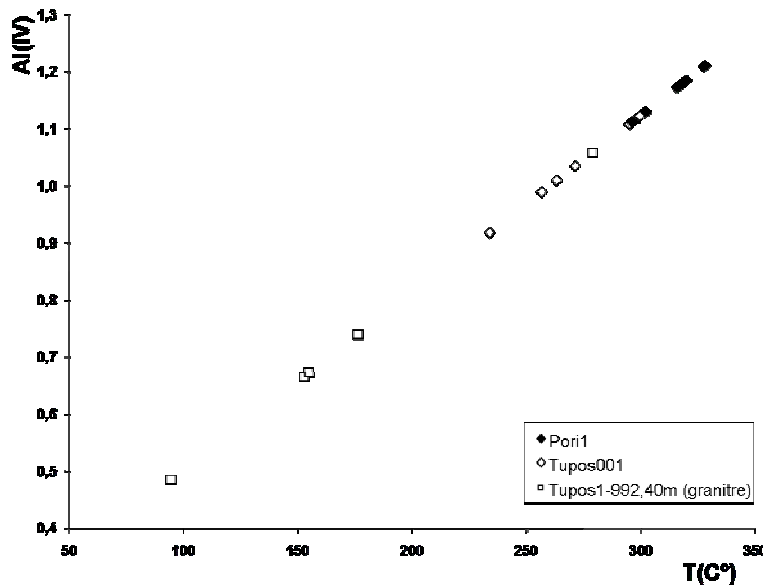


Figure IV. 30: Diagram Al (IV)-temperature of crystallization applied on chlorites of the Satakunta and Muhos sediments.

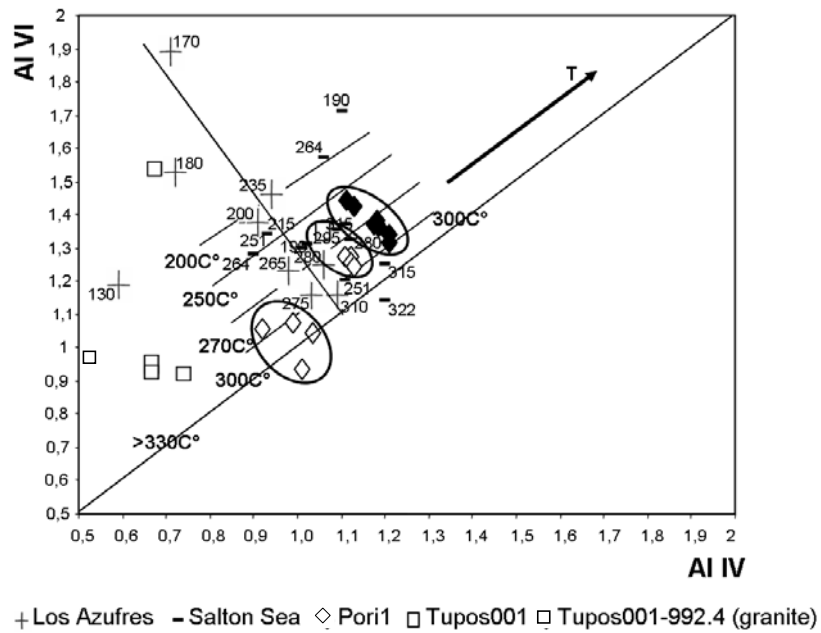


Figure IV. 31: Diagram Al (VI)-Al (IV) applied on chlorites of the Satakunta and Muhos sediments.

**Titanites** of the sandstones of Satakunta present diagenetic overgrowths. An increase of Al is observed in the majority of the overgrowths, with a correlative reduction in Fe, Ti, Y, Ce, Nd (Fig. IV. 32). The weak rare earths and Y contents in newly formed titanites reflects a lower temperatures of growth than those of detrital titanites which probably derive from a granitic source, therefore of higher temperature (*Frost et al., 2001*).

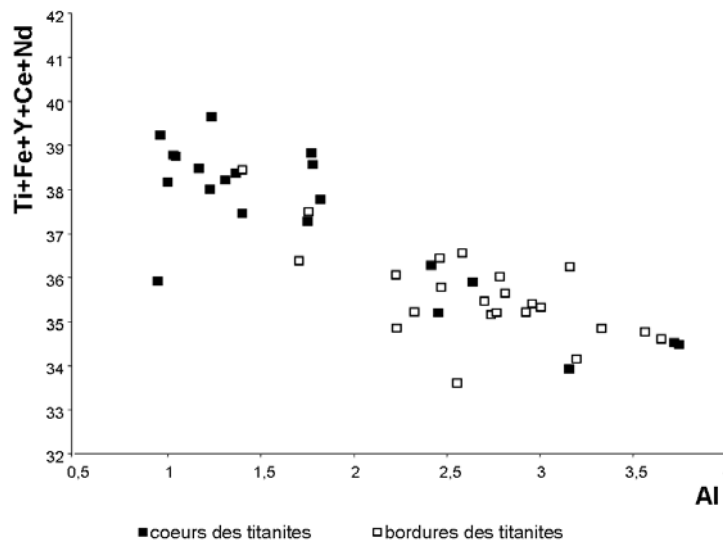


Figure IV. 32: Diagram Al versus (Ti + Fe + Y + Ce + Nd) for detrital titanites and their overgrowths in the sandstones of Satakunta.

## 8. K - Ar analyses on potassic feldspars

Analyzed feldspars have been separated from a quartzo-feldspathic microconglomerate sample, taken at -18.90 m from R1 drill core, in which no evidence of overgrowths on titanite and epidote has been observed and with weak silicification, and from a microconglomeratic sample, taken at -15.10 m from R6 drill core, in which overgrowths on titanite and epidote are well developed and with strong silicification.

In the R1 – 9135 – 3 - 18.90 m quartzo-feldspathic microconglomerate: the potassic feldspars of this sample give an age of 1790 Ma. Such an age corresponds to the youngest ages of the late-orogenic potassic granites from the Svecofennian basement (*Koistinen, 1996*), which represents one of the main sources for these siliciclastic sediments. Thus, the temperature of the diagenesis here remained lower than 200 °C (closure temperature of K-feldspar) in this part of the basin, because the K-Ar system has not been reopened.

In the R6 – 913 8 – 1 - 15.1 m microconglomerate, the potassic feldspars give a K - Ar age of 1240 Ma clearly indicating a rejuvenation of the ages of the detrital feldspars as a result of a thermal event at temperatures equal or higher than 200 °C. This is consistent with the existence of titanite and epidote overgrowths which indicate temperatures over 300°C.

## 9. Fluid inclusions (FI) study

Fluid inclusions have been studied in diagenetic quartz, which cements the sandstones of the samples located at -247.6, -329.3 and -424.25 m from the Pori 1 drill core.

### Petrography of fluid inclusions and microthermometry

Fluid inclusions are composed of a liquid phase and a vapour bubble occupying, at ambient temperature, volume between 15 and 80 %. Some contain trapped or daughter minerals like: calcite, rutile, dawsonite, nahcolite, carbon and other non identified solids analyzed by Raman microprobe.



3 types of inclusions were identified:  $L_{w-c}$ ,  $L_{c-w}$  and  $L_w$  (Fig. IV. 33):

- i.  $L_{w-c}$ : aqueous fluids present traces of  $CO_2$
- ii.  $L_{c-w}$ : aqueous fluids with vapour > 50 % vol.
- iii.  $L_w$ : aqueous fluids.



Figure IV. 33: Fluid inclusions in the overgrowths of Satakunta sandstone.

Analyse of the gas phase by Raman microprobe showed the presence of  $CO_2$  and very little  $CH_4$  and  $N_2$ .

$T_{m_{ice}}$  values are between  $-0.2$  and  $-5.5$  °C (Annexe III). The values could not be determined because of the small size of inclusions. Salinity is much lower than that which was measured in the basins of Kombolgie and Athabasca ( $T_{m_{ice}}$  near to  $-25$  °C corresponds to the brines of Na-Ca in the basin of Kombolgie, *Derome et al., 2003*).

The temperatures of homogenisations show four groups of fluids (Fig. IV. 34):

- i.  $L_{c-w}$  fluid inclusions: show temperatures of homogenisation of  $275.4$  °C and  $365.4$  °C.

- ii.  $L_{w-c}$  fluid inclusion: show a temperature of homogenisation of 365.4 °C.
- iii.  $L_{w-c}$  fluid inclusions: show a temperature of homogenisation of 346.8 °C.
- iv.  $L_w$  fluid inclusions: show temperatures of homogenisation, between 237.7 °C and 335.8 °C.

The high temperatures of homogenization recorded in most fluid inclusions indicate the existence of a high temperature event within the basin.

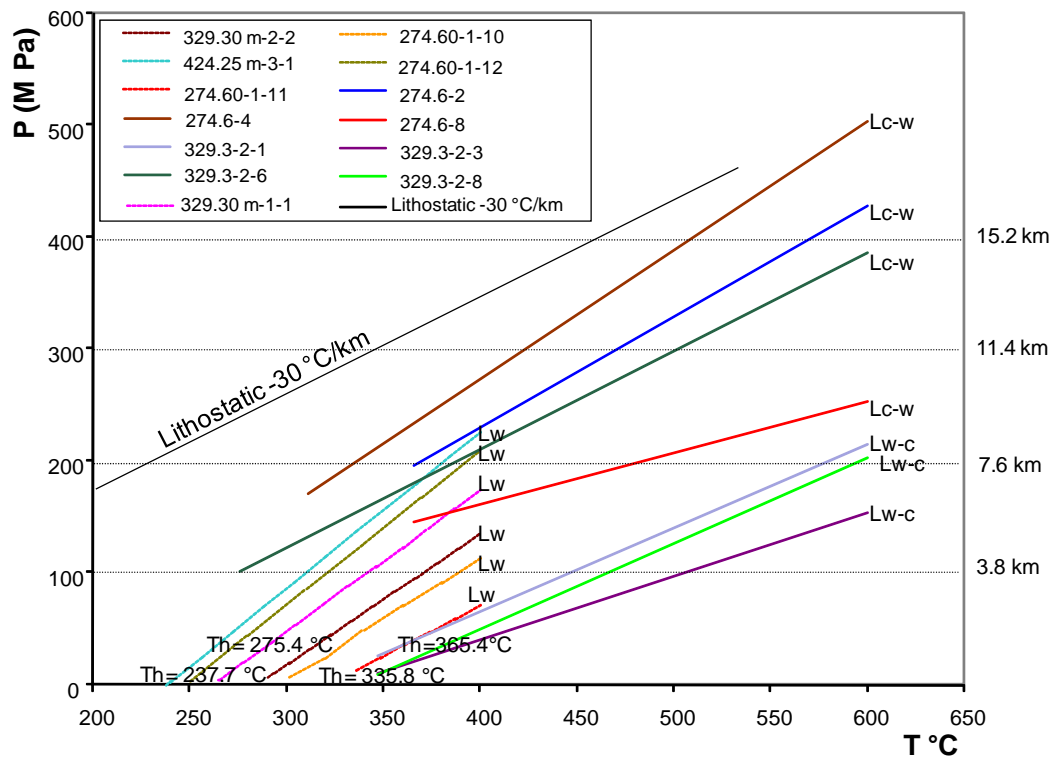


Figure IV. 34: Isochore of the inclusion fluids found in diagenetic overgrowths of detrital quartz from the Satakunta basin sediments.

## 10. Discussion and conclusions

### 10.1. Characteristics of the diagenetic evolution of the sediments

The first observed diagenetic processes are the overgrowths aureoles around detrital quartz grains, developed very well in sandstones and conglomerates. This overgrowth follows the dissolution of the detrital quartz grains under the pressure of the sedimentary

pile. Important silicifications in Satakunta, less important in Muhos, decrease the permeability of these formations for Post-diagenetic fluid circulations.

Generally the clay matrix crystallized occurs between the detrital grains, but sometimes replace old detrital grains. However, they miss completely in the zones where early quartz overgrowths are largely developed. These rocks are also cemented by late laumontite newformation which crystallized after the early quartz overgrowths, filling completely the residual porosity and sometimes crosscut detrital feldspars. Laumontite is often associated hematite. The abundance of hematite around the detrital grains indicates an oxidizing character to the conditions of sedimentation.

### 10.2. Degree of maturity of the sediments

In contrast to the very high degree of maturity of the clastic sediments of the basins of Athabasca (*Kotzer and Kyser, 1995; Renac et al., 2002; Kister et al., 2003*) and of Kombolgie, consisted almost only of quartz, kaolinite and illite, Satakunta and Muhos sediments, rich in K - feldspar, plagioclase, biotite and accessories, are highly immature. These characteristics bring them closer to those of the basin of Pasha Ladoga (*Lobaev et al., 2005*). The stability of these minerals implies a weak alteration of the source areas. This conclusion and angular shape of quartz and feldspars in most of the sediments indicate short transport of materials. **The great depth of the Satakunta basin (> 1800 m), the weak transport and the low sandstone maturity is attributed to active tectonic conditions at the time of the Satakunta and Muhos basin filling.**

### 10.3. pH conditions

The presence of feldspars in significant proportion associated with illite confers less acidic pH for the fluids in equilibrium with this paragenesis compared to the mineralized basins (kaolinite - illite equilibrium). **Neutral pH conditions are less favorable for U solubility.**

### 10.4. Redox conditions

During sediment deposition and diagenesis, strongly oxidizing conditions are indicated by hematite located around detrital quartz grains and overgrowths in both basins. The

bleaching observed in the lower 50 m of the Pori 1 drill hole reflects the circulation of reduced fluids. Pyrite veinlets and concretions at the base of the Muhos basin may represent reducing traps favorable to U deposition. In the basement of the Satakunta basin, graphite schists represent potential reducing traps for U deposition.

### 10.5. P-T conditions of the thermal events

Temperatures estimated from the composition of the newly formed chlorites in the Satakunta basin vary from 260 to 300 °C and 280 to 330 °C for the Muhos basin. These temperatures are similar to the minimal titanite stability temperature ( $\approx 300$  °C, *Frost et al., 2001*) and epidote ( $\approx 335$  °C, *Teklemariam et al., 1996*). The high temperatures recorded by these neoformations are not accompanied by deformation and must correspond to a purely thermal metamorphism. This may indicate the influence of the large diabase dykes and seams crosscutting the basin. Temperatures estimated for newly formed chlorites in the Muhos granitic basement are slightly lower (105 to 288 °C) and may represent later fluid circulations.

Moreover, the presence of CO<sub>2</sub> in the fluid inclusions with temperatures of homogenisation over 300°C can typically represent the vapour phase of such intrusions or from decarbonation reaction related to the thermal effect of the intrusion and not a diagenetic fluid. Inclusions rich in carbon dioxide represent an additional argument to assign the thermal event observed in the basin with the injection of a significant volume of basic magmatism.

### 10.6. Evidence of hydrothermal alteration

In Satakunta the weak alteration of the basement roof results from retrograde metamorphism rather than from the circulation of basinal fluids. Its intensity does not increase toward the unconformity. These observations are in accordance with the strong silicification of the sediments preventing diagenetic fluid percolation. Such indications are not favorable for the presence of U mineralization. In the Muhos basin basement, the strong argillaceous alteration and the intense hematitization developed in the mafic gneiss may result from the circulation of diagenetic fluids in accordance with the moderate silicification of the sediments in the basin. The relatively low Th/U ratios of most of the

sediments do not indicate significant uranium leaching. The Th/La ratios mainly comprised between 0.2 and 0.4 also indicate the absence of significant LREE leaching contrary to the observations made in mineralized basins.

**Thus, globally the extreme immaturity of Satakunta and Muhos basin sediments, the low permeability of the siliciclastic formations and the weak diagenetic fluid circulation are unfavorable for significant U - deposit associated to them.**

## REFERENCES

- Axberg, S. (1980). Seismic stratigraphy and bedrock geology of Bothnian Sea, northern Baltic. *Stockholm Contributions in Geology*, V. 36, P. 153 - 213.
- Cathelineau, M. (1988). Cations site occupancy in chlorite and illites as a fonction of temperature. *Clay Minerals*, V. 23, P. 471 - 485.
- Cathelineau, M., & Nieva D. (1985). A chlorite solid solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) Geothermal system. *Contrib. Mineral., Petrol.*, V. 91, P. 235 - 244.
- Derome, D., Cuney M., Cathelineau, M., Fabre, C., Lhomme, T. (2004). Evidences of brine mixings in the McArthur River unconformity-type uranium deposit (Saskatchewan, Canada). Implications on genetic models. *Economic Geology*, soumis.
- Derome, D., Cuney, M., Cathelineau, M., Fabre, C., Dubessy, J., Bruneton, P., and Hubert, A. (2003). A detailed fluid inclusion study in silicified breccias from the Kombolgie sandstones (Northerne Territory, Australia): inferences for the genesis of middle – Proterozoic unconformity – type uranium deposits: *Journal of Geochemical Exploration*, V. 80, P. 250 – 275.
- Elo, S., Kuivasaari, T., Lehtinen, M., Sarapää, O., and Uutela, A., (1993). Iso-Naakkima, a circular structure filled with Neoproterozoic sediments, Pieksämäki, south eastern Finland, *Bulletin of The Geological Society of Finland*, V. 65, P. 3 – 30.
- Elo, S. (1982). On the gravimetric studies of the bedrock in Satakunta (in Finnish). Espoo: *Geological Survey of Finland*. Unpublished report Q 20/21/1982/1, 17 P.
- Elo, S. (1976). Rpt Q20/21/1976/1, *Geol. Surv. Finland*: 11 P.
- Foster, M. D. (1962). Interpretation of the composition and classification of the chlorites. *U. S. Geological Survey Professional Paper* 414-A, 33 P.
- Frost, B.R., Chamberlain, K.R., Schumacher, J.C. (2001). Sphene (titanite): phase relations and role as a geochronometer. *Chem. Geol.*, V. 172, P. 131 – 148.
- Hiatt, E. and Kyser, K. (2000). Links between depositional and diagenetic processes in basin analyses: an overview of porosity and permeability evolution in sedimentary rocks. In: K. Kyser (Editor), *Fluids and Basin Evolution. Short Course Series. Mineralogical Association of Canada, Calgary*, P. 63 - 90.

- Jefferson, C., Gandhi, S., Ramakers, P., Delaney, G., Thomas, D., Cutts, C., and Olson, R. (2005). Unconformity-associated uranium deposits: 2005 Convention CD-ROM, *Prospectors and Developers Association of Canada, Toronto*.
- Kister, P., Laverret, E., Cuney, M., Vieillard, P. and Quirt, D. (2003). 3D distribution of alteration minerals associated with unconformity-type uranium mineralization: Anne Zone, Shea Creek deposit (Saskatchewan, Canada). In: M. Cuney (Editor), *Uranium Geochemistry 2003, Nancy International Conference Proceedings*, P. 197 - 200.
- Kister, P. (2003). Mobilité des éléments géochimiques dans un bassin sédimentaire clastique, du Protérozoïque à nos jours: le bassin Athabasca (Saskatchewan, Canada). Unpub. PhD. thesis. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 331 P.
- Kohonen, J., Rämö, O.T. (2005). Sedimentary rocks, diabases, and late cratonic evolution. In: Lehtinen, M., Nurmi, P.A., Rämö, O.T. (Eds.), *Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield*. Elsevier B. V., Amsterdam, P. 563 - 604.
- Kohonen, J., Pihlaja, P., Kujala, H., and Marmo, J. (1993). Sedimentation of Jotnian Satakunta Sandstone, western Finland. *Geol. Surv. Finland*. 35 P.
- Koistinen T.J. (ed.) (1996). Explanation to the map of the Precambrian basement of the Gulf of Finland and surrounding area 1: 1 mill. Espoo: Geological Survey of Finland. Special Paper 21, 141 P.
- Korja, A. Heikkinen, P. & Aaro, S., (2001). Crustal structure of the northern Baltic Sea palaeorift. *Tectonophysics*, V. 331, P. 341 - 358.
- Kotzer, T. G., Kyser, T. K. (1995). Petrogenesis of the Proterozoic Athabasca Basin, northern Saskatchewan, Canada, and its relation to diagenesis, hydrothermal uranium mineralization and paleohydrogeology *Chem. Geol.* V. 120, P. 45 - 89.
- Kousa, J., Lundqvist, T. (2000). Meso- and Neoproterozoic cover rocks of the Svecofennian Domain. In: Lundqvist, Th. & Autio, S. (eds.) *Description to the bedrock map of central Fennoscandia (Mid-Norden)*. Geological Survey of Finland. Special Paper 28, P. 75 - 76.

- Kyser, K., Hiatt, E. (2002). Fluids in sedimentary basins: an introduction. *Journal of Geochemical Exploration*, V. 80, P. 139 – 149.
- Laurén, L., (1970). An interpretation of the negative gravity anomalies associated with the rapakivi granites and the Jotnian sandstone formation in southern Finland. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, V. 92, P. 21 - 34.
- Laverret, E. (2002). Les paragenèses argileuse associées aux gisements d'uranium sous discordance, secteur de Shea Creek (bassin de l'Athabasca, Canada). PhD thesis, Pointers University, 192 P.
- Lobaev, V., Cuney, M., Tenrentyev, V. The Karku deposit (Ladoga district, Baltic shield, Russia): mineralogical and geochemical characterisatic of the sandstones. International conference on Uranium Geochemistry, Nancy, France, 13 - 16 April, 2003. P. 223 - 226.
- Lorilleux, G., Cuney, M., Jébrak, M., Rippert, J.C., Portella, P. (2003). Chemical brecciation processes in the Sue unconformity – type uranium deposits Eastern Athabasca Basin (Canada). *J. of Geochemical Exploration*. V. 80, P. 241 - 258.
- Lorilleux, G., (2001). Les brèches associées aux gisements d'uranium de type discordance du bassin Athabasca (Saskatchewan, Canada). PhD thesis. INPL, Nancy, 319 P.
- Marttila, E. (1969). On the sedimentation of the Satakunta sandstone. Helsinki: University of Helsinki, Department of geology. Academic dissertation, 157 P.
- Monier, G. (1985). Cristallochimie des Micas des Leucogranites, Nouvelles Données et Applications Pétrologiques. Ph.D. thesis. Université d'Orléans. 299 P.
- OECD/NEA & IAEA (2002) – Uranium 2001: Resources, Production and Demand. (A joint report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency).
- Paulamäki, S., Paananen, M., Elo, S. (2002) Structure and geological evolution of the bedrock of Southern Satakunta, SW Finland. *Geol. Surv. Finland*. Posiva 2002-04.
- Renac, C., Kyser, K., Durocher, K., Dreaver, G. (2002). Comparison of diagenetic fluids in the Proterozoic Thelon and Athabasca basins, Canada: Implications for



- protracted histories in stable intracratonic basins. *Canadian Journal of Earth Sciences*. V. 39, P. 113 - 132.
- Simonen, A. (1960). Pre-Quaternary rocks in Finland. *Bull. Comm. Géol. Finlande*. V. 191, 49 P.
- Suominen V (1991). *Geol. Surv. Finland, Bull.* 356. 100 P.
- Sverjensky, D.A. (1989). Chemical evolution of basinal brines that formed sediment-hosted Cu-Pb-Zn deposits. In Boyle, R.W., Brown, A.C., Jefferson, C.W., Jowett, E.C. et Kirkham, R.V. (editors) *Sediment-hosted stratiform copper deposits*. Geological Association of Canada, Special Paper 36, P. 127 - 134.
- Teklemariam, M., Battaglia, S., Gianelli, G., Ruggier, G. (1996). Hydrothermal alteration in the Aluto-Langano geothermal field Ethiopia. *Geothermics*. V. 25, P. 679 - 702.
- Thomas D.J., Matthews R.B., Sopuck V., 2000. Athabasca Basin (Canada) Unconformity-Type Uranium Deposits: Exploration Model, Current Mine Developments and Exploration Directions. *Geology and Ore Deposits: The Great Basin and Beyond, GAC-MAC*, P. 1 - 23.
- Tynni, R., and Uutela, A. (1984). Microfossils from the Precambrian Muhos formation in Western Finland. *Geol. Surv. Finland. Bull.* 330.
- Tynni, R., & Donner, J. (1980). A microfossil and sedimentation study of the Late Precambrian formation of Hailuoto, Finland. *Geol. Surv. Finland, Bull.* 311, 27 P, VIII P1.
- Vaasjoki M (1977). *Geol. Surv. Finland, Bull.* 294, 64 P.
- Veltheim, V. (1969). On the pre - Quaternary geology of the Bothnian Bay in the Baltic Sea. *Bull. Comm; Géol. Finlande* V. 239, P. 1 - 56.
- Winterhalter, B., Foldén, T., Ignatius, H., Axberg, S. & Niemistö, L., (1981). Geology of the Baltic Sea. In: Voipio, A. (ed.) *The Baltic Sea. Elsevier Oceanography Series*, V. 30, P.1 - 121.



---

*CHAPITRE V*

*SYNTHESE ET DISCUSSION*

---



## TABLE DE MATIERES

SYNTHESE ET DISCUSSION .....	204
1. Nature du matériel sédimentaire et des conditions de sédimentation .....	205
2. Caractéristiques de l'évolution diagénétique et de la perméabilité des sédiments .....	209
3. Les bassins comme source d'uranium .....	210
➔ <i>Abondance des minéraux accessoires porteurs d'uranium</i> .....	210
➔ <i>Lessivage des terres rares lourdes et rapports <math>Ho_N/Ho^*</math></i> .....	211
➔ <i>Altération de la monazite et rapports Th/La</i> .....	212
➔ <i>Teneurs en uranium et rapports Th/U</i> .....	213
➔ <i>Altération des zircons et rapports Zr/Y</i> .....	215
4. Conditions de pH .....	217
5. Conditions de $fO_2$ .....	218
6. L'évidence d'une altération hydrothermale .....	219
7. Evolution pression - température des bassins .....	220
8. Composition des fluides diagénétiques .....	221
9. Favorabilités du socle en tant que source ou piège pour l'uranium .....	223
10. Contexte paléogéodynamique et paléolatitudes des bassins .....	224
11. Evaluation de la favorabilité relative des bassins étudiés .....	227
REFERENCES .....	233

## LISTE DES FIGURES

Figure V. 1 : Distribution des sédiments des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos comparées à celles des sédiments du bassin de l’Athabasca (Rumple Lake sondage de référence non minéralisé), et McArthur (sondages dans l’environnement du gisement) (source : banque de données CREGU) dans un diagramme Quartz – indice de peraluminosité.....	207
Figure V. 2 : Diagramme K-Rb des sédiments des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos. ....	208
Figure V. 3 : Normalisation des éléments en trace des grès de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et de Muhos à la moyenne des grès du sondage Erica 1 (Athabasca). ....	211
Figure V. 4 : Diagramme Ho (N) / Ho* - Th / La pour les sédiments de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos.....	213
Figure V. 5: Diagramme Th - U pour les sédiments de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos.....	214
Figure V. 6 : Diagramme Zr - Y des sédiments des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta, Muhos, Rumple Lake, et McArthur.....	216
Figure V. 7 : Substitutions de Zr, Si et Hf par Al, P, Ca, Fe, Th, Y et U dans les zircons des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos. ....	216
Figure V. 8 : Solubilité des oxydes d’uranium IV, VI et Na <sub>2</sub> U <sub>2</sub> O <sub>7</sub> en fonction de pH à T = 25 °C, P = 0.1 MPa, d’après les données thermodynamiques de Guillaumont et al., (2003), de Rai et al., 1990 et de Yamamura et al., (1998), (calculé par Chinh Ngyen-Trung).....	217
Figure V. 9 : Classification des chlorites de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et de Muhos dans le diagramme triangulaire Al VI-Mg-Fe.....	218
Figure V. 10 : Diagramme Tm <sub>ice</sub> /Th obtenu des surcroissances de quartz des grès des bassins de Cariewerloo, de Satakunta et de Kombolgie. ....	222
Figure V. 11 : Reconstruction du supercontinent proposée Columbia (Zhao et al., 2002, 2004) avec la position des bassins Mésoprotérozoïques gréseux. ....	225
Figure V. 12 : Échelle de temps géologique avec les bassins gréseux Mésoprotérozoïques principaux. Les orogènes majeures sont également indiqués.....	226

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau V. 1 : comparaison des caractéristiques des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec celles d'Athabasca.....	205
Tableau V. 2 : comparatif des valeurs moyennes et des écarts types des éléments : Th, U, La, Zr, Y, Nb, Ta, et $\sum$ REE dans les bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec celles de l'Athabasca.....	211
Tableau V. 3 : Valeurs des températures de fin de fusion de la glace, de la fusion eutectique, et d'homogénéisation dans les inclusions fluides des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Kombolgie.....	222
Tableau V. 4 : Comparaison de degré de maturité, silicification, et altération entre les bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec les bassins de l'Athabasca au Canada et de Pasha Ladoga en Russie.....	227

## SYNTHESE ET DISCUSSION

Les gisements d'uranium associés aux discordances qui sont les plus importants dans le monde sont ceux associés aux bassins de l'Athabasca (1,7 - 1,75 Ga) au Canada et de Kombolgie (1,73 Ga) en Australie qui comprennent à leur base des formations silicoclastiques (grès fluviatiles, deltaïques et parfois éoliens) déposées en milieu intracontinental, puissantes (>1 km), très matures, à caractère fortement oxydé, et qui sont d'âge tardi-paléoprotérozoïque à protérozoïque moyen. Dans ces deux districts, la localisation des minéralisations uranifères est contrôlée par des failles riches en graphite et le voisinage d'une discordance régionale, entre le remplissage clastique du bassin et un socle composé de dômes granitoïdiques archéens ceinturés par des formations métasédimentaires paléoprotérozoïques. Ces métasédiments se sont déposés sur un plateau épicontinental et sont composés d'arkoses, de quartzites, de calcosilicates, de carbonates et de pélites souvent graphiteuses. Ils ont été métamorphisés pendant une orogénèse tardi-paléoprotérozoïque (environ 1.8 Ga). Le métamorphisme dans le socle du bassin Athabasca atteint le faciès amphibolite profond à granulitique avec anatexie et formation de pegmatoïdes et leucogranites souvent enrichis en uranium, alors que le degré de métamorphisme ne dépasse pas le début du faciès amphibolite dans le socle du bassin de Kombolgie. Le socle est également injecté par des granites tardi-paléoprotérozoïques, calco-alcalins fortement potassiques, riches en thorium et uranium.

Les formations silicoclastiques intracratoniques fortement oxydées paléo- à méso-Protérozoïques situées à la base des bassins de Waterberg (1,7 – 1,9 Ga) en Afrique du Sud, de Cariewerloo (1,45 – 1,58 Ga) en Australie, et de Satakunta et Muhos (1,3 – 1,4 Ga) en Finlande, reposent également en discordance sur des roches métasédimentaires et plutoniques archéennes et paléoprotérozoïques. Afin de déterminer la favorabilité relative de ces bassins pour générer des minéralisations uranifères associées aux discordances, par comparaison avec les bassins associés aux minéralisations de ce type, les plus importantes et utilisés comme références : les bassins de l'Athabasca et Kombolgie, des études pétrographiques, minéralogiques, géochimiques, des inclusions fluides et parfois isotopiques ont été entreprise. Les échantillons ont généralement été prélevés dans les sondages les plus profonds disponibles sur ces bassins afin de pouvoir suivre l'évolution des caractéristiques du remplissage et les modifications diagénétiques et post-diagénétiques de ces sédiments en fonction de la distance à la discordance. Dans certains sondages, les altérations au voisinage



de la discordance et les roches du socle sous-jacentes ont pu être prélevées et étudiées. Les principales caractéristiques de ces bassins sont synthétisées dans le tableau V. 1.

Bassin	Athabasca	Waterberg	Cariewerloo	Bassins de Fennoscandie
Degré de maturité	<b>Forte maturité</b> : qtz bien arrondis avec surcroissances, illite-kaolinite, oxydes-Fe, accessoires...	<b>Faible maturité</b> : qtz anguleux avec faible silicification, Fds, Pl altérés, micas, minéraux accessoires abondants.	<b>Immature</b> : qtz anguleux, Fds, rares Pl, argile, mica des oxydes de fer, chlorite, carbonates, minéraux accessoires.	<b>Immature</b> : qtz anguleux, Fds, Pl, micas, argiles, minéraux accessoires, oxydes-Fe
Minéralisation uranifère	les plus riches du monde	-	-	Minéralisations faibles dans le bassin de Pasha Ladoga
Conditions P-T	150 - 200 °C	Métamorphisme thermique au contact d'intrusions basiques >300 °C	230 - >300 °C	métamorphisme thermique au contact d'intrusions basiques, Satakunta: 260-300 °C Muhos = 280 - 330°C
Conditions Rédox	Hématite autour des grains = conditions oxydantes lors de la diagenèse	Hématite autour des grains = conditions oxydantes lors de la diagenèse	Hématite + anhydrite = conditions oxydantes, globule carboné + sulfates = conditions réductrices locales	hématite autour des grains = conditions oxydantes. Pyrite en veinules et nodules à la base de Muhos = pièges favorables au dépôt de l'U locaux.

Tableau V. 1 : comparaison des caractéristiques des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec celles d'Athabasca.

## 1. Nature du matériel sédimentaire et des conditions de sédimentation

Les sédiments clastiques des bassins de l'Athabasca (*Kotzer et Kyser 1995; Renac et al., 2002; Kister et al., 2003*) et de Kombolgie ont un degré de maturité très élevé et constitués presque seulement de quartz avec de faibles proportions de kaolinite et d'illite. Par contre les sédiments, de Satakunta, Muhos, Cariewerloo, et Waterberg sont plus pauvres en quartz et riches en feldspath potassique, parfois en plagioclase et en biotite, et les minéraux accessoires sont souvent très abondants, et présentent donc une maturité beaucoup plus faible. Ces caractéristiques sont plutôt similaires à celles du bassin de Pasha Ladoga en Karélie (Russie) qui n'est que très faiblement minéralisé en uranium (*Lobaev et al., 2005*). La forme anguleuse, d'une proportion variable, des particules détritiques dans les sédiments, indique une faible distance de transport de ces matériaux. La grande puissance des formations silicoclastiques (1250 - 1500 m pour la formation Mogalakwena à Waterberg, 1800 m pour

Satakunta, 1600 m pour Cariewerloo), le transport faible des matériaux, leur faible maturité, la localisation de ces remplissages sédimentaires dans des grabens, reflètent l'existence d'une activité tectonique importante lors de la sédimentation de ces roches.

Les caractéristiques des assemblages minéralogiques prédominants des sédiments de ces différents bassins peuvent être comparées dans le diagramme quartz/feldspaths/argiles (Fig. V. 1). Les formations silicoclastiques des bassins étudiés ici, apparaissent globalement beaucoup plus pauvres en quartz et beaucoup plus riches en feldspath et argiles que celles des bassins minéralisés de référence, que l'on prenne un sondage éloigné de toute minéralisation localisé au centre du bassin Athabasca (Rumple Lake), ou un sondage localisé à proximité du gisement associé à une discordance Protérozoïque le plus riche et le plus important (McArthur River) également dans le bassin Athabasca.

Parmi les différents bassins étudiés, les sédiments silicoclastiques des bassins de Satakunta et de Muhos sont les plus riches en feldspaths. Les argiles n'apparaissent en proportions significatives que dans une faible proportion d'échantillons qui correspondent en fait à des siltites. Ensuite, les sédiments silicoclastiques du bassin de Waterberg sont pour moitié essentiellement composés de quartz et de feldspaths comme ceux de Satakunta et pour moitié de quartz et d'argiles, avec une faible proportion de feldspaths. Cependant, dans ces derniers, une forte proportion des argiles dérive de l'altération de feldspaths détritiques. Par contre les sédiments silicoclastiques du bassin de Cariewerloo sont essentiellement composés de quartz et d'argiles avec des proportions variables de feldspaths. Seuls quelques échantillons des bassins de Muhos et de Cariewerloo présentent des teneurs en quartz aussi importantes que celles rencontrées dans les grès des bassins de L'Athabasca et de Kombolgie.

Les conglomérats de ces différents ensembles sédimentaires sont généralement polymictes tandis que ceux des bassins fortement minéralisés de référence sont généralement monomictes en cohérence avec le caractère moins mature des sédiments des bassins étudiés.

D'une manière générale la charge carbonatée dans les sédiments silicoclastiques des différents bassins reste très faible, comme l'indique l'absence de valeurs négative du paramètre A en dehors de quelques échantillons du bassin de Muhos (Fig. V. 1).

La fraction argileuse des grès non minéralisés de l'Athabasca (sondage de Rumple Lake) est particulièrement riche en kaolinite avec des proportions variables mais toujours faibles d'illite, alors que les grès minéralisés localisés au voisinage des minéralisations d'uranium de McArthur River contiennent principalement de la chlorite avec des proportions variables

d'illite (Fig. V. 1). Les échantillons les plus argileux de Rumble Lake dans le diagramme Q-A correspondent à des horizons fins de siltite.

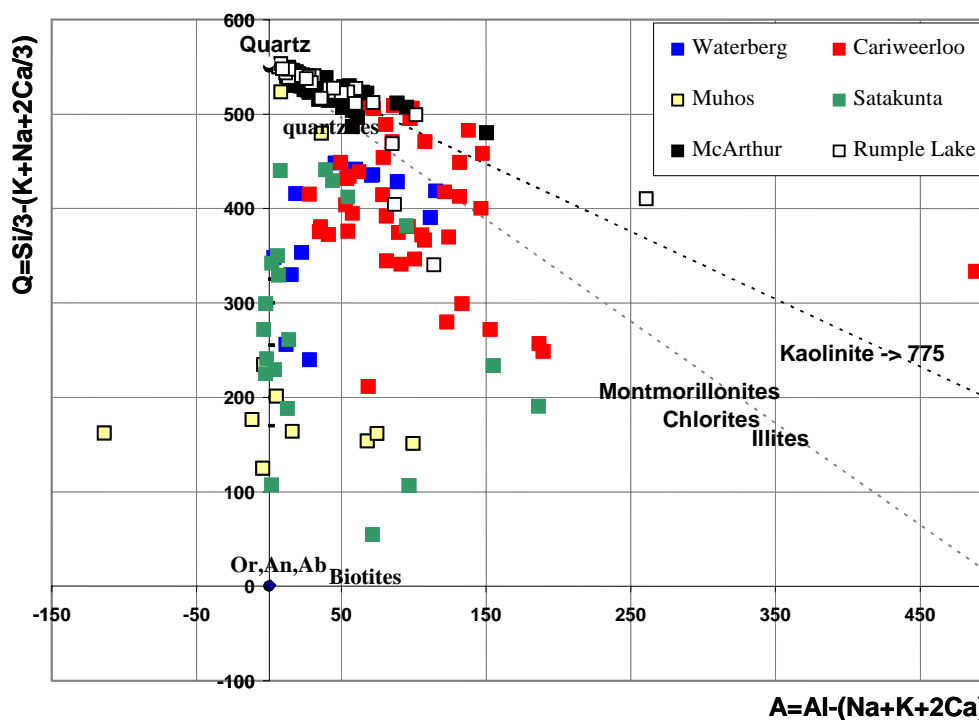


Figure V. 1 : Composition minéralogique des sédiments des bassins de Waterberg, Cariweerlo, Satakunta et Muhos comparées à celles des sédiments du bassin de l'Athabasca (Rumble Lake sondage de référence loin de minéralisations), et McArthur River (sondages provenant de l'environnement du gisement) (source : banque de données CREGU) dans un diagramme chimico-minéralogique Quartz – indice de peraluminosité.

Les principaux minéraux des argiles qui ont été rencontrés dans les bassins étudiés sont l'illite et ensuite la kaolinite. Les chlorites croissent généralement dans la matrice (comme sous forme de rosettes entre les grains (les plus importants à Cariweerlo «U I & U IV), puis Waterberg (surtout près de diabase), Muhos (localement dans la matrice), Satakunta (peu fréquentes dans la matrice)), ou en remplacement de minéraux arrondis correspondant le plus souvent à des feldspaths détritiques (Cariweerlo - Waterberg), lors de la diagenèse.

Les rapports K/Rb dans les sédiments de Cariweerlo, Satakunta et Muhos sont faibles, de l'ordre de 200 pour les sédiments les moins potassiques et proches de 100 pour de nombreux échantillons ayant des teneurs en K supérieures à 3,5 % poids (Fig. V. 2). Les valeurs les plus élevées indiquent un contrôle dominant des rapports K/Rb par le feldspath potassique, alors que les rapports les plus faibles marquent un contrôle majeur par les phases micacées (biotite, muscovite, illite) correspondant à ce qui est observé en lames minces et aux valeurs du

paramètre A (Fig. V – 1). Les rapports K/Rb de ces sédiments sont typiques d'une dérivation à partir d'une source plutonique et/ou métamorphique d'intensité inférieure à celle du faciès granulite. Par contre les sédiments silicoclastiques du bassin Waterberg se distinguent nettement par des rapports K/Rb beaucoup plus élevés (500 à plus de 1000) et égales voir supérieurs à ceux rencontrés dans le bassin de l'Athabasca. Les fortes valeurs du rapport K/Rb proviennent soit d'un lessivage du rubidium pendant la diagenèse, lors de l'altération des feldspaths détritiques en kaolinite, soit représentent la signature d'une source essentiellement granulitique des sédiments, le métamorphisme granulitique étant accompagné d'une perte en rubidium lors de la déshydratation de tous les minéraux phylliteux (*Barbey et Cuney, 1982*).

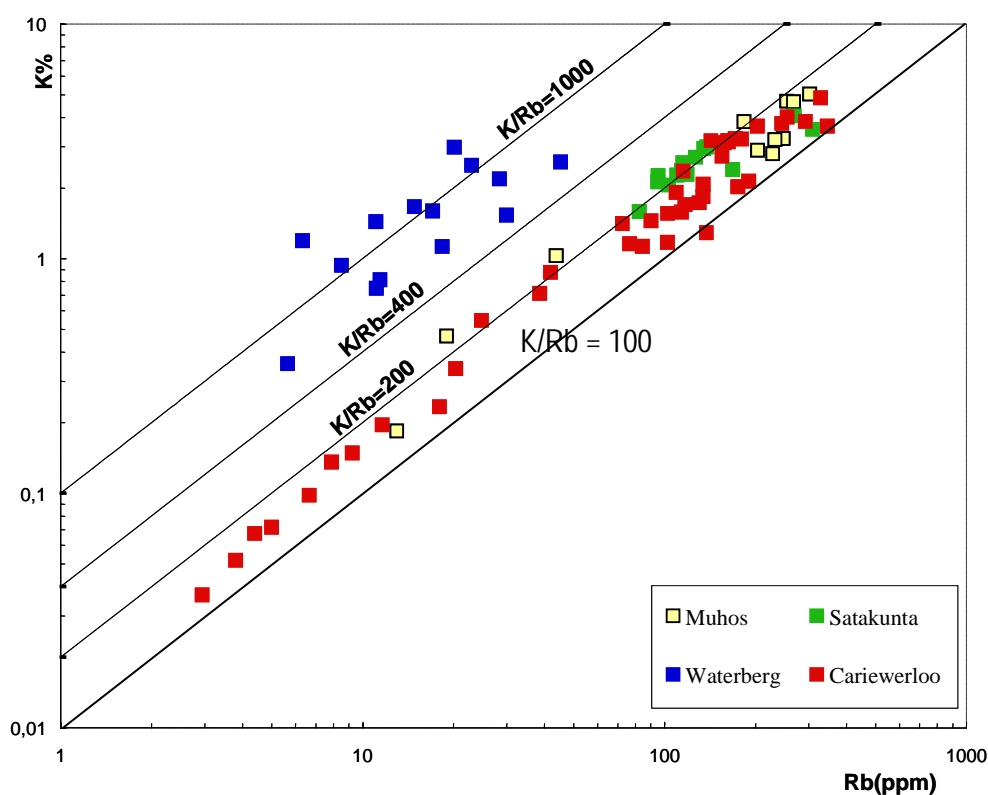


Figure V. 2 : Diagramme K-Rb des sédiments silicoclastiques des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos. Zone jaune = les valeurs de Rumble Lake et de McArthur River.

## 2. Caractéristiques de l'évolution diagénétique et de la perméabilité des sédiments

Les premiers processus diagénétiques observés dans les sédiments sont les auréoles de surcroissance autour des grains détritiques de quartz, généralement mieux développées dans les grès et les conglomérats. Cette surcroissance résulte de la dissolution des grains détritiques de quartz, aux joints de grain, sous la pression de la pile sédimentaire. Les silicifications diagénétiques les plus importantes ont été observées à Satakunta et à Cariewerloo (35 % des sédiments, dans différents niveaux des unités III et IV) et sont plus faibles dans les bassins de Muhos et Waterberg. Des surcroissances d'adulaire sont, par contre, communes dans les grès du bassin de Waterberg. Dans le cas du bassin de Satakunta la très forte silicification résulte probablement du métamorphisme thermique induit par la mise en place des filons et sills de diabase abondants dans cette partie du bassin. Elle est également accompagnée par la néoformation de laumontite observée dans tous les types de sédiments (grès, conglomérats, siltites) et qui a cristallisé après les surcroissances de quartz, en remplissant complètement la porosité initiale. Ces processus ont diminué de manière drastique la perméabilité des formations silicoclastiques pour les circulations fluides post-diagénétiques dans cette partie du bassin. De même, mais de manière plus locale et à plus haute température dans le bassin de Waterberg, le métamorphisme thermique développé au contact avec des sills basiques à ultrabasiques, des pyroxènes et des spinelles ont cristallisé dans la matrice des grès.

La matrice des formations silicoclastiques des bassins de Cariewerloo et Waterberg est de nature plus argileuse et présente en proportion beaucoup plus importante que dans les bassins de Satakunta et de Muhos et les bassins de référence. Ces argiles sont en partie d'origine détritique, plus moins modifiées par la diagenèse, mais résultent aussi parfois du remplacement d'anciens grains de feldspaths détritiques, en particulier dans le bassin de Waterberg. Cette proportion importante d'argile dans la matrice de ces sédiments a contribué également à diminuer fortement la porosité de ces formations et donc empêché une circulation importante des fluides diagénétiques.

Par ailleurs la présence d'un ciment tardif de nature carbonaté dans la matrice des grès a été observé principalement dans certains niveaux des bassins de Muhos ainsi que de celui de Cariewerloo avec pour ce dernier un ciment constitué d'hématite et/ou de carbonates (dolomite) qui ont cristallisé après les surcroissances de quartz et ont complètement obturé la porosité initiale. Les unités les plus perméables du bassin de Cariewerloo sont localisées dans

les unités I et IV, mais elles représentent seulement 10 à 20 % d'entre elles. Ces observations montrent que pendant et après la diagenèse il n'y a pas eu également y avoir de forte et de longue percolation des fluides dans la majeure partie de ce dernier bassin, contrairement à ceux de l'Athabasca et de Kombolgie.

Certains grains de quartz peuvent toutefois être localement corrodés, en général par les chlorites vertes néoformées. Les néoformations chloritiques les plus fréquentes sont observées à Muhos puis à Cariewerloo. De même en cohérence avec la faible importance de la silicification diagénétique, les événements tardi à post-diagénétiques sont mieux développés à Muhos (à proximité de la discordance) et beaucoup plus à Cariewerloo (unités I et IV) avec néoformation de pyrite et de carbonates.

### 3. Les bassins comme source d'uranium

Une série de paramètres géochimiques mis au point ces dernières années par le laboratoire, permettent d'évaluer le fonctionnement des bassins sédimentaires silicoclastiques pour l'intensité relative des circulations fluides syn- à post-diagénétiques et de l'agressivité de ces fluides pour l'altération des minéraux accessoires (monazite et zircon surtout) dont certains d'entre eux (monazite principalement) peuvent représenter des sources d'uranium potentielles pour la genèse de minéralisations uranifères du type de celles associées aux discordances Protérozoïques.

#### → *Abondance des minéraux accessoires porteurs d'uranium*

L'abondance des minéraux accessoires uranifères est indiquée par les concentrations en roche totale de Th et des Terres Rares Légères pour la monazite, de Zr pour le zircon, d'Y et Terres Rares Lourdes pour le xénotime et de Nb - Ta pour des niobotantalates (voir chapitre III). Les abondances moyennes sont données dans le tableau V. 2 ci-dessous et comparées avec celles mesurées dans un sondage localisé loin des minéralisations (Rumple Lake) et un situé au voisinage de celles-ci (Mc Arthur River) dans le bassin Athabasca. Le diagramme araignée de la figure V. 3 montre clairement que la quasi-totalité des sédiments des bassins étudiés dans ce mémoire sont beaucoup plus riches en minéraux accessoires que ceux des bassins de l'Athabasca. La plus forte variabilité en termes de teneurs en minéraux accessoires est observée dans le bassin de Cariewerloo.

	Waterberg	Cariewerloo	Satakunta	Muhos	Rumple Lake	McArthur River
nb d'échantillon	14	46	20	11	30	47
Th ppm	17,1 ± 16,5	17,2 ± 18	13,8 ± 11,54	9,8 ± 3,8	7,9 ± 10,2	18,7 ± 20,3
U ppm	2,6 ± 1,5	3,5 ± 2,7	4,3 ± 2,4	5,2 ± 3,1	1,1 ± 0,7	5,4 ± 5,4
La ppm	38,5 ± 28,4	38,9 ± 27,4	31,5 ± 20,9	32,9 ± 13,1	16,4 ± 11,1	21,4 ± 17,5
Zr ppm	196,1 ± 106,2	239,2 ± 211,5	146,4 ± 89,1	168,3 ± 35,3	166,8 ± 179,4	261,9 ± 207,6
Y ppm	16,9 ± 9	19,5 ± 15,4	16,1 ± 10,4	22,6 ± 8,4	4 ± 3,7	7,9 ± 8,7
Nb ppm	4 ± 2	9,3 ± 7,6	6,7 ± 7,1	8,2 ± 3,9	4,3 ± 9,5	4,8 ± 4,8
Ta ppm	0,5 ± 0,3	1 ± 0,8	1 ± 1	0,8 ± 0,4	0,4 ± 0,7	0,6 ± 0,7
∑REE	163,4 ± 115,3	170,1 ± 115,5	1129,9 ± 471,4	2162,8 ± 1157,5	68,5 ± 44,2	97,6 ± 82,2

Tableau V. 2 : comparatif des valeurs moyennes et des écarts types des éléments : Th, U, La, Zr, Y, Nb, Ta, et ∑REE dans les bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec celles de l'Athabasca.

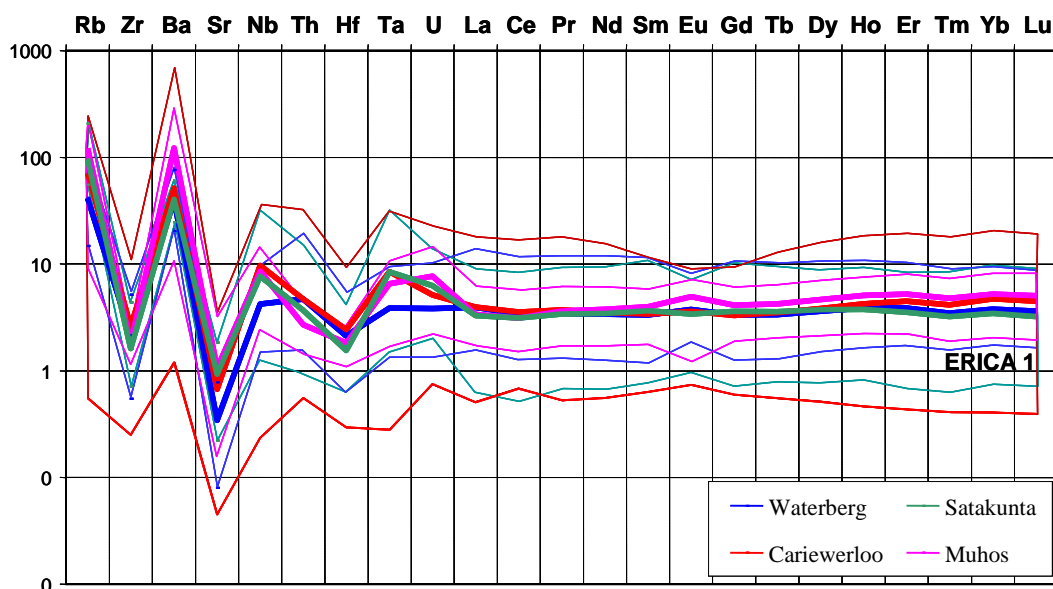


Figure V. 3 : Normalisation des éléments en trace des grès de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et de Muhos à la moyenne des grès du sondage Erica 1 (Athabasca).

### → Lessivage des terres rares lourdes et rapports $Ho_{(N)}/Ho^*$

Dans les bassins protérozoïques associés à des gisements d'uranium importants, les grès présentent des spectres de terres rares lourdes en forme de cuvette au niveau des terres rares lourdes intermédiaires (Fig. V. 3). Ceci indique un lessivage de ces éléments par les fluides minéralisateurs, car de manière complémentaire les oxydes d'uranium déposés dans les gisements montrent un spectre en cloche avec une forte abondance des terres rares lourdes intermédiaires et une décroissance rapide de part et d'autre des terres rares les plus lourdes et des terres rares légères (Kister, 2003; Bonhoure, 2007). Afin de quantifier la perte en terres

rare lourdes intermédiaires nous avons utilisé le rapport  $Ho_{(N)}/Ho^*$ , donnant une mesure de l'appauvrissement en terres rares lourdes intermédiaires par rapport à un spectre « normal » de sédiment.

Dans les bassins minéralisés, tel que celui de l'Athabasca, le lessivage important des terres rares lourdes intermédiaires conduit à des valeurs de ce rapport inférieures à 0,8, que l'on soit au voisinage d'une zone minéralisée (McArthur River) ou non (Rumple Lake) et pouvant atteindre 0,3 (Fig. V. 4). Pour les sédiments de Muhos et de Satakunta les valeurs du rapport  $Ho_{(N)}/Ho^*$  ne sont que légèrement inférieures à 1. Seuls quelques échantillons du bassin de Cariewerloo et un seul de Waterberg ont un rapport  $Ho_{(N)}/Ho^* < 0.7$  correspondant aux valeurs des grès « fertiles ». Ainsi la mobilisation des terres rares lourdes est très peu marquée voir absente dans les grès des différents bassins étudiés.

#### → *Altération de la monazite et rapports Th/La*

Les valeurs du rapport Th/La indiquant la mobilité relative des terres rare légères par rapport au thorium lors de l'altération de la monazite (Cuney et Mathieu, 2000). Les valeurs du rapport Th/La de la majorité des échantillons des 4 bassins étudiés, sont comprises entre 0.2 et 0.4, c'est-à-dire qu'elles sont semblables à celles des sédiments archéens et protérozoïques n'ayant pas subi d'altération diagénétique des cristaux de monazite. Seule une partie des sédiments de Waterberg et de Cariewerloo : 46 % des échantillons de Cariewerloo [21 sur un total de 46 échantillons] et 43 % des échantillons de Waterberg [6 sur un total de 14 échantillons], ont des rapports Th/La légèrement supérieurs à 0,4, avec toutefois des valeurs inférieures à 0,7 (sauf 3 échantillons), reflétant une faible perte en terres rares légères (Fig. V. 4). Ceci est cohérent avec les observations microscopiques qui ne montrent pas d'altération très marquée de la monazite dans les différents bassins étudiés, ni d'ailleurs de néoformations d'aluminophosphates-sulfates comme cela a été observé dans les sédiments des bassins de l'Athabasca et de Kombolgie.



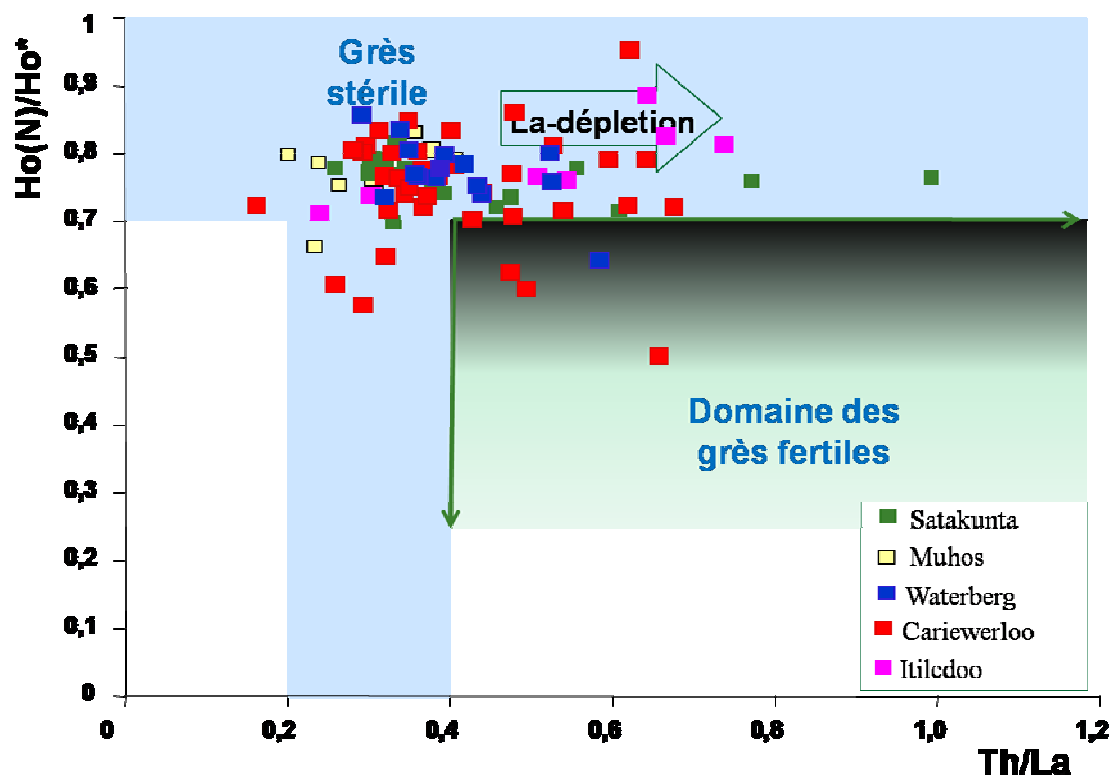


Figure V. 4 : Diagramme  $\text{Ho}(\text{N})/\text{Ho}^*$  -  $\text{Th}/\text{La}$  pour les sédiments de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos. Zones bleues = sédiments silicoclastiques archéens et protérozoïques n'ayant pas subi d'altération diagenétique.

→ *Teneurs en uranium et rapports Th/U*

Les proportions relatives d'uranium total et mobile ainsi que les rapports du  $\text{Th}/\text{U}$  permettent d'estimer l'importance de la mobilité de l'uranium (voir chapitre III). Les sédiments de l'Athabasca éloignés de toute minéralisation (sondage de Rumble Lake), montrent que la majorité des valeurs du rapport  $\text{Th}/\text{U}$  est inférieures à 4, surtout pour les concentrations les plus élevées en thorium, indiquant un départ d'uranium. Les rapports  $\text{Th}/\text{U}$  les plus faibles ne s'observent que pour des valeurs de  $\text{Th}$  inférieures à 6 ppm (Fig. V. 5). Par contre pour les sondages localisés dans l'environnement des minéralisations de McArthur River, la plupart des valeurs du rapport  $\text{Th}/\text{U}$  sont inférieures à 4 et marquent donc un enrichissement secondaire correspondant au halo géochimique anormal dans l'environnement des minéralisations.

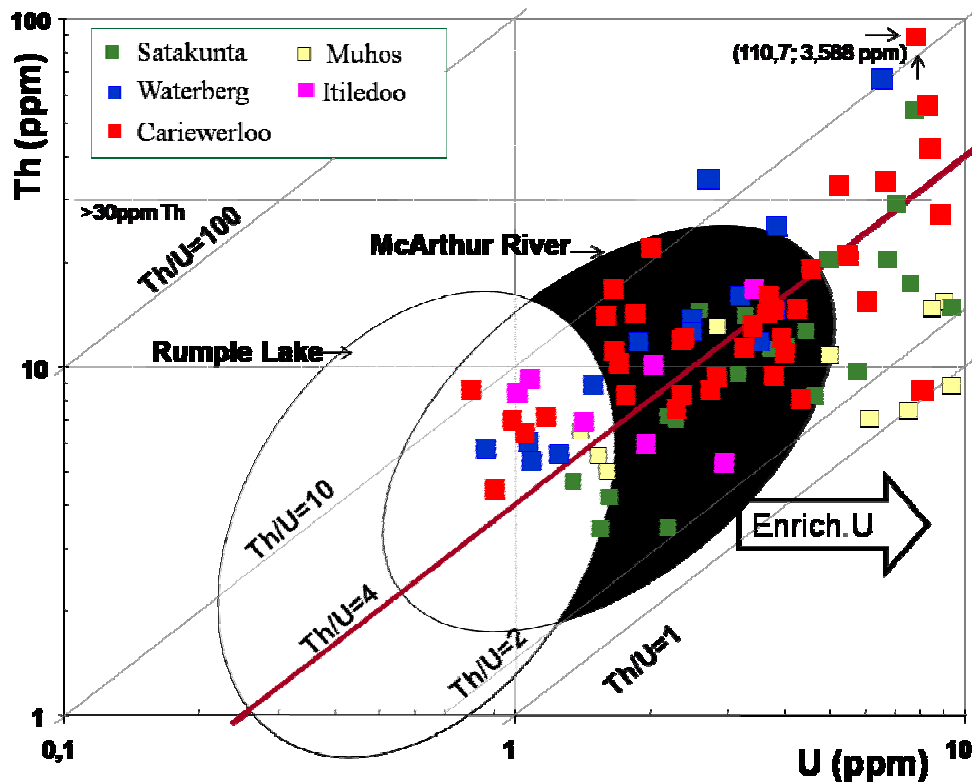


Figure V. 5: Diagramme Th - U pour les sédiments de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos.

Les teneurs en uranium total des sédiments des 4 bassins étudiés varient largement et sont en moyenne plus élevées que celles mesurées dans les zones loin des minéralisations uranifères du bassin d'Athabasca où elles sont généralement inférieures à 1 ppm, telles que celles du sondage de référence de Rumple Lake (Athabasca). Pour les bassins étudiés ces valeurs varient de 0,9 à 6,5 ppm U ( $m=2,6$ ,  $n=14$ ) pour le bassin de Waterberg, 0,8 à 14,4 ppm U, ( $m = 3,5$  ppm,  $n = 46$ ) pour celui de Cariewerloo, et 1,6 à 9,4 ppm U ( $m = 4,2$ ,  $n = 14$ ) pour Satakunta, et de 1,4 à 9,3 ppm U ( $m = 5,16$ ,  $n = 11$ ) dans le bassin de Muhos.

La plupart des échantillons des 4 bassins montrent des valeurs du rapport Th/U comprises entre 2 et 5, voisines de celle de la moyenne crustale (3,5 à 4), indiquant une faible mobilité de l'uranium dans les sédiments de ces bassins qui semblent avoir conservé leurs concentrations en uranium initiales (Fig. V. 5). En l'absence d'évidence d'altération hydrothermale particulière associée à ces valeurs (à Muhos les valeurs les plus faibles correspondent aux échantillons proches de la discordance avec seulement des filonnets de carbonates, d'autres présentent une altération argileuse semblable à celle observée dans les autres échantillons, sans caractéristiques particulières), cet enrichissement est considéré

comme un enrichissement initial local des sédiments qui n'a pas été remobilisé lors des circulations diagénétiques. Les rapports Th/U les plus élevés (jusqu'à 31 à Cariewerloo, 13 à Waterberg et 7 à Satakunta; 71 % des échantillons de Waterberg, 43 % de Cariewerloo et 18 % de Satakunta ont des valeurs de Th/U > 5) indiquent soit une perte en uranium dans ces échantillons, soit une dérivation du matériel sédimentaire de terrains granulitiques. Les forts rapports K/Rb observés pour les sédiments du bassin de Waterberg, qui présentent également la plus forte proportion de rapports Th/U élevés, suggèrent une source granulitique pour ceux-ci. Les échantillons du bassin de Cariewerloo montrent la plus grande dispersion des rapports Th/U avec certains présentant des rapports très élevés (10 à 31) suggérant un lessivage important d'uranium et d'autres enrichis avec des rapports Th/U jusqu'à 1. Il n'y a pas de lien observé entre les rapports les plus extrêmes et les altérations dans ces bassins.

#### → *Altération des zircons et rapports Zr/Y*

Des enrichissements en yttrium ont été observés dans les parties altérées des zircons dans des grès des bassins minéralisés associés à des gisements d'uranium et peuvent être également associés à la présence de minéraux accessoires détritiques riches en yttrium et plus accessoirement à des néoformations de xénotime au cours de la diagenèse. Le rapport Zr/Y des zircons sains est supérieur à 100 mais peut descendre jusqu'à 20 dans les zircons altérés des grès de l'Athabasca (Kister, 2003).

Les sédiments des bassins étudiés dans ce travail présentent des rapports Zr/Y nettement inférieurs à 20 (Fig. V. 6), mais ces formations étant beaucoup plus riches en minéraux accessoires détritiques et de nature beaucoup plus variée que dans le cas des sédiments des bassins de l'Athabasca et de Kombolgie, la présence de minéraux accessoires détritiques comme le xénotime, la titanite plus riches en yttrium que le zircon, en particulier dans les bassins de Satakunta et de Muhos peut être l'origine principale des faibles valeurs des rapports Zr/Y dans ces bassins.

Comme dans le cas des districts fortement minéralisés de l'Athabasca (Canada) et de Kombolgie (Australie), l'altération des zircons s'observe partout dans les formations clastiques des différents bassins étudiés et indique une circulation de fluides diagénétiques suffisamment agressifs pour attaquer la structure de ces minéraux habituellement extrêmement réfractaires.

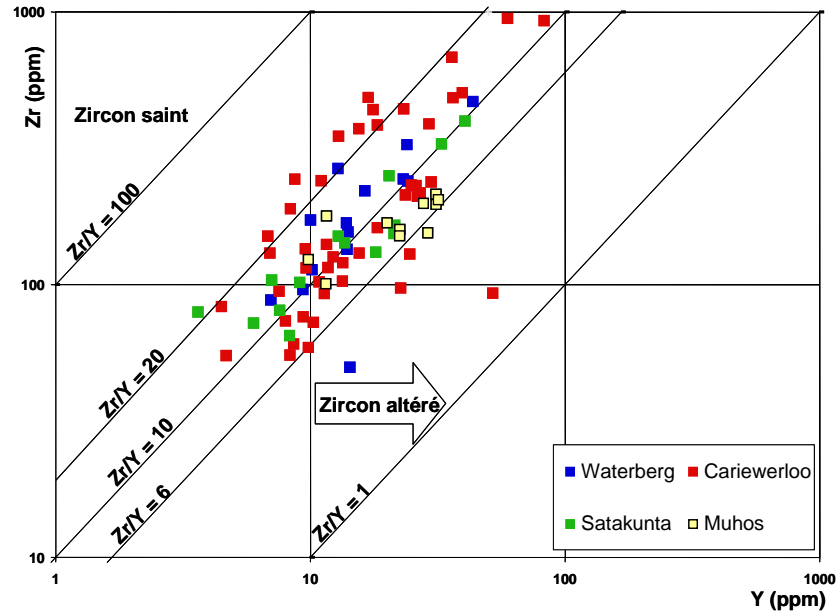


Figure V. 6 : Diagramme Zr - Y des sédiments des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta, Muhos. Zone jaune = valeurs pour Rumble Lake et de McArthur River.

L'intensité de cette altération est explicitée par le degré de substitution des éléments primaires de la structure des zircons (Zr, Si, Hf) par une variété d'éléments (Al, P, Ca, Fe, Y, Th, U) (Fig. V. 7). Parmi les 4 bassins, les zircons de Cariewerloo sont nettement les plus altérés, indiquant des fluides plus agressifs ou les circulations les plus importantes. Les zircons les moins altérés ont été observés dans le bassin de Waterberg.

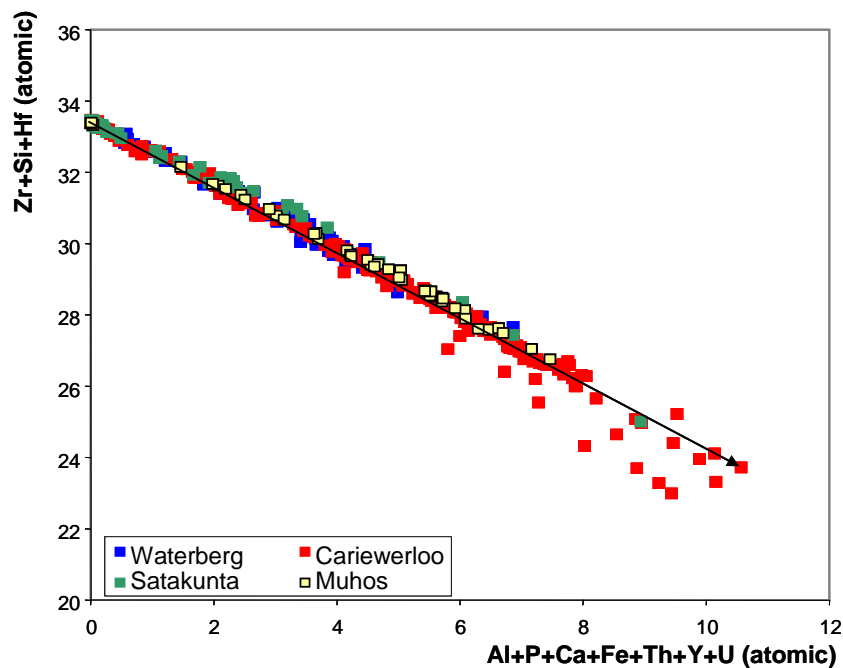


Figure V. 7 : Substitutions de Zr, Si et Hf par Al, P, Ca, Fe, Th, Y et U dans les zircons des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos.

#### 4. Conditions de pH

Les sédiments des quatre bassins étudiés sont relativement riches en feldspaths et généralement en feldspath potassique qui est le moins abondants dans le bassin de Cariewerloo. La présence de l'assemblage feldspath potassique – illite - quartz dans la plupart des formations de ces bassins tend le pH des fluides à l'équilibre vers des valeurs voisines de la neutralité. En revanche, l'assemblage kaolinite - illite – quartz observé systématiquement dans les bassins fortement minéralisés correspond à des conditions de pH plutôt acide pour les fluides en équilibre. Toutes les données expérimentales sur la solubilité de l'uranium (Guillaumont *et al.*; 2003, de Rai *et al.*, 1990 et de Yamamura *et al.*; 1998) ont montré que **UO<sub>2</sub> est un oxyde amphotère**, c'est-à-dire soluble en milieu acide et basique et peu soluble en milieu neutre (Fig. V. 8) entre des pH de 3 et 6 à 25 °C. A plus haute température (150 à 300 °C) le minimum de solubilité tend à se déplacer vers des pH plus alcalins. Ainsi les conditions optimales de solubilité pour l'U sont observées pour les fluides diagénétiques les plus acides déterminés par les paragenèses minérales des bassins de l'Athabasca et de Kombolgie, tandis que la solubilité de l'U devrait être nettement inférieure pour les pH plus alcalins déterminés par la présence de feldspaths alcalins stables. Il serait intéressant de pouvoir disposer de données expérimentales sur la solubilité de l'uranium correspondant à ces conditions de pH et aux températures et avec une composition de fluide correspondant à celles rencontrées dans les gisements d'uranium associés aux discordances.

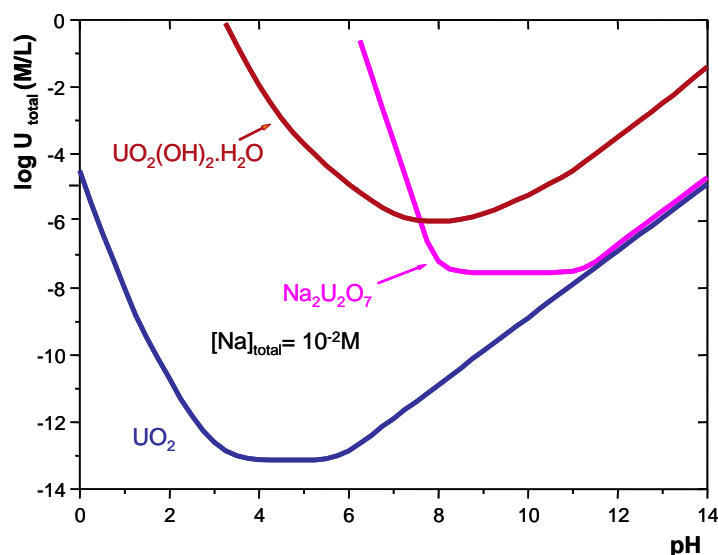


Figure V. 8 : Solubilité des oxydes d'uranium IV, VI et Na<sub>2</sub>U<sub>2</sub>O<sub>7</sub> en fonction de pH à T = 25 °C, P = 0.1 MPa, d'après les données thermodynamiques de Guillaumont *et al.*, 2003; de Rai *et al.*, 1990 et de Yamamura *et al.*, 1998, (calculé par Chinh Ngyen-Trung).

## 5. Conditions de $fO_2$

Pendant le dépôt et la diagenèse des sédiments, des conditions fortement oxydantes sont indiquées par la présence d'hématite située autour les grains détritiques de quartz et les surcroissances dans tous ces bassins (Waterberg – Satakunta – Muhos – Cariewerloo - Itiledoo) comme dans les bassins fertiles et caractéristiques des bassins sédimentaires intracontinentaux postérieurs à l'oxy-atmoversion et antérieurs au Dévonien. La présence de l'anhydrite dans le bassin de Cariewerloo, indique également la circulation des fluides salés oxydants.

Les conditions de  $fO_2$  peuvent également être approchées à partir de la composition des chlorites. Les chlorites très magnésiennes caractéristiques des enveloppes d'altération des gisements d'uranium de type discordance reflètent la richesse en Mg du fluide associé. Cette caractéristique révèle le caractère très oxydant de ce fluide qui ne permet pas la solubilisation du fer, très peu soluble sous sa forme trivalente. Dans le diagramme triangulaire de la figure V. 9 les chlorites de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos sont toutes des chlorites trioctaédriques généralement très riches en fer contrairement aux chlorites de l'Athabasca qui sont des chlorites di-trioctaédrique riches en Al et Mg de type sudoïte. Ceci reflète des conditions plus réductrices des fluides diagénétiques/hydrothermaux dans les bassins étudiés et donc des conditions redox moins favorables au transport de l'U que pour l'Athabasca.

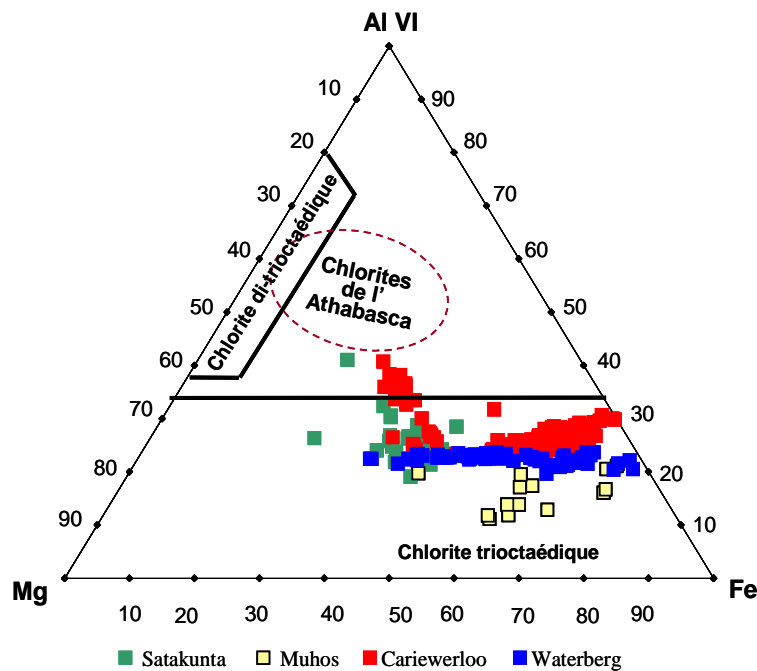


Figure V. 9 : Classification des chlorites de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et de Muhos dans le diagramme triangulaire Al VI - Mg - Fe. (chlorites de l'Athabasca, *Lorilleux, 2001*).

Le bleaching observé dans les 50 m inférieur du sondage Pori 1 dans le bassin de Satakunta reflète des circulations des fluides réduits. Cette observation, associée à la néoformation locale de filonnets à carbonates et pyrite et de concrétions pyriteuses dans ce bassin sont des indices intéressants pour la création possible de pièges réducteurs favorables au dépôt de l'uranium.

La présence de pyrite à la base du bassin de Muhos, montre l'invasion locale du bassin par des fluides réducteurs qui peuvent représenter un piège intéressant pour des fluides oxydants riches en uranium.

Dans les sédiments du bassin de Cariewerloo (unités I, III et IV), plusieurs évidences de circulations de fluides réducteurs pendant ou après la diagenèse ont été décelées :

- existence de blanchiment des grès, initialement rouges, dans des zones verticales associé à des altérations importantes dans l'unité I, mais dont l'importance diminue vers la discordance,

- la présence d'un globule carboné noir observé dans un gritstone de la formation IV, semblable aux globules décrits à proximité des gisements d'uranium de discordance du Saskatchewan,

- la présence de la pyrite, de la chalcopryrite et de la pyrrhotite également dans la formation IV, associés à des grains du carbonate et des sulfates localisés dans les fractures ou disséminés dans la roche.

## 6. Evidences d'une altération hydrothermale

Les altérations associées aux minéralisations dans les bassins de Athabasca et de Kombolgie sont très intenses: ainsi, à Cigar Lake, on observe du cœur vers la périphérie, une zone d'altération grise dans les grès, marquée par une dissolution du quartz, une augmentation des argiles et des sulfures de fer, puis une zone siliceuse, avec des fractures ouvertes à quartz automorphe, enfin une zone des argiles massives, tendre, puis indurée (illite Fe, chlorite Fe-Mg, ferri-kaolin, sidérite) qui contient la minéralisation perchée. Le socle sous-jacent montre également une zone à chlorite massive, des globules de matériaux carbonés, avec une destruction des textures métamorphiques. L'altération du socle au voisinage de l'interface avec la couverture peut atteindre 200 m de profondeur.

La perméabilité du bassin de Muhos apparaît la plus importante et montre les événements post-diagénétiques les plus développés : des silicifications faibles, des veinules de carbonate et de pyrite fréquentes, une chloritisation et argilisation bien développées dans la matrice.

L'altération hydrothermale dans le bassin de Cariewerloo s'accompagne par une dissolution importante des minéraux clastiques (feldspath, hématite et quartz), la néoformation de chlorite et de carbonates, et sulfuration intensive ultérieure (avec pyrite, pyrrhotite, et chalcopirite) (dans des fractures et/ou dans la matrice). De telles caractéristiques peuvent refléter la percolation d'un fluide plus réduit que les fluides diagénétiques et favorable pour la précipitation d'une minéralisation uranifère.

Les rapports Th/U relativement bas de la plupart des sédiments n'indiquent pas un lessivage significatif de l'uranium. Les rapports Th/La principalement compris entre 0.2 et 0.4 indiquent également l'absence d'une altération importante de la monazite, en conformité avec les observations réalisées en lame mince et contrairement aux observations faites dans les bassins fortement minéralisés en uranium.

Enfin, l'abondance de la fraction argileuse dans la plupart de ces bassins, les silicifications pervasives dans le bassin de Satakunta indiquent de faibles circulations fluides diagénétiques qui sont défavorables à la mobilisation de l'uranium et donc à son dépôt sous forme de minéralisations uranifères.

## 7. Evolution pression - température des bassins

Les fluides de la diagenèse associés à la formation des minéralisations uranifères présentent une forte salinité et une température de 150 à 200 °C dans l'Athabasca et de  $150 \pm 15$  °C dans le bassin Kombolgie d'après les données des inclusions fluides (*Derome et al., 2005; 2006*). Le dépôt de l'uranium résulterait de mélange entre des fluides oxydant du bassin, mis en convection libre, et des fluides réducteurs provenant du socle, peut-être issus de processus métamorphiques (*Raffensperger et Garven, 1995; Kotzer et Kyser, 1995*). La précipitation aurait lieu à l'interface entre le socle et les sédiments, une interface originelle d'oxydoréduction.

Dans les bassins de Waterberg, Satakunta et Muhos des températures beaucoup plus élevées ont été estimées à partir de la composition des chlorites néoformés >330 °C, 260 à 300 °C et 280 à 330 °C respectivement. Ces néoformations de hautes températures ne sont pas accompagnés par des déformations et doivent donc plutôt correspondre à un métamorphisme



purement thermique. Ceci est confirmé à Waterberg par la présence de pyroxène et de spinelles dans le grès à 1411,6 m indiquent l'influence des intrusions de diabase et de roches ultrabasiqes (serpentinites) qui recourent ce bassin probablement vers sa base comme la dolérite Oenpelli du bassin de Kombolgie en Australie. La présence d'inclusions fluides carboniques dans les ciments diagénétiques des bassins de Satakunta et de Waterberg représente typiquement la phase vapeur de telles intrusions basiques et non pas un fluide diagénétique. Ces inclusions carboniques représentent un argument supplémentaire pour assigner l'événement thermique, observé dans ces bassins, à des intrusions basiques et non pas à un enfouissement extrêmement important des formations sédimentaires.

Dans le cas du bassin de Satakunta, l'effet thermique des intrusions basiques a été démontré également par les âges K-Ar à 1,24 Ga, semblable à celui de ces intrusions, sur les feldspaths potassiques des microconglomérats du sondage R6 caractérisés par des surcroissances autour les cristaux détritiques d'épidote et de titanite qui exigent des températures élevées ( $\geq 300$  °C). Alors que les feldspaths potassiques d'un conglomérat du sondage R1 dont les minéraux accessoires détritiques ne présentent pas de surcroissance donnent un âge de 1,79 Ga correspondant à l'âge des derniers granites potassiques radi-orogéniques svécofenniens représentant la source la plus probable de ces sédiments silicoclastiques.

Les chlorites néoformées dans le socle granitique de Muhos donnent des températures sensiblement inférieures (105 à 288 °C) et peuvent correspondre à l'épisode diagénétique (les températures les plus fréquentes sont comprises entre 270 - 280 °C).

Pour le bassin de Cariewerloo, les températures estimées à partir de la composition des chlorites néoformées sont également relativement élevées et varient entre 230 et 300 °C. Des mesures géochronologiques K-Ar ou Ar-Ar seraient également nécessaires pour déterminer à quel âge des températures aussi élevées ont été atteintes. L'infiltration de fluides dérivés de séquences évaporitiques ayant pu être présentes au-dessus des formations silicoclastiques du bassin de Cariewerloo a été démontré par l'observation de fractures remplies par des carbonates et d'anhydrite dans la formation de Pandurra.

## 8. Composition des fluides diagénétiques

L'étude des inclusions fluides dans les surcroissances diagénétiques des cristaux de quartz détritiques montre que la salinité des fluides diagénétiques dans les bassins de Waterberg et Satakunta, avec des températures de fusion de la glace souvent voisines de -25 °C (Tableau V.

3), est moindre que celles mesurées dans les bassins de Komolgie et d'Athabasca (*Derome et al., 2003*) (Fig. V. 10). Toutefois, les températures eutectiques élevées mesurées à Cariewerloo (Tableau V. 2) indiquent la présence des saumures diagénétiques riches en calcium, comme celles observées dans les bassins d'Athabasca et de Komolgie, et elles correspondent probablement au fluide dérivé d'évaporites mise en évidence de manière directe par la présence d'anhydrite préservée dans certains échantillons.

Bassin	T <sub>mice</sub>	Te	Th
Waterberg	-0,2 à -17,9 °C	-13,5 à -59,8 °C	Pas mesuré
Cariewerloo	-8 à -15 °C	-23 à -54 °C	160 à 340 °C
Satakunta	-0,2 à -5,5 °C	Pas mesuré	237,7 à 365,4 °C
Komolgie	-9,9 à -45 °C	Pas mesuré	89 à 181 °C

Tableau V. 3 : Valeurs des températures de fin de fusion de la glace, de la fusion eutectique, et d'homogénéisation dans les inclusions fluides des bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Komolgie. Valeurs pour Komolgie d'après *Derome et al., 2003*.

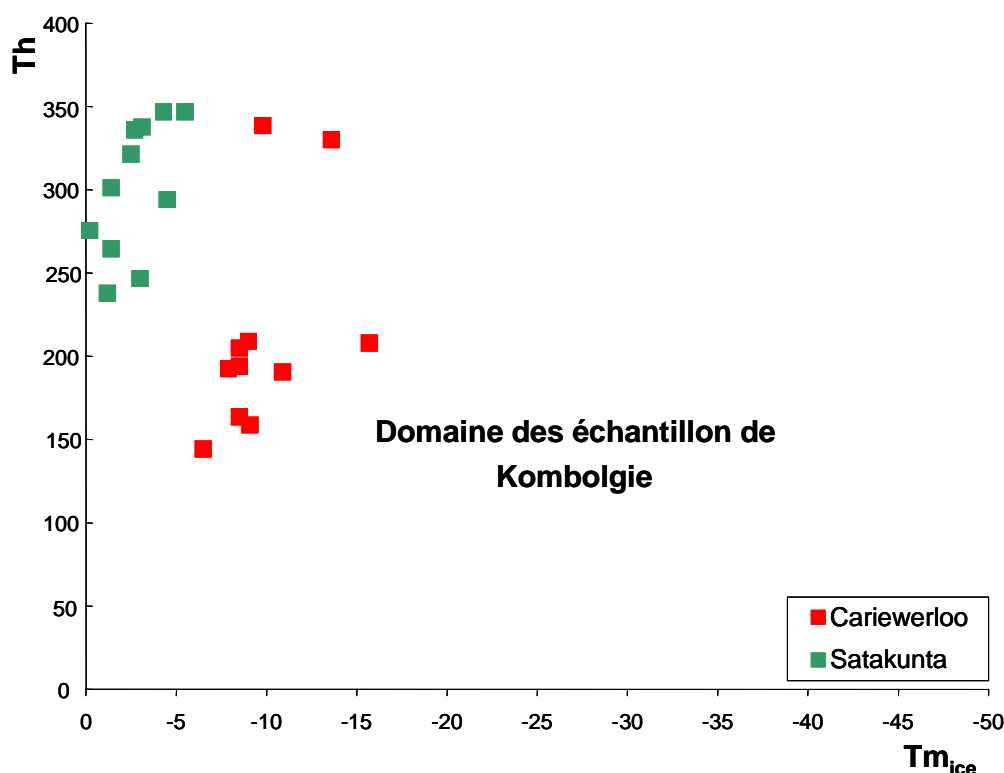


Figure V. 10 : Diagramme T<sub>mice</sub>/Th obtenu des surcroissances de quartz des grès des bassins de Cariewerloo, de Satakunta et de Komolgie. Les données de Komolgie d'après *Derome et al., 2003*.

## 9. Favorabilités du socle en tant que source ou piège pour l'uranium

Les formations du socle sous le bassin de Satakunta ont été intersectées uniquement sur quelques mètres par les sondages R1 et R6. Ce sont des micaschistes graphiteux correspondant à d'anciens shales noirs. Les schistes graphiteux représentent des pièges potentiels réducteurs pour le dépôt de l'uranium. La paragenèse à feldspath potassique–biotite–sillimanite indique des conditions de métamorphisme du faciès amphibolite supérieur. Les pegmatoïdes sont, probablement, des produits de fusion partielle injectés dans ces métasédiments. Les caractéristiques générales des formations du socle du bassin de Satakunta sont donc très similaires à celles observées sous les bassins de l'Athabasca et de Kombolgie, excepté l'absence de formations carbonatées.

Cependant, la séricitisation des plagioclases et la chloritisation des biotites, dans le socle du bassin de Satakunta, sont attribués à une évolution du métamorphisme rétrograde plutôt qu'à des circulations fluides du bassin car ces altérations ne sont pas développées de manière plus importante à proximité de la discordance. La seule altération pouvant être synchrone de la diagenèse du bassin correspond à des filonnets de calcite dans un micaschiste du sondage R6. Ces observations sont conformes à la très forte silicification des formations sédimentaires de ce bassin qui a du être rédhibitoire pour la circulation des saumures diagénétiques nécessaire à la création de transferts de matière important conduisant à la formation de concentrations métallifères.

Les formations du socle rencontrées sous le bassin de Muhos correspondent à des granites ou des gneiss mafiques. Le granite montre une fracturation avec remplissage chronologique par de l'adulaire, du quartz et finalement de la chlorite. Les températures estimées pour la cristallisation des chlorites (105 – 288 °C) et la présence d'oxydes de fer dans les clivages des micas du granite ainsi que la forte altération argileuse développée dans le gneiss mafique associée à une hématisation intense montrent que ces altérations peuvent avoir été développées par les solutions diagénétiques en conformité avec le caractère globalement plus perméable observé pour les formations sédimentaires du bassin de Muhos.

Dans le bassin de Cariewerloo, les sondages qui intersectent le socle ont rencontré des roches métamorphiques, des granitoïdes de la suite Hiltaba et Gawler Range Volcanics, ces deux ensembles magmatiques étant de nature calco-alkaline fortement potassique et donc enrichis en uranium et en thorium (bien que non analysé dans le travail actuel). De telles lithologies représentent des sources d'uranium très favorables pour la genèse des minéralisations

uranifères. L'altération régolithique rouge (hématisation et chloritisation) développée dans le socle volcanique et métamorphique, représente également une indication favorable pour la mobilisation en uranium. Par ailleurs dans le socle du bassin d'Itiledoo, des fractures parallèles à la schistosité sont communes dans la Mangalo Schist Formation et la présence d'enduits de graphite peuvent représenter des pièges réducteurs potentiels pour le dépôt de l'uranium.

## 10. Contexte paléogéodynamique et paléolatitudes des bassins

Zhao et al (2002), Bleeker (2003) ont proposé que les continents, au Paléoprotérozoïque, sont entrés en collision pour former un supercontinent pré-Rodinia, appelé la Columbia ou la Nuna selon les auteurs. Il s'agit du premier véritable supercontinent qui s'est formé à la surface de la terre dont les différents blocs continentaux ont été amalgamés au cours des orogènes s'étant développés à l'échelle mondiale entre 2,1 et 1,8 Ga (Zhao et al., 2002, 2004, Bleeker, 2003, Fig. V. 11).

La formation de ce supercontinent est également suivie par de grands événements sédimentaires et magmatiques à l'échelle du globe :

- De très vastes bassins intracontinentaux gréseux sont formés entre 1,9 et 1,3 Ga. Ils sont fréquemment préservés dans des fossés d'effondrement ou des grandes voûtures de la croûte terrestre. Les formations représentant la base du remplissage sédimentaire sont constituées de puissantes séries (généralement supérieures au km) principalement composés de grès et de conglomérats rouges. Ces sédiments se sont essentiellement déposés en milieu continental, dans des paléo-environnements de type fluvial avec des systèmes de rivières en tresses, des lacs, cônes de déjection et deltaïques et parfois d'origine éolienne. La couleur rouge de ces sédiments reflète les conditions d'oxydation élevée des paléo - environnements de dépôt en milieu continental anté-dévonien dépourvus de plantes. Ces sédiments reposent en discordance sur des formations archéennes à paléoprotérozoïques. Certains bassins de ce type sont connus du fait de leur richesse en uranium. Les bassins de l'Athabasca (Amérique du Nord) et de Kombolgie (Australie) présente à leur base des sédiments extrêmement matures (composés presque seulement de quartz avec de faibles proportions de kaolinite et d'illite) très puissants.

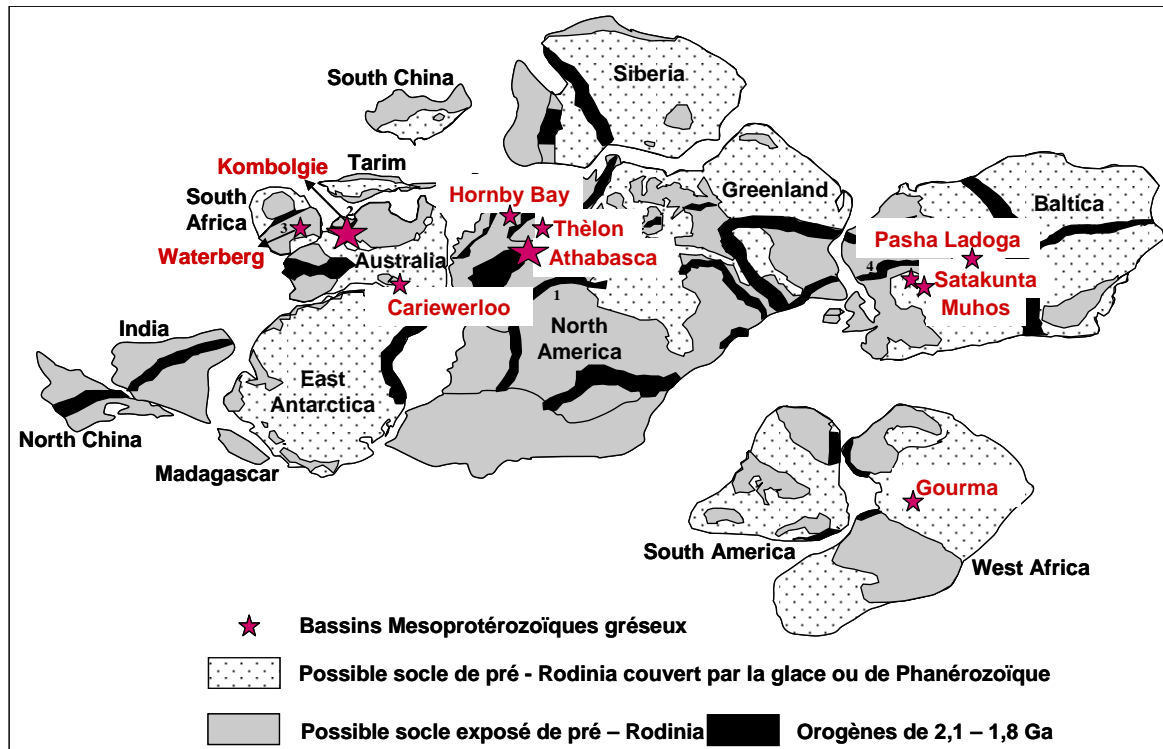


Figure V. 11 : Reconstruction du supercontinent Columbia (Zhao *et al.*, 2002, 2004) avec la position des bassins mésoprotérozoïques gréseux. Orogènes : 1. Trans-Hudson, 2. Top End, 3. Limpopo, 4. Svécofennien.

- Ensuite, la fragmentation du supercontinent Columbia a commencé il y a environ 1,6 Ga. Ceci s'est traduit par des riftings continentaux plus ou moins importants avec la mise en place de dykes de diabase, des granites calco-alcalins fortement potassiques de type rapakivi (1,59 - 1,54 Ga), et des rhyolites associées. La dislocation finale du supercontinent s'est produite vers 1,3 - 1,2 Ga, et est marquée par la mise en place d'une nouvelle génération de dykes mafiques (ex. : dykes de McKenzie au NW de l'Amérique du Nord) et par des éruptions basaltiques.

Dans le bouclier Fennoscandien, il y a une grande différence d'âge (~ 300 Ma) entre la fin de l'orogénèse svécofennienne (1,78 Ga) et le remplissage des bassins intracontinentaux mésoprotérozoïques finlandais et Pasha Ladoga qui est postérieur à la mise en place des granites rapakivi (1,50 Ga). Le dépôt de sédiments détritiques polymictes, renfermant des clastes souvent anguleux, dans des fossés d'effondrement très profonds (Pasha Ladoga = 800 m, Muhos = 975 m et Satakunta = 1800 m) suggèrent un transport rapide et une tectonique syn-sédimentaire active. Par contre, les bassins de l'Athabasca et de Kombolgie ont une différence d'âge faible (~ 50 Ma) entre la fin de l'orogénèse hudsonienne (au Canada) vers

1,78 Ga (Schneider *et al.*, 2007) et Top End (en Australie) vers 1,78 Ga (Hein, 2002) et le remplissage des bassins vers 1,73 Ga correspondent à une sédimentation sur des surfaces beaucoup plus vaste avec des dépressions initiales beaucoup moins profondes et étroites et des dépôts très matures (extrêmement riches en quartz, dépourvus de feldspaths et pauvres en minéraux accessoires, particules détritiques bien arrondies).

La sédimentation dans le bassin de Waterberg, Kaapvaal Craton (Afrique du Sud) correspond aux dépôts les plus précoces (entre 1,9 – 1,7 Ga) après la période orogénique de type transhudson (l'orogène le plus proche correspondant dans cette partie du monde étant l'orogène Limpopo = 2 Ga). La forte immaturité des sédiments de ce bassin et leur forte épaisseur : 1250 - 1500 m pour la seule formation Mogalakwena (le groupe ayant une épaisseur stratigraphique composite de 7 kilomètres), suggèrent également une tectonique très active au moment de la sédimentation, 100 Ma après la fin de la dernière orogénèse dans cette région (Limpopo). Ces sédiments sont cependant plus matures que ceux de Satakunta et de Muhos déposés 300 Ma après la dernière orogénèse.

En Australie du Sud, le remplissage du bassin de Cariewerloo (1,42 – 1,58 Ga) a commencé tout de suite après l'orogénèse Kimban (1,82 - 1,58 Ga). La grande épaisseur des sédiments (au moins 1600 m), leur faible transport et maturité (ils sont cependant globalement plus matures que ceux de Waterberg, Muhos et Satakunta) résultent également d'une activité tectonique importante pendant la sédimentation de ces roches clastiques.

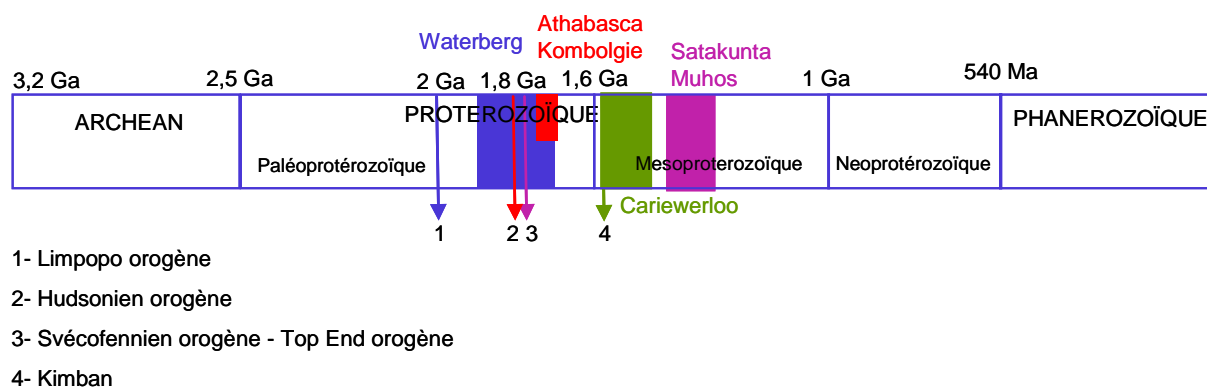


Figure V. 12 : Période de sédimentation des bassins gréseux étudiés et des bassins fortement minéralisés en uranium sur l'échelle des temps géologiques. Les orogènes majeurs sont également indiqués.

La différence d'âge entre l'orogénèse, l'érosion et le remplissage de ces différents bassins, suggère l'influence d'un autre mécanisme pour expliquer le degré de maturité des sédiments qui peut être le pouvoir plus ou moins hydrolysant du paléoclimat régnant dans la zone source pendant la sédimentation.

Enfin l'ensemble des bassins étudiés dans ce travail (Waterberg, Cariewerloo, Itiledoo, Satakunta et Muhos), montrent une immaturité beaucoup plus forte par rapport à ceux de l'Athabasca et de Kombolgie. Parmi les bassins étudiés, le bassin de Cariewerloo montre la plus grande maturité puis celui de Waterberg.

### 11. Evaluation de la favorabilité relative des bassins étudiés

Les caractéristiques générales de ces bassins sont plus proches de celui de Pasha Ladoga faiblement minéralisé localisé en Karélie (Russie). Le bassin de Cariewerloo en Australie (1,4 – 1,6 Ga) présente la meilleure favorabilité pour la genèse de minéralisations uranifères de type discordance parmi les bassins étudiés dans ce mémoire, mais elle reste toutefois modérée par rapport au potentiel des bassins fortement minéralisés de l'Athabasca et de Kombolgie (Tableau V. 4) :

Bassin	Athabasca	Pasha Ladoga	Cariewerloo	Waterberg	Muhos	Satakunta
Degré de maturité	+++++	+++++	++++	+++	++	+
Silicification	locale	faible	+++	++	+	++++
Altération	+++++	+++++	++++	+++	++	+
Altération des monazites	+++++	+	-	-	-	-
Altération des zircons	+++++	+++++	+	+++++	++	+++

Tableau V. 4 : Comparaison de degré de maturité, silicification, et altération entre les bassins de Waterberg, Cariewerloo, Satakunta et Muhos avec les bassins de l'Athabasca au Canada et de Pasha Ladoga en Russie.

- i. Les silicifications de certains niveaux stratigraphiques dans les sédiments silicoclastiques du bassin de Cariewerloo, la forte abondance de la matrice argileuse réduisent la perméabilité et ont limité fortement la percolation des circulations fluides post-diagénétiques. De plus des ciments riches en hématite ou en carbonates (dolomite) cristallisés après les surcroissances de quartz et bouchent complètement la porosité initiale. L'ensemble de ces observations indique l'absence des fortes et longues percolations fluides pendant et après la diagenèse dans la majeure partie du bassin ce qui n'est pas favorable pour la genèse de minéralisations uranifères de type discordance.
- ii. Bien que plus matures que les sédiments de Satakunta, Muhos et Waterberg, les sédiments du bassin de Cariewerloo contiennent toujours des feldspaths potassiques et parfois des plagioclases et les conglomérats sont fréquemment polymictes. La persistance du feldspath potassique conduit à des pH voisins de la neutralité pour les fluides à l'équilibre, ce qui est défavorable au transport de l'uranium.
- iii. L'abondance d'hématite autour des grains et la présence de sulfates (l'anhydrite) dans les fractures reflète le caractère fortement oxydant des conditions de sédimentation qui a conféré ensuite un caractère fortement oxydant aux solutions diagénétiques favorable au transport de l'uranium. Par ailleurs, le blanchiment des grès observé dans les certains horizons des sédiments et qui diminue vers la discordance et les zones d'altération importante reflète des circulations des fluides réducteurs pendant ou après la diagenèse qui ont pu jouer un rôle pour la précipitation éventuelle de l'uranium. De même les chlorites ferrifères néoformées dans la matrice des grès indiquent des conditions plus réductrices pendant l'altération. D'autres évidences de la présence de conditions réductrices postdiagénétiques sont données par la présence d'un globule carboné noir, semblable aux globules décrits à proximité des dépôts d'uranium reliés à la discordance de Saskatchewan, et la présence de pyrite, de chalcopyrite et de la pyrrhotite, liés aux grains de carbonate et des sulfates disséminés dans la roche ou localisés dans des fractures.
- iv. L'altération régolithique du socle volcanique et métamorphique, représente une évidence possible de l'interaction des saumures oxydées du bassin avec des roches du socle (calco-alcalines potassiques riches en uranium), une indication favorable pour la mobilisation de l'uranium nécessaire pour la formation des minéralisations uranifères.



- v. La présence de fractures remplies par des carbonates et d'anhydrite peuvent représenter l'infiltration de saumures des dérivés d'une séquence évaporitique qui a pu avoir été présente au-dessus des formations silicoclastiques. De tels fluides sont responsables de la formation des minéralisations uranifères de type discordance dans les bassins de l'Athabasca et de Kombolgie. De même, les températures eutectiques élevées des inclusions fluides indiquent la présence des saumures diagénétiques riches en calcium comme celles observé dans les bassins fortement minéralisés.
- vi. Le contenu de thorium dans les sédiments de Cariewerloo varie très fortement ce qui indique une abondance très variable de monazite et qui de plus est en abondance moyenne plus élevée que dans les bassins d'Athabasca et de Kombolgie. Cependant les rapports Th/La nettement inférieurs à 1, indiquent un lessivage modérée des LREE et donc d'une altération faible des monazites, et par conséquent d'une mobilisation faible des sources potentielles d'uranium dans les grès.
- vii. Le contenu en uranium total est également très variable et est beaucoup plus élevé que dans les zones localisées loin des minéralisations uranifères du bassin d'Athabasca ou de Kombolgie. La plupart des échantillons montrent des rapports Th/U  $\sim 4$ , qui indiquent une faible mobilité totale de l'uranium dans ce bassin. Les rapports Th/U les plus élevés indiquent que de l'uranium a été lessivé dans certaines des formations de ce bassin. Seulement quelques échantillons montrent un léger enrichissement dans l'uranium.

Malgré le fait que le bassin de Waterberg en Afrique de Sud soit le bassin le plus âgé (1,7 - 1,9 Ga), et d'âge le plus proche de ceux de l'Athabasca et de Kombolgie, sa favorabilité à générer des minéralisations uranifères reste faible, par rapport à ces bassins de référence ainsi que par rapport à celui de Pasha Ladoga en Russie, ceci montre l'absence d'une corrélation entre l'âge des bassins et leur fertilité :

- i. Les sédiments silicoclastiques formant la base du bassin sont fortement immatures. L'immaturation des sédiments implique une altération faible des sources. L'altération faible des sources et la forme angulaire du quartz et des feldspaths dans certains des niveaux sédimentaires indiquent un transport modéré des matériaux. La stabilité du feldspath potassique détritique en présence de quartz et d'illite, voire la néoformation d'adulaire indique des conditions de pH neutres à alcalins pour les fluides

- diagénétiques à l'équilibre, défavorables au transport de l'uranium. De même, les veinules de carbonates sont un indice de circulations fluides post-diagénétiques alcalines.
- ii. Les silicifications dans les sédiments de Waterberg réduisent la perméabilité et empêchent la percolation des circulations fluides post-diagénétiques ce qui est pas favorable pour les minéralisations uranifères.
  - iii. L'abondance d'hématite autour des grains confère un caractère oxydant aux conditions de sédimentation et aux fluides diagénétiques en équilibre avec ces sédiments, favorable au transport de l'uranium.
  - iv. Les températures élevées estimées à partir des chlorites néoformées (>330 °C) et la présence de pyroxène dans les grès indiquent l'influence des intrusions de diabase et de roches ultrabasiques actuellement serpentinisées. La présence de CO<sub>2</sub> dans les inclusions fluides étudiées représente un argument supplémentaire pour assigner l'évènement thermique observé dans le bassin à l'intrusion de ces roches. Malgré les températures élevées générées par cet évènement thermique, les circulations fluides engendrées semblent avoir été de très faible amplitude dans le bassin et de caractère plutôt réducteur, sans influence notable sur la mobilité de l'uranium comme l'indiquent les rapports Th/U relativement faibles de la plupart des sédiments. De même, les rapports de Th/La entre 0,2 et 0,4 indiquent l'absence d'un lessivage significatif de LREE, contrairement aux observations faites dans les bassins minéralisés.

Les caractéristiques des sédiments du bassin de Waterberg, sont globalement très proches de celles observées dans les bassins du bouclier Fennoscandien.

Les bassins du bouclier Fennoscandien, sont les plus jeunes (1,3 - 1,4 Ga) et ont également une favorabilité à générer des minéralisations très faible :

- i. Les sédiments silicoclastiques de la base des bassins de Satakunta et de Muhos ont la maturité la plus faible de tous les bassins étudiés avec en particulier la stabilité de minéraux comme la titanite et l'épidote comme phases détritiques. L'altération faible des sources, la forme angulaire du quartz et des feldspaths dans certains des niveaux sédimentaires (qui résulte d'un transport faible des matériaux) et la grande profondeur

- de Satakunta (~ 1800 m) reflète de conditions tectoniques actives durant la sédimentation. Ces conditions permettent la stabilité des feldspaths dans le bassin. La présence de ce minéral associé à l'illite et au quartz a conféré des conditions de pH moins acide pour les fluides à l'équilibre avec cette paragenèse, comparée aux bassins minéralisés (équilibre kaolinite - illite) et donc moins favorables au transport de l'uranium.
- ii. Les silicifications importantes dans les sédiments de Satakunta réduisent la perméabilité et empêchent la percolation des circulations fluides post-diagénétiques ce qui n'est pas favorable pour des minéralisations uranifères. Ceci est confirmé par les rapports Th/U relativement bas de la plupart des sédiments indiquant l'absence de lessivage de l'uranium et par les rapports de Th/La compris entre 0,2 et 0,4 qui indiquent l'absence de lessivage significatif des LREE (monazite stable), contrairement aux observations faites dans les bassins minéralisés.
  - iii. L'abondance d'hématite autour des grains reflète le caractère oxydant aux conditions de sédimentation. L'oxydation forte de ces deux bassins est favorable au transport de l'U comme dans les bassins minéralisés, car les fluides à l'équilibre avec ces sédiments ont un caractère très oxydant.
  - iv. Les températures élevées estimées à partir des chlorites néoformées (de 260 à 300 °C pour Satakunta et 280 à 330 °C pour celui de Muhos) et la présence de titanite (stable à ~ 300 °C) et épidote (stable à ~ 335 °C), non accompagnés par une déformation des roches correspondent à un métamorphisme purement thermique. Il résulte de la mise en place des dykes de diabase qui recoupent le bassin. La présence de CO<sub>2</sub> dans les inclusions fluides et les températures d'homogénéisation élevées (~ 300 ± 5 °C) et les âges K-Ar à 1260 Ma obtenus sur les feldspaths détritiques correspondant à la mise en place des dykes de diabase confirment l'origine de l'événement thermique observé dans le bassin.
  - v. Un événement de plus basse température (environ 200 °C) est indiqué par la néoformation de laumontite qui a cristallisé après les surcroissances des quartz en remplissant complètement la porosité initiale.
  - vi. Des circulations locales de fluides réducteurs, pouvant causer la précipitation de l'uranium, sont indiquées par :
    - des pyritisations locales tardives en veinules et en concrétion présentes à la base du bassin de Muhos

- un bleaching observé dans les 50 m inférieur du sondage Pori 1 à Satakunta
- vii. La séricitisation des plagioclases et la chloritisation des biotites observées dans les lithologies du socle sont attribués à une évolution du métamorphisme rétrograde plutôt qu'à des circulations fluides du bassin car ces altérations ne sont pas développées de manière plus importante à proximité de la discordance.

Ainsi, l'immaturation extrême des sédiments des bassins de Satakunta et de Muhos, conférant un caractère neutre aux fluides diagénétiques, et les faibles circulations fluides diagénétiques dans le bassin et au toit du socle sont des caractères globalement défavorables à la présence de minéralisations uranifères significatives associées.

**REFERENCES**

- Anhaeuser, C.R. (1990). Precambrian crustal evolution and metallogeny of Southern Africa. In: Naqvi, S.M. (Ed.), *Precambrian Continental Crust and its Economic Resources*. Elsevier, Amsterdam, P. 123 – 156.
- Bleeker, W. (2003). The late Archean record: a puzzle in ca. 35 pieces: *Lithos*, V. 71, P. 99 - 134.
- Cuney, M. and Mathieu, R. (2000). Extreme Light Rare Earth Element mobilization by diagenetic fluids in the geological environment of the Oklo natural reactor zones, Franceville basin, Gabon. *Geology*, V. 28 (8), P. 743 - 746.
- Derome, D., Cathelineau, C., Fabre, Boiron, M.C., Banks, D., Lhomme, T., Cuney, M. (2007). Paleo-fluid composition determined from individual fluid inclusions by Raman and LIBS: Application to mid-proterozoic evaporitic Na–Ca brines (Alligator Rivers Uranium Field, northern territories Australia), *Chemical Geology*, V. 237, P. 240 – 254.
- Derome, D., Cuney, M., Cathelineau, M., Fabre, C., Dubessy, J., Bruneton, P., and Hubert, A. (2003). A detailed fluid inclusion study in silicified breccias from the Kombolgie sandstones (Northern Territory, Australia): inferences for the genesis of middle – proterozoic unconformity – type uranium deposits: *Journal of Geochemical Exploration*, V. 80, P. 250 – 275.
- Gaboreau, S., Cuney, M., Quirt, D., Beaufort, D., Patrier, P., Mathieu, R. (2007). Significance of aluminum phosphate-sulfate minerals associated with U unconformity-type deposits: The Athabasca basin, Canada. *American Mineralogist*, V. 92, P. 267 – 280.
- Guillaumont, R., Fanghänel, T., Fuger, J., Grenthe, I., Neck, V., Palmer, D.A., Rand, M.H. (2003). Update on the Chemical Thermodynamics of Uranium, Neptunium, Plutonium, Americium and Technetium. Elsevier B. V., Amsterdam, P. 919.
- Hecht, L. and Cuney, M. (2000). Hydrothermal alteration of monazite in the Precambrian basement of the Athabasca basin: implication for the genesis of unconformity related deposits. *Mineralium Deposita*, V. 35, P. 791 - 795.
- Hein, K.A.A. (2002). Geology of the Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia: structural constraints on the timing of uranium. *Ore Geology Reviews*, V. 20, P. 83 - 108.

- Kister P., Vieillard, P., Cuney, M., Quirt, D., Laverret, E. (2005). Thermodynamic constraints on the mineralogical and fluid composition evolution in a clastic sedimentary basin: the Athabasca Basin (Saskatchewan, Canada). *Eur. J. Mineral*, V. 17, P. 325 - 342.
- Kister, P. (2003). Mobilité des éléments géochimiques dans un bassin sédimentaire clastique, du Protérozoïque à nos jours: le bassin Athabasca (Saskatchewan, Canada). Unpub. PhD. thesis. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 331 P.
- Kotzer, T.G., Kyser, T.K. (1995). Petrogenesis of the Proterozoic Athabasca Basin, northern Saskatchewan, Canada, and its relation to diagenesis, hydrothermal uranium mineralization and paleohydrogeology. *Chemical Geology*, V. 120, P. 45 - 89.
- Light, M.P.R. (1982). The Limpopo Belt, a result of continental collision. *Tectonics* 1, P. 325 - 342.
- Lobaev, V. (2005). PhD thesis. Henri Poincaré, Nancy I, 326 P.
- Lorilleux, G. (2001). Les brèches associées aux gisements d'uranium de type discordance du bassin Athabasca (Saskatchewan, Canada). PhD thesis. INPL, Nancy, 319 P.
- Mathieu, R., Zetterstrom, L., Cuney, M., Gauthier-Lafaye, F., and Hidaka, H. (2001). Alteration of monazite and zircon and lead migration as geochemical tracers of fluid paleocirculations around the Oklo-Okélonbondo and Bangombé natural reactor zones (Franceville basin, Gabon). *Chemical Geology*, V. 171, P. 147 - 171.
- Raffensberger, J.P. and Garven, G. (1995). The formation of unconformity-type uranium ore deposits. 1 Coupled groundwater flow and heat transport modeling. 2 Coupled hydrogeochemical modeling. *American Journal of Sciences*, V. 295, P. 581 - 696.
- Rai, D., Felmy, A. R. and Ryan, J. L., (1990). Uranium (IV) Hydrolysis Constants and Solubility Product of  $UO_2 \cdot x H_2O$  (am). *Inorg. Chem*, V. 29, P. 260 - 264.
- Renac, C., Kyser, K., Durocher, K., Dreaver, G. (2002). Comparison of diagenetic fluids in the Proterozoic Thelon and Athabasca basins, Canada: Implications for protracted histories in stable intracratonic basins. *Canadian Journal of Earth Sciences*, V. 39, P. 113 - 132.
- Schneider, D.A., Heizler, M.T., Bickford, M.E., Wortman, G.L., Condie, K.C., Perilli, S. (2007). Timing constraints of orogeny to cratonization: Thermochronology of the Paleoproterozoic Trans-Hudson orogen, Manitoba and Saskatchewan, Canada. *Precambrian Research*, V. 153, P. 65 - 95.

- Van Reenen, D.D., Roering, C., Brandl, G. (1990). The granulitefacies rocks of the Limpopo belt, southern Africa. In: Vielzeuf, D., Viadal, Ph. (Eds.), *Granulites and Crustal Evolution*. Klumer, Dordrecht, P. 1257 – 1289.
- Yamamura, T., Kitamura, A., Fukui, A., Nishikawa, S., Yamamoto, T., Moriyama, H. (1998). Solubility of U (VI) in Highly Basic Solutions. *Radiochim. Acta*, V. 83, P. 139 - 146.
- Zhao, G., Cawood, P. A., Wilde, S. A., Sun, M. (2002). Review of global 2.1-2.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews*, V. 59, P. 125 - 162.
- Zhao, G., Sun, M., Wilde, S. A., Li, S. (2004). A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth-Science Reviews*, V. 67, P. 91 – 123.





---

*CHAPITRE VI*

*CONCLUSIONS GÉNÉRALES*

---



## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les sédiments silicoclastiques formant la base du remplissage des bassins intracratoniques fortement oxydés paléo- à méso-protérozoïques des bassins de Waterberg (1,7 – 1,9 Ga) en Afrique du Sud, de Cariewerloo (1,45 – 1,58 Ga) en Australie, et de Satakunta et Muhos (1,3 – 1,4 Ga) en Finlande, reposent en discordance sur des roches métasédimentaires et plutoniques archéennes et paléoprotérozoïques, comme les sédiments des bassins fortement minéralisés de l’Athabasca (1,7 - 1,75 Ga) au Canada et de Kombolgie (1,73 Ga) en Australie.

Les sédiments silicoclastiques de ces bassins se caractérisent par :

- une forte immaturité, ces sédiments sont composés de quartz, feldspaths potassiques, plagioclases d’abondance très variable, micas, argiles, oxydes de fer, chlorite, carbonates et minéraux accessoires en abondance également très variable, alors que les sédiments clastiques des bassins de l’Athabasca et de Kombolgie ont un degré de maturité très élevé et consistent presque seulement en quartz avec de faibles proportions de kaolinite, d’illite et de minéraux accessoires;

- une forte oxydation, indiquée par la présence d’hématite située autour des grains détritiques de quartz et les surcroissances dans tous ces bassins ; la présence de sulfate (l’anhydrite) dans le bassin de Cariewerloo, indique également des conditions oxydées;

- le bleaching observé dans les 50 m inférieur du sondage Pori 1 dans le bassin de Satakunta, à partir de 585.5 m jusque la base de bassin de Waterberg et à Cariewerloo, avec des zones vertical remarquables avec des altérations importantes, reflète des circulations fluides réducteurs pendant ou après la diagenèse. La néoformation locale de filonnets de carbonates et de pyrite ainsi que de concrétions pyriteuses à Muhos sont aussi des indices intéressants pour la création possible de pièges réducteurs favorables au dépôt de l’uranium. D’autres évidences des conditions réductrices dans ce bassin sont données par la présence d’un globule carboné noir observé dans le gritstone de la formation IV de bassin de Cariewerloo, semblable aux globules décrits à proximité des gisements d’uranium de discordance de Saskatchewan, et la présence de la pyrite, de la chalcopryrite et de la pyrrhotite dans la même formation, associés aux grains du carbonate et des sulfates dans les fractures ou disséminés dans la roche. Dans le socle du bassin de Satakunta, les schistes graphiteux du socle représentent des pièges réduisant potentiels pour le dépôt de l’uranium. Les altérations régolithiques dans le socle volcanique métamorphique du

bassin de Cariewerloo, représentent une évidence possible pour l'interaction des saumures oxydées de bassin avec des roches de socle, une indication favorable pour la formation des minéralisations d'uranium.

- des évènements thermiques de haute température :

- à Waterberg d'au moins 300 °C, estimées à partir de la composition des chlorites néoformés ; ceci et la présence du pyroxène dans le grès à 1411,6 m et la présence du CO<sub>2</sub> dans les inclusions fluides étudiées indiquent l'influence des intrusions magmatiques représentées par les puissants sills de diabase et de roche ultrabasique qui recourent ce bassin;

- De 260 à 300 °C estimées à partir de la composition des chlorites néoformés dans les sédiments silicoclastiques du bassin de Satakunta ; ces températures élevées, les néoformations de titanite et d'allanite, la présence du CO<sub>2</sub> dans les inclusions fluides qui ne peut pas représenter un fluide diagénétique, les âges K-Ar à 1240 Ma des feldspaths potassiques du sondage R6 indiquant clairement un événement thermique récent correspondant à la mise en place des dykes de diabase (de même âge) dans cette partie du bassin

- De 280 à 330 °C, estimées à partir de la composition des chlorites néoformés à Muhos ;

- De 230 à plus que 300 °C estimées à partir de la composition des chlorites néoformées dans le bassin de Cariewerloo.

Toutes ces températures sont nettement plus importantes que celles calculées dans les bassins minéralisés (150 à 200° C pour l'Athabasca et 150 ± 15 °C pour le Kombolgie à partir des inclusions fluides) et correspondent pour la plupart de ces bassins des évènements thermiques de faible durée n'ayant pas pu produire des circulations fluides d'amplitude suffisante pour la genèse des minéralisations uranifères.

L'étude des inclusions montre que la salinité des fluides diagénétiques dans les bassins de Waterberg et Satakunta est inférieure à celles qui ont été mesurées dans les bassins de Kombolgie et d'Athabasca. Par contre les basses températures d'eutectiques mesurées à Cariewerloo, indiquent la présence des saumures diagénétiques riches en calcium comme celles observées dans les bassins minéralisés et correspondent probablement à cette fluide dérivant d'évaporites comme l'indique la présence locale d'anhydrite en fractures dans la formation Pandurra.

- une altération significative des zircons, mais modérée à absente des monazites, indiquant des circulations fluides diagénétiques notable à Cariewerloo où les fluides sont plus

agressifs, et très faible dans les autres bassins. Les zircons les moins altérés ont été observés dans le bassin de Waterberg.

- Des valeurs de Th/U dans la plupart des échantillons des 4 bassins montrent des valeurs autour le rapport de la croûte moyenne ( $\text{Th/U} = 4$ ), sauf ceux de Muhos qui montrent un enrichissement en U, et ceux deux bassin de Waterberg dont les faibles rapports Th/U associés à de fortes valeurs des rapports K/Rb indiquent plutôt un héritage de sédiments granulitiques.

La plupart des caractéristiques des bassins résumées ci-dessus (faible perméabilité due à la teneur importante en argile, la conservation du feldspath potassique, les rapports Th/U voisins de ceux de la croûte de moyenne, les rapports Th/La modérés) indique que les fluides diagénétiques étaient beaucoup moins agressifs et que les circulations fluides étaient beaucoup moins intenses que dans les bassins fortement minéralisés d'Athabasca ou de Kombolgie. La teneur en uranium initiale des sédiments semble avoir été essentiellement préservée. Localement les conditions favorables ont existé, mais leur distribution régionale semble être trop limitée. Les caractéristiques générales du bassin de Cariewerloo sont plus proches de celles de Pasha-Ladoga en Russie faiblement minéralisé et semblent plus favorables à la présence de minéralisations d'uranium que celles de Waterberg et de Satakunta. Néanmoins, la favorabilité de ce bassin à générer des minéralisations uranifères reste modérée.



---

*LISTE EN ANNEXE*

---





---

## *ANNEXE I*

Analyses géochimiques de roche totale (majeurs et traces)  
ont été réalisées par ICP-AES et MS au CRPG-CNRS (Nancy).

---



## Annexe I

Label	facies	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	L.O.I.	Total
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
RH1/72-19.9m	sdst	84,59	8,52	2,75	0,02	0,31	0,06	< L.D.	2,35	0,26	0,03	1,96	100,85
RH1/72-120.8m	sdst	84,79	5,52	6,92	0,02	0,15	0,08	< L.D.	1,59	0,43	0,06	1,23	100,79
RH1/72-212.3m	sdst	88,28	5,79	1,12	0,04	0,45	0,25	0,28	1,68	0,11	0,02	1,46	99,49
RH1/72-302.6m	sdst	89,16	4,84	1,94	0,02	0,41	0,12	0,64	1,15	0,19	0,05	1,01	99,51
RH1/72-406.0m	sdst	86,96	5,30	1,45	0,03	0,55	0,79	1,08	1,05	0,13	0,05	1,58	98,97
RH1/72-512.8m	sdst	84,30	7,52	0,58	0,06	0,45	1,05	1,97	2,02	0,08	0,05	1,48	99,57
RH1/72-557.0m	sdst	82,24	8,36	1,03	0,05	0,64	0,94	2,09	2,25	0,11	0,06	1,59	99,35
RH1/72-600.6m	sdst	70,39	11,72	3,88	0,08	2,27	2,15	1,48	3,64	0,47	0,13	3,90	100,11
RH1/72-724.0m	sdst	70,68	10,85	4,01	0,14	2,96	2,74	0,88	3,52	0,42	0,13	3,84	100,18
RH1/72-756.5m	dolerite	49,60	14,10	14,05	0,19	6,28	9,03	2,33	1,20	1,57	0,20	1,71	100,25
RH1/72-1012.0m	sdst	82,45	9,21	2,85	0,04	0,26	0,10	< L.D.	3,08	0,45	0,04	1,35	99,83
RH1/72-1075.0m	sdst	87,07	6,25	2,09	0,03	0,18	0,17	< L.D.	2,16	0,26	0,03	0,97	99,20
RH1/72-1304.0m	sdst	82,14	7,41	2,17	0,02	0,28	0,87	0,08	4,21	0,40	0,04	1,31	98,91
RH1/72-1375.9m	sdst	82,44	6,09	6,49	0,03	0,38	0,08	< L.D.	1,32	0,80	0,07	1,38	99,07
RH1/72-1411.6m	sdst	58,84	2,89	24,69	0,12	1,74	7,64	0,50	0,50	0,14	0,09	0,00	96,86
RH1/72-1427.0m	serpentinite	38,69	0,23	7,77	0,21	38,08	0,03	< L.D.	< L.D.	0,01	0,07	13,47	98,54
RH1/72-1496.0m	serpentinite	34,93	0,35	9,04	0,13	39,59	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,01	0,07	14,46	98,58
RH1/72-1592.6m	dolerite	53,72	12,53	15,60	0,21	2,76	7,24	2,98	1,42	1,79	0,26	0,91	99,40
RH1/72-1698.0m	dolerite	50,42	15,82	10,51	0,16	7,68	11,15	2,19	0,63	0,78	0,09	1,26	100,68
RH1/72-1794.4m	dolerite	51,30	15,44	10,33	0,16	6,75	11,66	2,21	0,65	0,81	0,09	1,11	100,53

^&lt; D.L. = &lt; Detection Limit

Label	facies	As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf	In	Mo
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
RH1/72-19.9m	sdst	2,13	280,70	1,06	< L.D.	< L.D.	7,10	43,28	1,55	4,92	10,30	0,79	4,06	< L.D.	< L.D.
RH1/72-120.8m	sdst	3,47	230,10	0,72	0,13	< L.D.	5,58	70,26	0,78	4,25	8,87	1,04	6,88	< L.D.	0,63
RH1/72-212.3m	sdst	< L.D.	424,20	< L.D.	< L.D.	< L.D.	3,80	23,55	1,17	3,57	6,26	0,76	2,32	< L.D.	< L.D.
RH1/72-302.6m	sdst	< L.D.	376,40	< L.D.	< L.D.	< L.D.	3,37	33,20	1,03	5,19	5,75	0,70	4,38	< L.D.	< L.D.
RH1/72-406.0m	sdst	< L.D.	284,50	< L.D.	< L.D.	< L.D.	3,51	33,75	1,35	4,73	5,90	0,69	2,63	< L.D.	< L.D.
RH1/72-512.8m	sdst	< L.D.	421,90	0,81	< L.D.	< L.D.	3,37	18,57	1,25	5,68	8,82	0,84	3,09	< L.D.	< L.D.
RH1/72-557.0m	sdst	5,37	614,40	1,11	0,24	< L.D.	6,43	26,45	1,25	15,12	9,21	0,88	3,46	< L.D.	< L.D.
RH1/72-600.6m	sdst	7,03	601,20	1,95	0,37	< L.D.	7,80	74,04	6,62	8,03	14,43	1,35	8,64	< L.D.	< L.D.
RH1/72-724.0m	sdst	8,31	719,90	1,60	0,31	< L.D.	10,08	74,72	4,29	10,40	13,73	1,33	6,27	< L.D.	< L.D.
RH1/72-756.5m	dolerite	2,06	484,50	0,94	< L.D.	< L.D.	51,78	145,90	0,60	167,80	21,98	1,63	3,69	0,10	0,77
RH1/72-1012.0m	sdst	< L.D.	510,20	1,09	0,14	< L.D.	6,41	61,32	1,57	38,93	10,99	0,93	5,93	< L.D.	< L.D.
RH1/72-1075.0m	sdst	< L.D.	395,10	0,77	< L.D.	< L.D.	5,78	97,85	0,85	14,94	8,05	0,88	4,59	< L.D.	0,66
RH1/72-1304.0m	sdst	< L.D.	861,00	0,61	< L.D.	< L.D.	6,11	66,57	0,83	< L.D.	8,16	0,93	6,47	< L.D.	0,62
RH1/72-1375.9m	sdst	< L.D.	279,70	0,72	< L.D.	< L.D.	5,98	117,50	0,49	5,36	10,37	1,17	12,39	< L.D.	< L.D.
RH1/72-1411.6m	sdst	6,01	299,40	3,22	< L.D.	< L.D.	66,16	11990	1,57	4,82	8,64	1,68	1,45	< L.D.	6,07
RH1/72-1427.0m	serpentinite	9,91	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	124,00	5411	< L.D.	< L.D.	0,62	1,07	< L.D.	< L.D.	< L.D.
RH1/72-1496.0m	serpentinite	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	128,30	4048	< L.D.	< L.D.	1,00	0,85	< L.D.	< L.D.	< L.D.
RH1/72-1592.6m	dolerite	< L.D.	338,60	1,37	< L.D.	< L.D.	48,03	7,67	1,88	174,10	24,18	1,74	4,65	0,12	0,89
RH1/72-1698.0m	dolerite	< L.D.	143,60	0,76	< L.D.	< L.D.	52,48	113,20	1,01	90,25	18,75	1,57	1,70	0,07	< L.D.
RH1/72-1794.4m	dolerite	< L.D.	160,60	0,75	< L.D.	< L.D.	47,53	99,83	0,90	88,51	19,24	1,71	1,96	0,07	< L.D.

^&lt; D.L. = &lt; Detection Limit

## Annexe I

Label	facies	Nb	Ni	Pb	Rb	Sb	Sn	Sr	Ta	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
RH1/72-19.9m	sdst	3,15	22,60	14,85	62,38	< L.D.	0,81	17,79	0,33	11,85	1,88	19,27	0,31	14,06	24,29	156,00
RH1/72-120.8m	sdst	4,46	15,55	18,34	39,84	< L.D.	0,99	9,34	0,57	34,69	2,69	67,67	1,11	12,83	18,52	266,50
RH1/72-212.3m	sdst	1,35	10,31	6,34	46,19	< L.D.	0,42	11,07	0,15	6,14	1,07	10,94	< L.D.	7,00	18,80	87,81
RH1/72-302.6m	sdst	2,18	9,88	11,43	32,18	< L.D.	0,47	21,05	0,28	8,88	1,48	20,81	0,26	10,02	14,83	172,40
RH1/72-406.0m	sdst	1,89	12,18	11,11	34,40	0,17	0,47	40,91	0,19	5,81	0,86	7,68	0,28	9,34	17,26	96,02
RH1/72-512.8m	sdst	1,76	9,27	11,07	62,82	0,18	0,53	64,63	0,20	5,60	1,25	40,86	0,42	10,15	22,62	113,40
RH1/72-557.0m	sdst	2,05	9,80	17,08	69,20	0,69	0,62	77,98	0,23	5,39	1,09	11,88	0,94	13,95	15,89	134,70
RH1/72-600.6m	sdst	8,81	26,00	45,33	128,60	1,38	2,18	90,05	0,96	14,66	3,78	30,30	1,67	23,96	53,25	326,10
RH1/72-724.0m	sdst	7,80	30,11	22,99	109,80	0,75	2,21	78,80	0,79	11,79	3,49	45,53	1,29	23,20	59,72	244,00
RH1/72-756.5m	dolerite	5,20	148,00	6,53	33,74	0,22	1,37	216,60	0,44	3,27	0,88	323,10	0,43	29,46	123,10	139,60
RH1/72-1012.0m	sdst	4,53	28,64	28,42	69,07	< L.D.	0,87	29,20	0,45	13,68	2,46	41,66	0,43	16,37	66,21	220,90
RH1/72-1075.0m	sdst	3,29	25,10	29,98	54,78	< L.D.	1,10	18,80	0,38	15,91	3,15	42,78	0,34	13,86	46,98	168,40
RH1/72-1304.0m	sdst	5,01	28,33	20,13	97,91	< L.D.	0,87	43,57	0,61	25,15	3,81	44,58	0,64	24,14	21,60	239,80
RH1/72-1375.9m	sdst	7,37	47,79	8,52	42,66	0,16	1,32	9,24	1,07	66,86	6,52	83,91	1,05	43,45	27,71	469,20
RH1/72-1411.6m	sdst	2,49	2930	5,65	21,90	0,29	1,14	46,17	0,31	12,63	2,47	134,40	1,07	14,29	276,60	49,75
RH1/72-1427.0m	serpentinite	< L.D.	1652	< L.D.	< L.D.	0,34	0,36	< L.D.	< L.D.	0,03	0,20	17,40	0,22	< L.D.	79,61	< L.D.
RH1/72-1496.0m	serpentinite	< L.D.	2291	1,24	< L.D.	0,16	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,02	0,04	17,93	< L.D.	0,21	63,61	< L.D.
RH1/72-1592.6m	dolerite	8,64	24,00	9,98	45,51	< L.D.	2,28	176,50	0,76	6,60	1,72	299,70	0,81	35,66	152,30	173,30
RH1/72-1698.0m	dolerite	2,92	196,20	3,59	22,76	< L.D.	0,83	208,40	0,27	2,41	0,60	203,00	0,33	14,38	82,01	64,62
RH1/72-1794.4m	dolerite	3,20	126,90	4,30	23,68	< L.D.	1,09	199,50	0,29	2,64	0,69	216,10	0,31	15,92	80,93	72,42

&lt; D.L. = &lt; Detection Limit

Label	facies	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
RH1/72-19.9m	sdst	35,11	60,29	6,31	21,06	3,12	0,60	2,36	0,38	2,34	0,47	1,38	0,21	1,40	0,23	135,25
RH1/72-120.8m	sdst	59,53	106,30	11,18	38,26	6,24	0,97	4,11	0,54	2,66	0,45	1,25	0,18	1,24	0,21	233,12
RH1/72-212.3m	sdst	14,76	25,70	2,74	9,38	1,57	0,39	1,31	0,20	1,21	0,24	0,69	0,11	0,71	0,11	59,11
RH1/72-302.6m	sdst	24,76	43,47	4,54	15,47	2,40	0,59	1,91	0,29	1,72	0,34	1,01	0,15	1,09	0,17	97,91
RH1/72-406.0m	sdst	14,84	31,17	3,00	10,71	1,94	0,48	1,70	0,27	1,54	0,31	0,87	0,14	0,90	0,14	68,00
RH1/72-512.8m	sdst	14,66	29,23	3,26	12,04	2,35	0,67	2,06	0,31	1,81	0,34	0,98	0,15	0,98	0,16	68,98
RH1/72-557.0m	sdst	18,58	45,96	4,04	14,67	2,76	0,89	2,49	0,39	2,31	0,47	1,31	0,19	1,25	0,19	95,49
RH1/72-600.6m	sdst	38,02	75,09	8,31	30,27	5,70	1,16	4,80	0,72	4,20	0,83	2,35	0,36	2,47	0,39	174,67
RH1/72-724.0m	sdst	33,94	75,18	7,52	27,73	5,24	1,13	4,50	0,68	3,98	0,78	2,17	0,33	2,15	0,34	165,64
RH1/72-756.5m	dolerite	16,26	35,44	4,51	19,34	4,87	1,54	5,29	0,86	5,28	1,04	2,90	0,42	2,79	0,43	100,97
RH1/72-1012.0m	sdst	38,49	68,75	7,42	25,61	4,24	0,90	3,29	0,49	2,92	0,57	1,65	0,25	1,70	0,26	156,53
RH1/72-1075.0m	sdst	36,83	68,54	7,31	25,70	4,44	0,70	3,48	0,48	2,70	0,49	1,34	0,20	1,27	0,20	153,67
RH1/72-1304.0m	sdst	57,48	108,10	11,49	40,54	7,19	0,99	5,61	0,82	4,48	0,82	2,24	0,33	2,26	0,35	242,71
RH1/72-1375.9m	sdst	127,70	237,50	25,22	89,28	14,94	1,72	11,10	1,56	8,47	1,54	4,12	0,60	3,84	0,58	528,15
RH1/72-1411.6m	sdst	24,26	47,85	5,10	17,89	3,24	0,40	2,69	0,43	2,54	0,50	1,42	0,22	1,50	0,23	108,26
RH1/72-1427.0m	serpentinite	0,17	0,35	0,04	0,13	0,02	0,03	< L.D.	< L.D.	0,02	< L.D.	0,02	< L.D.	0,03	0,01	0,80
RH1/72-1496.0m	serpentinite	0,28	0,38	0,04	0,11	< L.D.	0,02	0,02	< L.D.	0,03	< L.D.	0,02	0,01	0,04	0,01	0,96
RH1/72-1592.6m	dolerite	26,71	55,90	6,83	28,24	6,64	2,00	6,87	1,10	6,68	1,29	3,47	0,50	3,21	0,47	149,91
RH1/72-1698.0m	dolerite	9,03	19,00	2,36	9,85	2,41	0,84	2,58	0,43	2,65	0,53	1,40	0,21	1,33	0,20	52,81
RH1/72-1794.4m	dolerite	9,95	21,07	2,59	10,88	2,70	0,91	2,89	0,48	2,88	0,57	1,56	0,22	1,46	0,23	58,37

&lt; D.L. = &lt; Detection Limit

Annexe I

Label	Depth(m)	facies	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	L.O.I.	Total
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
DDH 893-1	33,35	congllo-sdst	85,78	7,35	0,32	0,00	0,18	< L.D.	0,18	4,59	0,08	0,02	0,59	99,09
DDH 893-1	41,5	congllo-sdst	86,64	6,91	0,24	0,00	0,11	< L.D.	0,18	4,43	0,07	< L.D.	0,74	99,31
DDH 893-1	52,1	congllo-sdst	86,00	6,95	1,04	0,00	0,21	< L.D.	0,14	4,57	0,11	0,04	0,58	99,64
DDH 893-1	62,7	sdst	92,98	4,19	0,25	< L.D.	0,03	< L.D.	< L.D.	0,48	0,10	< L.D.	1,15	99,17
DDH 893-1	64	sdst	94,72	3,51	0,27	< L.D.	0,05	< L.D.	< L.D.	0,33	0,05	< L.D.	1,16	100,09
DDH 893-1	82,6	sdst	87,08	7,45	0,23	0,00	0,17	0,02	0,18	3,86	0,15	< L.D.	1,18	100,32
DDH 893-1	87	sdst	71,51	12,30	6,26	0,02	1,28	0,06	0,20	5,17	0,51	0,08	2,94	100,33
CSDI	412	sdst	87,90	6,39	2,73	0,03	0,07	0,03	< L.D.	0,77	0,13	0,04	1,34	99,42
CSDI	497,65	sdst	84,82	7,84	3,95	0,05	0,11	0,02	< L.D.	1,00	0,27	0,05	1,56	99,67
CSDI	575,25	sdst	83,76	8,63	3,20	0,06	0,19	0,04	< L.D.	2,20	0,26	0,05	1,68	100,04
CSDI	705,2	sdst	88,46	5,82	1,47	0,03	0,29	0,10	0,14	2,39	0,32	0,04	1,40	100,45
CSDI	754,55	sdst	87,86	4,71	2,71	0,05	0,30	0,19	0,07	1,59	0,77	0,04	1,05	99,34
CSDI	770,75	sdst	77,22	8,75	7,57	0,12	0,55	0,10	< L.D.	2,85	0,67	0,08	1,81	99,72
CSDI	807,4	sdst	85,67	5,12	5,01	0,09	0,35	0,09	< L.D.	1,65	0,40	0,05	1,29	99,72
CSDI	838,55	sdst	85,65	5,30	2,82	0,22	0,49	0,69	0,14	2,23	0,15	0,05	1,31	99,05
CSDI	849,1	sdst	78,63	9,96	4,18	0,04	0,51	0,20	< L.D.	3,01	0,50	0,07	2,04	99,14
ASD2	967,15	sdst	88,30	5,76	0,00	0,05	0,24	0,05	< L.D.	2,69	0,18	0,03	0,77	99,97
ASD2	1002,1	congllo-sdst	86,26	6,64	1,42	0,03	0,21	0,11	0,08	3,33	0,13	0,05	1,03	99,28
ASD2	1020,65	congllo	78,11	6,49	9,06	0,14	0,87	0,22	< L.D.	1,82	1,48	0,08	1,78	100,04
PYI	325,25	congllo-sdst	88,35	7,39	0,78	0,01	0,05	< L.D.	0,10	0,19	0,12	< L.D.	2,97	99,97
PYI	379,2	sdst	87,99	5,76	1,77	0,04	0,12	< L.D.	0,24	1,23	0,09	0,03	2,04	99,32
PYI	449,5	sdst	82,89	9,15	2,26	0,03	0,11	0,04	0,13	1,99	0,25	0,05	2,21	99,10
PYI	510,5	sdst	75,32	5,27	3,45	8,29	0,28	0,29	0,12	1,63	0,17	0,10	2,06	96,98
PYI	528,8	sdst	84,24	6,85	2,36	0,49	0,25	0,13	0,24	2,04	0,17	0,06	1,92	98,74
PYI	547,75	sdst	78,10	8,58	6,36	0,14	0,40	0,08	0,16	2,58	0,61	0,05	1,88	98,94
PYI	579	sdst	78,83	7,88	7,06	0,15	0,41	0,08	0,11	2,44	0,63	0,06	1,67	99,33
PYI	598,3	mudst	66,85	15,98	5,64	0,08	1,11	0,08	0,19	5,42	0,62	0,05	3,47	99,48
PYI	613,55	sdst	79,82	8,23	5,28	0,08	0,34	0,16	0,13	2,92	0,32	0,10	1,59	98,97
PYI	623,3	sdst	80,81	10,40	0,80	0,01	0,22	0,07	0,17	4,49	0,13	< L.D.	1,91	99,01
PYI	655,25	congllo	79,94	9,96	2,50	0,02	0,18	0,07	0,20	4,48	0,26	0,03	1,60	99,25
PYI	669,5	grit	80,39	9,46	2,45	0,07	0,23	0,13	0,21	4,39	0,16	0,04	1,41	98,92
PYI	670,6	grit	75,13	12,89	2,39	0,03	0,35	0,09	0,20	5,17	0,52	0,04	2,27	99,07
PYI	673,7	sdst	69,49	16,20	3,41	0,06	0,62	0,12	0,21	5,66	0,59	0,06	3,19	99,61
PYI	676,5	grit	70,69	14,05	5,05	0,06	0,58	0,11	0,19	5,31	0,56	0,05	2,77	99,41
PYI	679,4	grit	66,35	12,00	8,98	0,19	0,76	0,43	0,20	6,83	1,26	0,07	2,29	99,36
DRDI	676	congllo	85,02	4,39	7,57	0,09	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,05	0,32	0,05	1,81	99,31
DRDI	626,65	sdst	72,61	7,62	14,55	0,06	0,01	0,02	< L.D.	0,10	0,78	0,11	2,99	98,86
DRDI	599,3	grit	83,69	7,82	4,70	0,04	0,02	< L.D.	< L.D.	0,28	0,33	0,05	2,74	99,66
DRDI	584,85	congllo	88,45	4,19	3,65	0,06	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,07	0,80	0,14	1,58	98,94
DRDI	536,25	grit	92,35	4,54	1,43	0,00	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,14	0,16	0,02	1,62	100,26
DRDI	464	grit	89,65	5,07	1,80	0,00	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,10	0,11	0,04	1,95	98,72
DRDI	439,6	silt	60,90	25,12	3,08	0,01	0,05	< L.D.	< L.D.	0,21	1,17	0,08	9,34	99,94
DRDI	422,2	sdst	91,71	3,58	2,70	0,00	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,28	0,04	1,31	99,61
DRDI	391,1	grit	94,79	2,99	0,32	0,00	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,09	< L.D.	1,12	99,32
DRDI	377,35	grit	91,23	5,05	0,54	0,00	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,17	0,03	1,88	98,88
DRDI	341,6	grit	90,05	5,07	2,05	0,00	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,36	0,05	1,81	99,39

< D.L. = < Detection Limit

Annexe I

Label	Depth(m)	As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf	In	Mo
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
DDH 893-1	33,35	< L.D.	281,50	0,71	0,15	< L.D.	0,78	6,42	7,29	6,31	17,83	1,40	2,08	< L.D.	< L.D.
DDH 893-1	41,5	1,40	281,30	0,79	0,17	< L.D.	0,55	9,62	4,86	5,39	14,49	1,40	1,79	< L.D.	< L.D.
DDH 893-1	52,1	4,08	350,00	1,26	0,28	< L.D.	0,87	31,53	11,65	11,80	11,47	2,21	1,71	< L.D.	< L.D.
DDH 893-1	62,7	1,27	58,08	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,51	6,43	1,19	8,36	4,89	1,24	2,55	< L.D.	< L.D.
DDH 893-1	64	1,12	39,32	< L.D.	< L.D.	< L.D.	1,37	7,07	1,35	16,76	5,36	1,18	1,45	< L.D.	< L.D.
DDH 893-1	82,6	1,17	470,00	0,78	< L.D.	< L.D.	2,44	7,65	5,36	15,03	9,22	1,32	3,23	< L.D.	< L.D.
DDH 893-1	87	2,65	699,80	5,46	0,41	< L.D.	5,31	46,57	38,52	6,73	21,58	2,48	5,59	0,10	< L.D.
CSDI	412	4,57	2189,00	2,67	< L.D.	< L.D.	2,57	8,20	0,65	14,79	7,85	0,96	2,04	< L.D.	< L.D.
CSDI	497,65	6,82	223,10	1,61	< L.D.	< L.D.	2,95	15,79	1,04	13,56	10,23	1,19	3,36	< L.D.	< L.D.
CSDI	575,25	10,75	181,60	1,89	< L.D.	< L.D.	5,17	18,85	3,07	20,56	11,49	1,24	2,86	< L.D.	< L.D.
CSDI	705,2	12,04	450,20	1,90	0,22	< L.D.	2,98	18,03	3,41	18,94	8,39	1,51	10,33	< L.D.	0,61
CSDI	754,55	26,42	431,60	1,53	0,47	< L.D.	7,25	17,83	3,41	18,12	6,67	1,35	9,20	< L.D.	1,39
CSDI	770,75	31,34	387,10	2,13	0,49	< L.D.	12,52	39,20	16,64	54,57	14,20	1,86	5,71	0,06	1,16
CSDI	807,4	19,95	221,10	1,25	0,30	< L.D.	9,14	23,24	9,28	41,81	8,01	1,45	3,67	< L.D.	1,16
CSDI	838,55	14,25	491,10	1,52	0,24	< L.D.	34,12	15,50	4,06	92,15	6,95	1,20	2,58	< L.D.	1,07
CSDI	849,1	42,35	271,40	1,97	0,37	< L.D.	7,11	34,27	13,17	52,86	14,30	1,96	5,96	0,06	1,36
ASD2	967,15	7,97	479,00	1,58	0,22	< L.D.	3,88	9,83	3,60	55,95	8,04	1,21	8,53	< L.D.	< L.D.
ASD2	1002,1	12,68	841,50	0,94	< L.D.	< L.D.	2,42	14,25	3,41	5,28	7,41	1,33	3,49	< L.D.	< L.D.
ASD2	1020,65	16,96	359,10	1,94	1,21	< L.D.	25,42	32,13	10,59	52,13	11,31	2,11	9,52	0,08	1,38
PYI	325,25	7,05	39,96	0,76	< L.D.	< L.D.	1,48	7,88	0,47	9,49	7,12	1,00	2,16	< L.D.	< L.D.
PYI	379,2	4,24	7549,00	1,02	< L.D.	< L.D.	2,33	11,65	1,34	11,30	6,62	1,10	1,62	< L.D.	< L.D.
PYI	449,5	4,80	193,00	1,59	0,18	< L.D.	2,61	14,52	1,96	15,33	11,05	1,01	2,88	< L.D.	< L.D.
PYI	510,5	22,25	2397,00	2,86	5,07	1,74	26,82	27,60	2,96	288,80	13,22	2,86	2,61	0,14	< L.D.
PYI	528,8	11,39	318,60	1,86	0,18	< L.D.	5,77	14,32	2,59	33,15	7,69	1,23	2,89	< L.D.	< L.D.
PYI	547,75	26,51	255,00	2,19	0,64	< L.D.	11,64	35,16	6,42	41,42	12,53	1,70	5,69	0,08	0,82
PYI	579	35,18	353,70	2,37	0,57	< L.D.	12,65	35,18	6,54	27,58	12,20	1,58	5,89	0,08	0,99
PYI	598,3	9,16	586,20	2,69	0,71	< L.D.	12,43	51,22	21,89	37,11	21,20	2,04	6,64	0,09	< L.D.
PYI	613,55	29,98	381,40	2,33	0,52	< L.D.	10,61	26,22	6,13	32,37	11,63	1,75	4,28	0,06	0,69
PYI	623,3	4,25	692,60	1,43	< L.D.	< L.D.	1,43	< L.D.	3,79	9,25	10,55	1,23	6,19	< L.D.	< L.D.
PYI	655,25	7,41	698,20	1,78	0,32	< L.D.	1,88	8,04	3,78	10,43	10,51	1,22	3,59	< L.D.	< L.D.
PYI	669,5	5,38	821,30	1,60	0,38	< L.D.	1,87	7,30	4,17	12,00	10,98	1,35	3,17	0,05	< L.D.
PYI	670,6	26,51	884,30	3,00	1,49	< L.D.	6,78	18,06	8,64	29,87	16,27	1,68	16,43	< L.D.	0,79
PYI	673,7	48,24	694,70	4,36	2,70	< L.D.	8,24	11,49	17,13	126,70	21,36	1,74	12,71	0,09	1,30
PYI	676,5	13,94	929,50	3,69	0,80	< L.D.	6,02	13,58	13,06	18,96	18,82	2,03	12,17	0,07	0,84
PYI	679,4	6,32	1313,00	4,90	0,80	0,50	8,82	28,77	13,90	13,40	18,00	1,88	21,65	0,10	1,90
DRDI	676	9,69	23,71	0,74	0,32	< L.D.	38,54	20,01	0,14	19,55	6,41	1,38	3,27	< L.D.	1,15
DRDI	626,65	12,68	30,82	1,83	0,45	0,50	9,70	46,87	0,18	22,09	12,00	1,38	19,95	0,10	1,41
DRDI	599,3	7,28	19,80	0,92	0,21	< L.D.	3,24	17,07	0,40	23,61	10,41	1,04	3,50	< L.D.	0,65
DRDI	584,85	24,91	40,22	2,04	0,45	< L.D.	6,26	44,40	0,13	12,68	5,84	1,22	11,99	< L.D.	< L.D.
DRDI	536,25	2,47	16,91	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,44	13,56	0,17	8,90	5,00	0,91	4,85	< L.D.	< L.D.
DRDI	464	1,32	16,19	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,42	7,25	0,12	9,17	4,98	0,88	3,50	< L.D.	< L.D.
DRDI	439,6	10,97	49,17	4,17	0,71	< L.D.	4,27	130,00	1,70	28,71	31,69	1,28	10,96	0,07	1,10
DRDI	422,2	1,29	18,63	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,89	11,04	< L.D.	5,97	3,78	0,81	6,28	< L.D.	< L.D.
DRDI	391,1	1,16	15,69	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	8,74	< L.D.	4,24	3,21	0,81	2,28	< L.D.	< L.D.
DRDI	377,35	1,46	23,70	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	10,15	< L.D.	11,95	5,00	0,90	3,77	< L.D.	< L.D.
DRDI	341,6	1,43	23,00	0,64	< L.D.	< L.D.	1,09	16,95	< L.D.	10,15	5,06	0,91	8,77	< L.D.	< L.D.

< D.L. = < Detection Limit

Annexe I

Label	Depth(m)	Nb	Ni	Pb	Rb	Sb	Sn	Sr	Ta	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
DDH 893-1	33,35	2,5	< L.D.	24,99	171,80	0,28	1,44	22,65	0,36	8,41	1,02	6,05	2,93	7,99	< L.D.	73,68
DDH 893-1	41,5	2,4	< L.D.	25,82	162,80	0,39	1,29	21,78	0,37	9,16	1,08	7,53	5,77	8,60	< L.D.	60,57
DDH 893-1	52,1	3,8	< L.D.	24,55	179,90	0,36	1,70	30,24	0,53	6,92	1,42	14,92	3,13	9,83	11,13	58,83
DDH 893-1	62,7	1,7	< L.D.	17,16	20,36	0,37	0,51	6,61	0,21	6,02	1,95	4,28	2,32	7,54	< L.D.	94,53
DDH 893-1	64	1,0	< L.D.	14,86	17,99	0,37	1,33	4,95	0,13	5,30	2,90	5,61	2,36	4,68	< L.D.	54,92
DDH 893-1	82,6	2,4	< L.D.	22,85	155,10	0,37	2,17	40,94	0,31	10,15	2,02	9,32	4,00	9,64	< L.D.	115,20
DDH 893-1	87	10,4	12,44	24,19	346,40	1,72	3,20	69,14	1,10	16,78	3,39	54,72	9,01	23,63	29,43	213,50
CSDI	412	4,1	6,94	4,11	24,75	0,63	1,35	130,30	0,49	8,33	2,34	17,54	1,05	10,28	35,00	72,68
CSDI	497,65	7,6	7,59	4,02	38,63	1,10	2,01	107,40	0,85	12,05	2,39	18,80	2,02	24,55	21,04	129,50
CSDI	575,25	6,6	12,19	4,15	102,60	1,25	2,00	126,70	0,76	11,87	2,34	23,06	1,78	13,37	42,07	102,90
CSDI	705,2	8,2	8,04	9,39	117,10	1,06	1,69	41,52	0,90	18,98	4,55	30,56	2,00	17,65	38,88	439,00
CSDI	754,55	20,9	7,92	7,35	84,47	2,31	2,47	23,60	1,98	15,43	6,04	69,93	3,48	29,27	36,16	389,00
CSDI	770,75	14,4	19,39	10,71	175,00	3,80	3,08	25,19	1,53	16,03	3,64	70,20	7,28	27,03	82,49	217,00
CSDI	807,4	8,6	10,91	5,83	102,30	2,85	2,37	10,36	0,89	8,60	2,70	38,04	5,18	11,58	53,79	140,40
CSDI	838,55	4,7	9,41	9,47	113,60	1,41	1,25	21,67	0,52	8,14	4,30	12,70	3,51	11,35	53,03	92,65
CSDI	849,1	11,8	16,03	10,44	190,20	2,38	2,88	16,63	1,29	14,69	4,23	55,11	4,46	24,89	70,05	231,80
ASD2	967,15	5,2	8,55	13,95	109,20	1,03	1,19	30,87	0,53	9,28	2,80	13,46	3,16	15,51	36,08	373,20
ASD2	1002,1	4,7	6,83	10,50	115,30	0,84	0,82	50,41	0,49	10,26	1,70	9,43	1,46	9,56	16,13	135,50
ASD2	1020,65	15,4	19,76	15,61	137,50	1,18	2,82	15,74	2,33	8,63	8,01	108,30	15,02	18,34	96,83	385,20
PYI	325,25	3,3	< L.D.	5,24	7,89	0,41	0,93	41,33	0,38	6,44	1,05	5,80	0,49	9,38	10,88	76,22
PYI	379,2	2,8	7,90	3,57	41,98	0,57	0,87	170,30	0,36	7,03	0,99	8,47	1,04	8,33	23,72	55,18
PYI	449,5	6,8	< L.D.	13,14	72,51	0,75	1,79	108,20	0,79	11,11	1,65	13,43	1,47	22,60	27,26	97,26
PYI	510,5	5,1	16,48	33,38	76,67	3,80	1,66	43,44	0,61	11,03	3,97	41,59	4,53	52,03	552,40	92,97
PYI	528,8	4,7	4,94	11,59	90,28	0,83	0,98	22,63	0,54	8,29	1,77	11,53	1,76	10,83	47,71	102,30
PYI	547,75	13,9	15,12	23,53	134,10	3,48	3,02	33,69	1,44	14,57	3,75	57,94	4,88	26,34	90,76	210,50
PYI	579	14,4	13,74	15,27	130,20	3,77	3,12	29,50	1,42	14,19	3,60	68,61	5,46	26,03	80,09	230,80
PYI	598,3	15,6	21,13	20,10	292,60	1,67	3,82	40,70	1,59	21,04	5,47	48,40	3,46	29,80	123,10	238,00
PYI	613,55	8,6	13,26	18,79	134,40	2,99	2,10	31,18	0,88	13,06	3,37	38,77	3,40	18,35	77,02	161,70
PYI	623,3	4,2	< L.D.	9,88	162,10	0,41	0,88	55,21	0,45	7,51	2,27	6,84	0,73	11,05	21,51	240,30
PYI	655,25	8,4	< L.D.	19,77	142,70	0,60	1,41	55,64	0,93	16,76	1,66	22,41	2,45	12,28	26,75	126,50
PYI	669,5	5,7	< L.D.	22,63	157,70	0,89	15,83	61,31	0,62	14,07	1,59	24,63	1,99	11,73	33,31	115,50
PYI	670,6	16,1	< L.D.	17,46	203,20	0,86	2,91	55,33	1,82	42,34	8,35	47,72	2,19	35,93	50,88	682,30
PYI	673,7	16,6	6,40	23,35	254,90	3,20	3,41	44,13	1,71	27,60	8,82	28,59	2,76	39,55	84,73	505,30
PYI	676,5	16,5	5,18	40,65	244,80	1,39	3,13	42,83	1,71	33,03	5,24	32,23	2,61	36,29	88,04	484,80
PYI	679,4	32,4	6,30	57,54	329,10	1,74	4,66	38,17	2,69	56,26	8,30	108,90	4,17	59,46	162,70	947,30
DRDI	676	6,6	18,79	10,08	2,95	2,38	2,27	95,05	0,72	9,43	3,74	37,71	3,46	13,41	17,17	120,30
DRDI	626,65	32,3	< L.D.	18,35	4,99	2,40	5,82	381,60	2,71	46,83	14,47	70,27	5,01	82,85	23,78	929,30
DRDI	599,3	7,8	9,12	12,74	11,62	1,44	2,19	123,70	0,99	12,13	3,89	20,75	2,11	15,55	21,64	130,60
DRDI	584,85	19,0	< L.D.	22,66	3,80	0,52	10,52	385,90	3,60	110,70	3,59	13,91	2,50	16,88	25,34	485,80
DRDI	536,25	3,8	< L.D.	11,42	6,66	< L.D.	0,82	83,02	0,43	11,33	3,21	15,63	0,84	8,36	12,95	189,80
DRDI	464	2,7	< L.D.	6,88	4,39	< L.D.	0,73	113,60	0,31	7,19	1,18	8,17	0,42	6,94	< L.D.	130,50
DRDI	439,6	26,1	17,93	33,43	9,25	0,65	8,20	231,40	2,66	34,42	6,63	37,90	3,12	23,24	32,78	441,30
DRDI	422,2	5,3	< L.D.	9,57	1,62	< L.D.	0,77	89,35	0,65	14,26	1,85	6,93	0,78	8,69	9,50	243,50
DRDI	391,1	2,1	< L.D.	6,22	0,79	< L.D.	0,36	60,59	0,26	4,43	0,90	2,81	0,38	4,48	< L.D.	83,15
DRDI	377,35	3,6	< L.D.	8,01	1,10	< L.D.	0,74	115,80	0,40	8,59	0,80	4,36	0,37	6,80	< L.D.	150,30
DRDI	341,6	8,1	< L.D.	10,22	1,73	< L.D.	1,36	143,00	1,07	22,09	2,01	10,98	0,88	12,91	10,69	350,20

< D.L. = < Detection Limit

Annexe I

Label	Depth(m)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
DDH 893-1	33,35	17,7	29,94	3,19	10,72	2,02	0,39	1,50	0,24	1,37	0,26	0,79	0,12	0,79	0,12	69,2
DDH 893-1	41,5	12,5	22,64	2,59	9,25	1,83	0,38	1,49	0,23	1,47	0,28	0,82	0,13	0,81	0,12	54,5
DDH 893-1	52,1	22,9	41,50	4,49	16,03	3,05	0,57	2,16	0,31	1,67	0,32	0,90	0,13	0,90	0,13	95,1
DDH 893-1	62,7	9,4	18,41	2,13	7,60	1,46	0,22	1,19	0,20	1,23	0,25	0,73	0,11	0,70	0,11	43,7
DDH 893-1	64	8,0	15,01	1,72	5,81	1,08	0,16	0,76	0,13	0,76	0,15	0,47	0,07	0,45	0,07	34,6
DDH 893-1	82,6	18,7	40,94	4,87	17,54	3,19	0,58	2,05	0,29	1,71	0,33	1,01	0,15	0,99	0,16	92,5
DDH 893-1	87	70,4	131,80	14,65	50,53	9,24	1,50	6,32	0,87	4,60	0,82	2,36	0,35	2,23	0,36	296,0
CSDI	412	22,9	34,14	4,81	16,45	2,96	0,56	2,20	0,33	1,89	0,35	1,00	0,15	0,99	0,15	88,8
CSDI	497,65	38,7	65,75	7,38	25,67	4,76	0,89	4,07	0,63	3,84	0,77	2,24	0,33	2,21	0,35	157,6
CSDI	575,25	32,0	62,16	6,81	23,39	4,21	0,80	3,04	0,43	2,41	0,46	1,30	0,20	1,34	0,21	138,8
CSDI	705,2	59,6	122,90	14,73	51,75	5,87	0,81	3,42	0,56	3,17	0,61	1,79	0,28	1,92	0,31	267,8
CSDI	754,55	32,3	64,04	7,17	24,57	4,59	0,84	4,17	0,73	4,70	0,98	2,99	0,48	3,26	0,51	151,3
CSDI	770,75	55,1	107,30	11,33	38,12	6,00	1,08	4,54	0,75	4,59	0,88	2,65	0,41	2,82	0,43	236,0
CSDI	807,4	26,3	41,45	4,46	14,27	2,28	0,43	1,85	0,31	1,90	0,38	1,16	0,18	1,29	0,20	96,4
CSDI	838,55	15,5	41,41	3,61	12,98	2,76	0,59	2,37	0,38	2,29	0,43	1,24	0,19	1,26	0,19	85,2
CSDI	849,1	38,2	73,65	7,97	28,33	5,83	1,03	4,90	0,77	4,48	0,86	2,51	0,38	2,72	0,41	172,0
ASD2	967,15	23,2	37,44	4,61	14,33	2,12	0,41	2,04	0,39	2,54	0,54	1,78	0,28	2,20	0,37	92,3
ASD2	1002,1	24,1	51,21	5,40	18,70	2,94	0,54	2,05	0,31	1,77	0,33	1,01	0,16	1,15	0,19	109,8
ASD2	1020,65	53,6	98,56	9,63	32,26	4,70	0,87	3,45	0,51	3,00	0,62	1,90	0,30	2,23	0,37	212,0
PYI	325,25	20,0	40,70	4,74	16,88	3,21	0,63	2,20	0,34	1,89	0,37	1,10	0,18	1,27	0,19	93,7
PYI	379,2	19,2	38,83	4,34	15,63	3,01	0,48	2,11	0,31	1,69	0,30	0,84	0,13	0,88	0,14	87,9
PYI	449,5	31,9	71,33	7,40	26,51	5,03	1,01	4,13	0,63	3,95	0,82	2,36	0,37	2,39	0,36	158,2
PYI	510,5	30,7	74,41	8,10	33,71	9,65	1,89	9,45	1,24	6,65	1,22	3,16	0,42	2,56	0,38	183,6
PYI	528,8	23,8	62,40	5,44	19,38	3,11	0,58	2,43	0,37	2,05	0,38	1,06	0,16	1,11	0,16	122,4
PYI	547,75	49,3	99,65	10,96	38,33	5,90	1,03	4,52	0,72	4,37	0,86	2,59	0,39	2,60	0,40	221,6
PYI	579	50,7	97,59	10,69	35,39	5,80	1,08	4,47	0,73	4,37	0,89	2,70	0,42	2,89	0,44	218,2
PYI	598,3	50,5	99,69	11,16	39,32	7,07	1,18	5,40	0,86	5,07	0,99	2,93	0,44	3,03	0,47	228,1
PYI	613,55	39,0	79,17	8,55	28,61	4,52	0,82	3,47	0,55	3,29	0,62	1,92	0,29	2,00	0,31	173,1
PYI	623,3	15,8	41,62	4,20	16,10	3,23	0,62	2,16	0,32	1,86	0,36	1,12	0,18	1,27	0,21	89,0
PYI	655,25	33,1	50,75	6,54	20,96	3,03	0,56	2,09	0,35	2,16	0,44	1,39	0,23	1,64	0,26	123,5
PYI	669,5	32,1	51,36	5,86	18,09	2,77	0,51	2,04	0,33	2,00	0,39	1,24	0,19	1,39	0,22	118,5
PYI	670,6	62,9	151,20	14,73	52,78	9,42	1,48	6,86	1,00	5,89	1,20	3,67	0,59	4,30	0,68	316,7
PYI	673,7	68,3	116,30	14,69	52,17	8,65	1,47	6,50	1,06	6,48	1,31	4,08	0,63	4,53	0,71	286,9
PYI	676,5	55,7	104,90	12,36	42,49	7,56	1,28	6,09	1,00	6,12	1,23	3,72	0,57	4,16	0,64	247,8
PYI	679,4	88,0	170,30	17,80	59,74	11,18	1,87	9,79	1,66	9,85	1,97	6,00	0,92	6,68	1,03	386,8
DRDI	676	29,7	50,38	5,76	20,19	3,77	0,72	2,75	0,40	2,35	0,47	1,36	0,21	1,51	0,23	119,7
DRDI	626,65	75,6	139,40	15,18	49,05	8,56	1,77	9,53	1,95	12,83	2,62	7,76	1,19	8,38	1,26	335,1
DRDI	599,3	35,5	61,52	6,79	23,23	4,18	0,69	3,15	0,45	2,62	0,52	1,57	0,24	1,68	0,25	142,4
DRDI	584,85	168,7	341,00	37,37	116,20	15,42	0,78	7,70	0,91	3,93	0,62	1,86	0,28	2,07	0,32	697,2
DRDI	536,25	23,9	51,43	4,98	17,87	3,15	0,42	2,40	0,32	1,53	0,27	0,76	0,11	0,79	0,13	108,1
DRDI	464	22,6	50,10	4,35	14,74	2,57	0,42	2,00	0,27	1,33	0,24	0,66	0,10	0,69	0,11	100,1
DRDI	439,6	69,9	134,70	13,58	43,11	6,63	1,05	4,54	0,69	3,77	0,72	2,45	0,43	3,31	0,55	285,4
DRDI	422,2	23,1	45,90	4,61	15,42	2,52	0,39	1,93	0,29	1,54	0,29	0,85	0,13	0,91	0,15	98,1
DRDI	391,1	17,2	38,50	3,65	13,15	2,24	0,34	1,57	0,20	0,90	0,15	0,42	0,06	0,43	0,06	78,8
DRDI	377,35	29,5	65,19	6,02	20,65	3,38	0,61	2,42	0,28	1,32	0,23	0,68	0,10	0,71	0,11	131,2
DRDI	341,6	41,1	85,98	8,51	29,19	4,67	0,69	3,28	0,47	2,50	0,45	1,28	0,19	1,28	0,20	179,8

< D.L. = < Detection Limit



Annexe I

Label	facies	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	L.O.I.	Total
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
R01/4,30m	microconгло	89,33	5,61	0,65	< D.L.	< D.L.	< D.L.	0,05	3,03	0,15	0,06	0,83	99,7
R01/18,90m	microconгло	83,40	8,97	1,22	< D.L.	0,24	< D.L.	0,06	3,72	0,12	0,07	1,49	99,3
R01/30,00m	mica schiste	64,52	15,36	6,92	0,09	2,67	0,93	0,83	4,07	0,64	0,12	3,69	99,8
R06/15,10m	microconгло	89,66	5,02	1,03	< D.L.	< D.L.	0,12	< D.L.	2,59	0,41	0,10	0,76	99,7
R06/20,50m	microconгло	87,21	6,43	0,55	< D.L.	< D.L.	< D.L.	0,06	3,28	0,12	0,07	0,93	98,7
R06/39,50m	micaschiste	60,16	17,45	7,42	0,22	3,49	0,54	1,66	3,92	0,70	0,20	4,07	99,8
M52/37,35m	grès	83,19	8,57	0,18	< L.D.	< L.D.	1,24	1,44	3,34	0,07	0,04	1,61	99,68
M52/77,05m	grès	78,75	10,68	1,42	< L.D.	< L.D.	0,85	2,36	4,21	0,15	0,06	1,25	99,73
M52/87,85m	grès	76,82	11,84	1,44	< L.D.	0,25	1,33	2,87	4,16	0,24	0,1	1,33	100,38
M52/122,90m	grès	79,2	9,96	1,49	< L.D.	< L.D.	1,33	2,19	3,81	0,21	0,09	1,33	99,6
M52/151,80m	grès	60,89	16,49	4,05	0,07	1,95	3,82	3,52	3,38	0,5	0,12	5,04	99,83
M52/219,50m	grès	55,58	18,29	7,23	0,10	3,12	2,54	2,02	5,01	1,05	0,26	4,89	100,1
M52/249,00m	grès	76,51	11,08	2,02	< D.L.	0,41	1,49	3,03	3,20	0,34	0,16	1,56	99,8
M52/324,80m	grès	76,58	11,98	1,27	< D.L.	0,30	1,58	3,70	2,90	0,22	0,11	1,75	100,4
M52/347,40m	siltstone	53,49	20,38	4,01	0,08	2,88	3,63	2,39	5,73	0,68	0,24	6,38	99,9
M52/349,40m	grès	73,34	13,68	0,91	< D.L.	0,56	1,56	4,08	3,22	0,07	0,06	2,32	99,8
M52/424,25m	grès	82,69	8,98	0,60	< D.L.	< D.L.	0,79	2,56	3,18	0,11	< D.L.	0,99	99,9
M52/479,20m	grès	84,85	7,70	0,42	< D.L.	< D.L.	0,86	1,70	2,99	0,07	< D.L.	1,22	99,8
M52/501,00m	grès	85,97	7,29	0,52	< D.L.	< D.L.	0,43	1,39	3,62	0,08	< D.L.	0,71	100,0
M52/576,60m	grès	91,61	4,11	0,16	< D.L.	< D.L.	0,20	0,56	2,24	< D.L.	< D.L.	0,44	99,3
M52/619,00m	grès	85,95	7,00	0,53	< D.L.	0,10	0,56	1,08	3,44	0,12	< D.L.	0,89	99,7

< D.L. = < Detection Limit

Label	facies	As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf	In	Mo	Nb
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
R01/4,30m	microconгло	0,89	333,1	< D.L.	0,75	< D.L.	2,67	5,09	1,45	77,58	6,89	0,99	2,03	< D.L.	< D.L.	7,92
R01/18,90m	microconгло	3,93	440,8	1,54	0,36	< D.L.	3,13	7,15	3,92	25,66	11,34	1,00	2,47	< D.L.	< D.L.	3,31
R01/30,00m	mica schiste	< D.L.	431,8	< D.L.	1,59	< D.L.	12,63	93,48	10,03	59,33	21,97	1,39	3,68	0,10	< D.L.	13,04
R06/15,10m	microconгло	3,02	276,3	< D.L.	0,11	0,36	1,41	14,34	1,01	< D.L.	6,96	1,28	4,02	< D.L.	< D.L.	13,13
R06/20,50m	microconгло	< D.L.	398,6	< D.L.	0,13	< D.L.	1,25	< D.L.	1,10	8,02	7,87	1,00	2,50	< D.L.	< D.L.	3,92
R06/39,50m	micaschiste	< D.L.	480,9	4,27	0,83	< D.L.	16,38	125,76	7,16	13,10	22,83	1,60	3,92	< D.L.	0,57	12,85
M52/37,35m	grès	< L.D.	392,4	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,806	11,08	1,724	7,145	7,805	1,048	2,176	< L.D.	< L.D.	2,228
M52/77,05m	grès	1,215	511,5	0,931	< L.D.	< L.D.	1,917	12,76	1,723	6,723	10,52	1,051	4,051	< L.D.	< L.D.	3,382
M52/87,85m	grès	< L.D.	576,2	1,057	< L.D.	< L.D.	1,939	23,51	1,499	6,151	12,09	1,163	6,643	< L.D.	< L.D.	5,846
M52/122,90m	grès	4,231	488,2	0,812	< L.D.	< L.D.	1,46	16,95	1,703	< L.D.	10,04	1,103	3,525	< L.D.	< L.D.	4,982
M52/151,80m	grès	< L.D.	419,6	3,543	0,283	< L.D.	12,25	61,67	7,953	7,498	24,75	1,267	4,076	< L.D.	< L.D.	13,82
M52/219,50m	grès	0,85	600,8	6,67	0,35	< D.L.	20,19	108,97	14,95	38,58	43,23	1,84	10,19	0,12	< D.L.	30,48
M52/249,00m	grès	< D.L.	471,3	< D.L.	0,11	< D.L.	2,97	15,34	1,37	< D.L.	11,98	1,23	4,03	< D.L.	< D.L.	6,85
M52/324,80m	grès	< D.L.	421,8	1,61	< D.L.	< D.L.	2,61	19,14	1,36	< D.L.	11,77	0,98	3,48	< D.L.	< D.L.	4,54
M52/347,40m	siltstone	< D.L.	678,7	4,78	0,27	< D.L.	12,23	76,32	9,79	10,81	35,13	1,31	8,53	< D.L.	< D.L.	14,92
M52/349,40m	grès	< D.L.	471,7	1,63	< D.L.	< D.L.	2,72	11,96	1,78	< D.L.	14,24	0,97	1,59	< D.L.	< D.L.	2,18
M52/424,25m	grès	< D.L.	475,0	< D.L.	< D.L.	< D.L.	0,87	7,75	1,02	5,66	7,53	1,01	2,58	< D.L.	< D.L.	2,53
M52/479,20m	grès	< D.L.	434,1	< D.L.	< D.L.	< D.L.	0,53	< D.L.	1,05	< D.L.	6,36	0,73	1,89	< D.L.	< D.L.	1,75
M52/501,00m	grès	< D.L.	442,7	< D.L.	< D.L.	< D.L.	0,84	< D.L.	1,35	< D.L.	7,23	0,86	2,57	< D.L.	< D.L.	2,06
M52/576,60m	grès	< D.L.	335,5	< D.L.	< D.L.	< D.L.	0,30	< D.L.	0,86	< D.L.	3,93	0,83	2,09	< D.L.	< D.L.	1,20
M52/619,00m	grès	< D.L.	473,8	< D.L.	< D.L.	< D.L.	0,94	< D.L.	1,54	< D.L.	7,48	1,03	3,34	< D.L.	< D.L.	2,71

< D.L. = < Detection Limit

Label	facies	Ni	Pb	Rb	Sb	Sn	Sr	Ta	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr	Σ traces
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
R01/4,30m	microconгло	< D.L.	11,80	104,1	< D.L.	4,85	26,22	2,37	29,24	7,09	5,44	1,28	15,54	12,50	77,58	900,4
R01/18,90m	microconгло	< D.L.	9,17	165,5	0,12	1,79	29,85	0,52	9,63	5,82	6,25	0,37	8,49	18,12	90,88	903,6

Annexe I

Label	facies	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
R01/4,30m	microconгло	37,905	71,5466	8,4571	28,904	5,1349	0,3507	3,8305	0,5936	2,9574	0,5102	1,2562	0,1781	1,2303	0,1543	163,01
R01/18,90m	microconгло	9,7176	25,3415	2,1896	8,0466	1,7214	0,2603	1,4555	0,2462	1,4822	0,2669	0,7447	0,12	0,874	0,132	52,60
R01/30,00m	mica schiste	40,2691	80,4633	9,2694	34,255	6,1428	0,8937	5,0947	0,7082	3,9447	0,7056	1,9247	0,3341	2,1413	0,3177	186,46
R06/15,10m	microconгло	89,223	178,426	20,59	75,82	15,204	0,8374	11,3351	1,5089	7,488	1,0586	2,467	0,3784	2,0117	0,2717	406,62
R06/20,50m	microconгло	29,4325	58,0261	6,6976	24,611	5,3538	0,4104	4,073	0,549	2,8904	0,4752	1,2031	0,1633	1,07	0,148	135,10
R06/39,50m	micaschiste	37,3381	77,3688	9,0795	32,55	6,2313	1,3309	5,4132	0,8054	4,9977	0,9976	2,8756	0,427	2,85	0,4515	182,72
M52/37,35m	grès	23,67	33,63	5,04	17,49	2,93	0,448	1,948	0,307	1,658	0,285	0,776	0,111	0,728	0,106	89,13
M52/77,05m	grès	43,78	94,55	9,933	35,15	5,543	0,779	3,732	0,514	2,654	0,461	1,286	0,187	1,217	0,189	199,98
M52/87,85m	grès	39	78,91	9,09	32,4	5,878	0,877	4,482	0,682	3,796	0,692	1,913	0,287	1,941	0,298	180,25
M52/122,90m	grès	35,34	99,87	8,199	29,3	5,383	0,837	4,332	0,621	3,223	0,593	1,548	0,222	1,431	0,22	191,12
M52/151,80m	grès	26,98	59,4	6,891	26,63	5,42	1,045	4,558	0,677	3,788	0,716	1,931	0,285	1,864	0,282	140,47
M52/219,50m	grès	54,1277	117,054	12,819	47,839	8,8112	1,58	7,6441	1,1768	7,2471	1,3974	3,5786	0,5915	4,2508	0,639	268,76
M52/249,00m	grès	44,189	93,3288	10,195	37,389	6,5923	0,9387	4,9684	0,6935	3,7932	0,639	1,7243	0,2777	1,651	0,2634	206,64
M52/324,80m	grès	27,4732	59,2185	6,5508	23,141	4,5018	0,768	3,0632	0,4553	2,6342	0,4435	1,2193	0,1745	1,1074	0,1753	130,93
M52/347,40m	siltstone	60,3902	126,858	14,182	52,049	9,0879	1,538	6,9232	1,0372	6,1857	1,1464	3,0388	0,4514	2,9714	0,5035	286,36
M52/349,40m	grès	13,1465	26,9288	3,0604	11,628	2,163	0,5783	1,8717	0,2496	1,4091	0,2591	0,6557	0,098	0,6165	0,098	62,76
M52/424,25m	grès	17,5973	34,6794	4,4421	16,307	3,0355	0,5267	2,356	0,3164	1,7675	0,3215	0,8362	0,1208	0,834	0,122	83,26
M52/479,20m	grès	12,0086	15,3856	2,6358	9,454	1,9081	0,4244	1,3034	0,2052	1,0967	0,1986	0,544	0,0839	0,549	0,0902	45,89
M52/501,00m	grès	12,22	24,7028	2,7395	10,012	2,0392	0,4516	1,5437	0,2332	1,3646	0,2458	0,636	0,096	0,674	0,106	57,06
M52/576,60m	grès	6,1491	11,0978	1,487	5,3672	1,084	0,2136	0,7953	0,1249	0,6578	0,1221	0,291	0,044	0,323	0,05	27,81
M52/619,00m	grès	15,9469	26,3111	3,9095	14,482	2,8217	0,6024	2,0786	0,3088	1,6643	0,2829	0,76	0,107	0,769	0,119	70,16

< D.L. = < Detection Limit

## Annexe I

Label	facies	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	L.O.I.	Total
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
R03/54,10	grès	92,06	3,42	0,75	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	1,45	0,19	0,04	1,43	99,3
R03/85,50	grès	96,89	1,14	0,36	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,66	0,21	< L.D.	0,3	99,6
Tupos001/913,00	siltstone	58,77	15,08	6,1	0,08	2,48	4,16	2,11	3,94	0,78	0,19	5,62	99,3
Tupos001/915,40	siltstone	62,04	15,5	6,2	0,08	2,51	1,92	2,18	4,58	0,73	0,17	4,59	100,5
Tupos001/968,80	argilite	72,2	12,11	3,6	< L.D.	0,42	1,06	2,2	6,61	0,42	0,13	1,17	99,9
Tupos001/971,20	argilite	74,43	11,75	2,86	< L.D.	0,44	0,58	2,02	6,57	0,34	0,15	0,86	100,0
Tupos001/975,00	argilite	70,19	13,25	3,78	0,05	0,74	0,78	2,03	7,09	0,49	0,19	1,07	99,7
Tupos001/975,90	conglomérat	77,67	10,54	2,28	< L.D.	< L.D.	0,61	2,29	5,41	0,3	0,13	0,77	100,0
MH39-001/452,00	microconгло	72,42	11,64	1,19	0,06	0,43	4,31	5,67	0,26	0,21	0,09	3,73	100,0
MH39-001/500,10	argilite	62,9	15,58	5,97	0,07	2,05	1,84	2,44	4,08	0,67	0,19	4,54	100,3
MH39-001/502,00	argilite	58,82	15,89	8,7	0,08	2,53	1,56	1,87	4,53	0,77	0,15	4,94	99,8

&lt; D.L. = &lt; Detection Limit

Label	facies	As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf	In	Mo	Nb
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
R03/54,10	grès	1,17	196,30	< L.D.	< L.D.	< L.D.	8,53	14,54	0,84	22,38	3,77	0,84	4,57	< L.D.	< L.D.	3,07
R03/85,50	grès	< L.D.	113,90	< L.D.	< L.D.	< L.D.	18,15	8,90	0,33	29,81	1,49	0,86	3,13	< L.D.	< L.D.	2,22
Tupos001/913,00	siltstone	7,61	861,70	2,24	0,29	< L.D.	17,01	76,97	13,61	41,49	20,28	1,59	5,99	< L.D.	2,11	12,04
Tupos001/915,40	siltstone	7,07	735,50	2,51	0,30	< L.D.	17,31	81,22	14,45	40,03	21,10	1,68	5,39	< L.D.	1,58	11,93
Tupos001/968,80	argilite	7,04	1659,00	2,73	< L.D.	< L.D.	9,15	53,03	2,32	29,30	16,24	1,22	4,14	< L.D.	< L.D.	7,50
Tupos001/971,20	argilite	8,18	2281,00	2,32	< L.D.	< L.D.	8,22	44,54	2,09	9,81	16,72	1,28	3,84	< L.D.	< L.D.	6,73
Tupos001/975,00	argilite	9,34	3047,00	3,30	< L.D.	< L.D.	9,85	55,38	2,60	11,77	21,63	1,42	4,06	< L.D.	< L.D.	8,72
Tupos001/975,90	conglomérat	7,06	3155,00	1,92	< L.D.	< L.D.	4,32	33,56	1,17	28,17	14,15	1,05	4,28	< L.D.	< L.D.	7,09
MH39-001/452,00	microconгло	1,78	2177,00	1,02	< L.D.	0,45	2,58	27,19	0,48	10,62	10,63	0,79	2,54	< L.D.	< L.D.	4,78
MH39-001/500,10	argilite	7,48	467,80	2,42	0,32	< L.D.	14,72	68,66	11,98	27,14	21,37	1,65	5,40	< L.D.	0,68	12,62
MH39-001/502,00	argilite	23,18	463,90	2,71	0,52	< L.D.	18,63	82,97	13,92	31,00	22,55	1,88	5,46	0,10	0,92	13,15

&lt; D.L. = &lt; Detection Limit

Label	facies	Ni	Pb	Rb	Sb	Sn	Sr	Ta	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr	Σ traces
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
R03/54,10	grès	7,52	13,74	43,79	< L.D.	2,30	80,58	0,29	5,48	1,54	12,85	0,34	11,58	8,55	178,70	623,24
R03/85,50	grès	< L.D.	5,29	19,00	< L.D.	4,19	17,45	0,19	6,46	1,40	4,82	0,27	9,83	< L.D.	123,50	371,19
Tupos001/913,00	siltstone	41,48	30,88	228,60	1,05	2,87	202,50	1,17	13,87	3,71	71,31	1,90	31,14	103,50	214,60	2011,52
Tupos001/915,40	siltstone	41,81	20,02	247,20	1,00	2,78	125,30	1,12	12,92	2,83	57,61	1,85	31,16	97,43	196,80	1779,90
Tupos001/968,80	argilite	30,01	22,98	254,30	0,49	1,68	73,44	0,71	7,47	7,54	30,00	2,58	22,46	25,31	159,40	2430,05
Tupos001/971,20	argilite	27,12	17,82	267,60	0,40	1,64	72,58	0,65	7,02	6,16	30,63	1,60	22,42	25,73	151,10	3017,18
Tupos001/975,00	argilite	31,06	18,20	302,80	0,38	1,81	72,53	0,85	8,75	9,39	36,25	1,61	28,92	40,87	154,90	3883,39
Tupos001/975,90	conglomérat	16,13	19,11	183,30	0,32	1,61	83,81	0,81	10,67	5,03	23,13	1,44	20,03	18,71	168,60	3810,46
MH39-001/452,00	microconгло	9,24	14,30	12,99	< L.D.	0,65	347,10	0,45	4,97	1,61	24,79	0,45	11,51	18,59	100,70	2787,20
MH39-001/500,10	argilite	36,87	24,56	203,60	0,87	2,64	148,10	1,17	15,23	9,06	95,30	1,58	27,81	97,51	198,70	1505,22
MH39-001/502,00	argilite	44,72	29,48	232,40	1,58	2,82	117,90	1,24	14,61	8,47	88,10	2,24	31,84	110,70	204,70	1571,68

&lt; D.L. = &lt; Detection Limit

Label	facies	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
R03/54,10	grès	27,06	60,83	6,567	23,31	3,247	0,471	2,09	0,338	1,997	0,389	1,147	0,176	1,188	0,19	129
R03/85,50	grès	16,03	30,5	3,626	12,97	2,368	0,254	1,956	0,308	1,732	0,317	0,875	0,127	0,856	0,134	72,053
Tupos001/913,00	siltstone	40,85	82,14	9,829	37,66	7,228	1,406	6,039	0,93	5,512	1,087	3,197	0,49	3,365	0,539	200,272
Tupos001/915,40	siltstone	42,16	90,8	10,95	41,75	7,777	1,492	6,355	0,955	5,573	1,085	3,122	0,488	3,257	0,509	216,273



---

## *ANNEXE II*

Analyses à la microsonde électronique (CAMECA SX 100)

ont été réalisés sur des lames minces polies

à l'université Henri Poincaré (Nancy)

---



## Annexe II

Sample	212-3B-5	212-3B-2	302-6B-2	302-6B-4	302-6B-1	302-6B-3	212-3B-7	212-3B-3
FeO	2,646	2,287	3,101	3,557	4,185	2,561	3,856	2,224
Na <sub>2</sub> O	0,041	0,08	0,053	0,042	0,09	0,041	0,075	0,008
K <sub>2</sub> O	9,201	8,941	9,423	9,502	9,325	9,223	9,163	9,118
SiO <sub>2</sub>	49,809	49,821	48,424	48,502	49,715	49,796	49,607	49,783
MnO	0	0,263	0,025	0	0,085	0,129	0,014	0
CaO	0,195	0,149	0,08	0,086	0,186	0,184	0,177	0,099
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,339	31,484	30,391	29,554	29,802	30,503	29,806	31,434
TiO <sub>2</sub>	0,142	0,024	0,157	0,293	0,208	0,047	0,352	0,042
MgO	4,712	3,685	2,193	1,701	1,915	1,79	3,057	2,539
<b>Total</b>	<b>98,085</b>	<b>96,734</b>	<b>93,847</b>	<b>93,237</b>	<b>95,511</b>	<b>94,274</b>	<b>96,107</b>	<b>95,247</b>

Sample	120-8A-5	120-8A-7	120-8A-6	120-8A-10	212-3B-6	212-3B-4	212-3B-1	212-3B-8
FeO	2,824	2,712	2,567	1,986	4,456	2,561	2,376	2,94
Na <sub>2</sub> O	0,061	0,104	0,097	0,08	0,063	0,067	0,078	0,03
K <sub>2</sub> O	9,122	9,149	9,412	9,654	9,24	9,13	9,015	9,542
SiO <sub>2</sub>	48,376	48,405	47,939	48,738	47,934	48,797	49,395	49,592
MnO	0	0,074	0,098	0	0,237	0,098	0	0,183
CaO	0,107	0,206	0,078	0,163	0,178	0,216	0,181	0,193
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,658	34,28	34,641	34,153	29,16	31,37	30,647	29,993
TiO <sub>2</sub>	0,037	0,076	0,092	0,055	0,263	0,12	0,072	0,173
MgO	0,618	1,721	3,729	0,846	3,304	1,811	1,796	2,134
<b>Total</b>	<b>95,803</b>	<b>96,727</b>	<b>98,653</b>	<b>95,675</b>	<b>94,835</b>	<b>94,17</b>	<b>93,56</b>	<b>94,78</b>

Sample	1375-9B-39	120-8A-4	120-8A-2	120-8A-9	120-8A-1	120-8A-12	120-8A-11	120-8A-8
FeO	12,825	5,023	2,867	5,383	2,822	4,048	2,238	3,291
Na <sub>2</sub> O	0,406	0,79	0,049	0,06	0,096	0,145	0,071	0,11
K <sub>2</sub> O	7,691	9,599	9,518	9,251	9,608	9,308	9,473	9,135
SiO <sub>2</sub>	40,353	45,958	46,93	47,598	47,636	47,661	48,004	48,251
MnO	0,101	0	0	0,071	0,068	0,047	0	0
CaO	0,029	0,024	0,085	0,129	0,038	0,101	0,198	0,162
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,107	31,363	34,319	32,557	33,825	32,767	34,636	34,021
TiO <sub>2</sub>	0,118	0,477	0,073	0,135	0,078	0,127	0,043	0,081
MgO	1,013	1,882	1,354	1,59	2,007	0,57	1,493	0,713
<b>Total</b>	<b>91,643</b>	<b>95,116</b>	<b>95,195</b>	<b>96,774</b>	<b>96,178</b>	<b>94,774</b>	<b>96,156</b>	<b>95,764</b>

Sample	476-4A-17	1075-15	476-4A-8	476-4A-26	476-4A-13	476-4A-6	476-4A-10	476-4A-19
FeO	6,855	2,093	7,425	2,922	7,543	3,321	8,799	6,729
Na <sub>2</sub> O	0,144	0,275	0,041	0,162	0,127	1,303	0,053	0,134
K <sub>2</sub> O	7,867	10,225	8,747	9,229	8,873	9,064	8,729	7,516
SiO <sub>2</sub>	43,875	43,875	43,851	43,755	43,701	42,762	41,235	40,865
MnO	0,173	0	0,2	0	0,222	0,027	0,092	0,15
CaO	0,172	0,012	0,139	0,068	0,173	0,019	0,162	0,156
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,381	33,866	21,936	28,076	22,291	31,298	21,626	22,781
TiO <sub>2</sub>	1,114	0,138	2,088	0,085	1,726	0,412	1,502	1,225
MgO	8,735	0,317	6,275	2,446	7,298	0,939	6,316	8,707
<b>Total</b>	<b>92,316</b>	<b>90,801</b>	<b>90,702</b>	<b>86,743</b>	<b>91,954</b>	<b>89,145</b>	<b>88,514</b>	<b>88,263</b>

Sample	1375-9B-1	1075-13	1075-7	476-4A-25	476-4A-15	476-4A-31	476-4A-29	476-4A-12
FeO	3,674	2,071	2,117	4,513	3,755	4,578	5,364	5,333
Na <sub>2</sub> O	0,748	0,238	0,237	0,165	0,625	0,218	0,313	0,047
K <sub>2</sub> O	10,237	10,539	10,576	10,85	9,584	10,369	10,812	7,402
SiO <sub>2</sub>	45,213	45,047	44,977	44,828	44,806	44,66	44,55	44,534
MnO	0,085	0,008	0	0,022	0	0	0,018	0,019
CaO	0,003	0,021	0,012	0,006	0	0,013	0	0,166
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,954	32,52	32,775	29,933	29,609	28,866	29,162	24,726
TiO <sub>2</sub>	0,512	0,226	0,188	0	0,417	1,364	0,594	0,703
MgO	0,909	0,545	0,427	0,734	1,51	1,611	1,419	6,582
<b>Total</b>	<b>93,335</b>	<b>91,215</b>	<b>91,309</b>	<b>91,051</b>	<b>90,306</b>	<b>91,679</b>	<b>92,232</b>	<b>89,512</b>

## Annexe II

Sample	476-4A-4	1075-2	476-4A-5	476-4A-32	1075-10	476-4A-3	1075-3	1075-5
FeO	6,193	2,215	5,427	3,608	2,229	4,91	2,612	2,281
Na <sub>2</sub> O	0,057	0,265	0,08	0,641	0,375	0,071	0,193	0,329
K <sub>2</sub> O	8,101	10,411	8,18	9,884	10,298	9,03	10,282	9,978
SiO <sub>2</sub>	46,192	45,823	45,814	45,66	45,573	45,545	45,43	45,239
MnO	0,214	0	0,2	0,111	0,002	0,132	0	0
CaO	0,208	0,005	0,129	0,049	0,05	0,252	0,021	0,024
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,483	33,719	24,623	30,646	33,878	25,03	31,98	32,728
TiO <sub>2</sub>	1,232	0,148	0,841	0,4	0,212	0,423	0,152	0,131
MgO	6,618	0,489	5,672	1,243	0,508	4,184	0,634	0,388
<b>Total</b>	<b>92,298</b>	<b>93,075</b>	<b>90,966</b>	<b>92,242</b>	<b>93,125</b>	<b>89,577</b>	<b>91,304</b>	<b>91,098</b>

Sample	1075-19	1075-11	1039-3A-28	1039-3A-35	1075-8	476-4A-30	1075-18	1039-3A-29
FeO	2,554	3,283	3,491	3,889	2,619	3,627	2,602	3,945
Na <sub>2</sub> O	0,213	0,161	0,236	0,195	0,244	1,235	0,156	0,139
K <sub>2</sub> O	9,778	10,368	10,288	10,127	10,393	9,259	9,947	10,009
SiO <sub>2</sub>	46,866	46,777	46,57	46,485	46,317	46,291	46,239	46,199
MnO	0,088	0	0,005	0	0,106	0,147	0,052	0,012
CaO	0,035	0,025	0,048	0,056	0,029	0,016	0,029	0,059
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,002	31,773	31,82	30,551	33,671	32,463	31,654	30,152
TiO <sub>2</sub>	0,186	0,158	0,19	0,137	0,168	0,335	0,213	0,169
MgO	0,629	0,563	0,559	0,61	0,503	1,094	0,67	0,699
<b>Total</b>	<b>92,351</b>	<b>93,108</b>	<b>93,207</b>	<b>92,05</b>	<b>94,05</b>	<b>94,467</b>	<b>91,562</b>	<b>91,383</b>

Sample	1039-3A-1	1039-3A-27	476-4A-22	1039-3A-34	476-4A-7	476-4A-1	1039-3A-36	1375-9B-4
FeO	2,997	3,593	3,187	3,131	5,482	4,208	2,955	4,33
Na <sub>2</sub> O	0,185	0,187	0,078	0,235	0,129	0,09	0,236	0,714
K <sub>2</sub> O	9,868	10,446	8,754	10,295	9,481	8,74	10,134	9,521
SiO <sub>2</sub>	47,755	47,751	47,652	47,486	47,42	47,199	47,116	46,917
MnO	0,059	0,06	0,105	0	0,086	0	0,045	0,047
CaO	0,013	0,057	0,214	0,037	0,122	0,224	0,051	0,061
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,482	31,626	27,16	31,502	25,073	25,451	31,952	33,064
TiO <sub>2</sub>	0,243	0,207	0,037	0,164	0,757	0,366	0,175	0,306
MgO	0,585	0,602	2,759	0,549	2,362	4,337	0,497	0,241
<b>Total</b>	<b>93,187</b>	<b>94,529</b>	<b>89,946</b>	<b>93,399</b>	<b>90,912</b>	<b>90,615</b>	<b>93,161</b>	<b>95,201</b>

Sample	1039-3A-15	1075-9	476-4A-2	1039-3A-12	1039-3A-33	1039-3A-13	1039-3A-16	1039-3A-32
FeO	3,442	3,063	0,412	3,077	3,053	3,229	3,902	3,669
Na <sub>2</sub> O	0,178	0,255	0,726	0,173	0,261	0,175	0,196	0,174
K <sub>2</sub> O	10,168	10,563	9,98	9,648	10,226	10,102	10,488	10,185
SiO <sub>2</sub>	48,153	48,032	48,009	47,967	47,828	47,79	47,768	47,762
MnO	0	0	0,067	0,049	0	0,054	0,068	0,022
CaO	0,076	0,014	0,046	0,024	0,031	0,021	0,068	0,075
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,86	32,054	33,775	31,557	31,734	31,702	31,082	31,332
TiO <sub>2</sub>	0,167	0,434	0,759	0,14	0,18	0,174	0,271	0,165
MgO	0,536	0,522	1,49	0,547	0,473	0,517	0,639	0,537
<b>Total</b>	<b>94,58</b>	<b>94,937</b>	<b>95,264</b>	<b>93,182</b>	<b>93,786</b>	<b>93,764</b>	<b>94,482</b>	<b>93,921</b>

Sample	476-4A-16	1039-3A-31	1039-3A-5	1039-3A-7	1039-3A-26	1039-3A-11	476-4A-20	1039-3A-6
FeO	3,01	2,982	3,528	3,257	2,969	3,124	3,853	3,554
Na <sub>2</sub> O	0,074	0,187	0,173	0,159	0,153	0,152	0,019	0,184
K <sub>2</sub> O	8,395	9,73	10,134	10,302	9,6	9,832	8,216	10,184
SiO <sub>2</sub>	48,842	48,839	48,792	48,746	48,736	48,373	48,362	48,205
MnO	0,017	0	0	0,052	0,021	0	0,033	0,018
CaO	0,135	0,056	0,024	0,053	0,053	0,093	0,178	0,024
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,267	31,262	31,345	31,569	32,1	31,254	27,011	31,058
TiO <sub>2</sub>	0,043	0,11	0,314	0,27	0,21	0,287	0,146	0,387
MgO	3,447	0,547	0,586	0,538	0,514	0,59	3,966	0,597
<b>Total</b>	<b>92,23</b>	<b>93,713</b>	<b>94,896</b>	<b>94,946</b>	<b>94,356</b>	<b>93,705</b>	<b>91,784</b>	<b>94,211</b>



## Annexe II

Sample	476-4A-24	476-4A-27	476-4A-21	1375-9B-38	1075-6	476-4A-28	1039-3A-14	1039-3A-39
FeO	17,712	11,854	12,781	15,611	0,137	2,999	2,753	2,737
Na <sub>2</sub> O	0,122	0,126	0,05	0,483	0,537	0,101	0,193	0,244
K <sub>2</sub> O	7,858	7,531	7,245	7,426	15,539	9,556	9,462	9,563
SiO <sub>2</sub>	33,238	39,828	34,501	36,833	61,217	51,658	51,153	49,198
MnO	0,326	0,173	0,159	0,085	0,058	0,16	0,037	0
CaO	0,115	0,116	0,125	0,032	0,015	0,128	0,084	0,119
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,361	18,88	17,636	26,683	17,92	28,643	31,686	32,44
TiO <sub>2</sub>	3,703	2,24	2,629	0,088	0,005	0,072	0,167	0,046
MgO	9,54	7,92	11,917	1,292	0	2,521	0,557	0,463
<b>Total</b>	<b>88,975</b>	<b>88,668</b>	<b>87,043</b>	<b>88,533</b>	<b>95,428</b>	<b>95,838</b>	<b>96,092</b>	<b>94,81</b>

Sample	1330-6-4	1330-6-8	1330-6-11	1039-3A-30	476-4A-18	476-4A-9	476-4A-11	476-4A-14
FeO	40,315	38,088	35,274	14,735	10,544	8,368	13,041	10,489
Na <sub>2</sub> O	0	0,032	0,041	0,15	0,071	0,103	0,094	0,118
K <sub>2</sub> O	0,009	0,035	0,043	9,221	8,095	7,489	8,143	8,129
SiO <sub>2</sub>	24,327	24,71	24,776	37,168	38,37	38,681	37,523	37,098
MnO	0,355	0,365	0,645	0,293	0,29	0,084	0,082	0,127
CaO	0,024	0,015	0,045	0,048	0,091	0,159	0,127	0,095
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,978	18,416	19,343	14,527	18,653	19,988	16,612	15,667
TiO <sub>2</sub>	0,056	0,023	0,01	3,48	2,776	2,33	2,911	4,505
MgO	6,852	10,501	10,786	13,854	10,136	8,845	10,424	7,698
<b>Total</b>	<b>90,916</b>	<b>92,185</b>	<b>90,963</b>	<b>93,476</b>	<b>89,026</b>	<b>86,047</b>	<b>88,957</b>	<b>83,926</b>

Sample	1375-9B-75	1375-9B-80	1375-9B-3	1075-1	1075-4	1075-12	1075-14	1075-16
FeO	37,142	32,852	37,779	39,42	39,589	38,54	38,664	38,035
Na <sub>2</sub> O	0,05	0,037	0,045	0	0,029	0	0,023	0,051
K <sub>2</sub> O	0,569	0,188	0,223	0,002	0,055	0	0,021	0,157
SiO <sub>2</sub>	24,236	24,664	25,281	23,331	21,96	22,306	23,281	22,784
MnO	0,335	0,232	0,157	1,226	1,458	1,301	0,961	0,853
CaO	0,053	0,046	0,016	0,058	0,01	0,052	0,052	0,061
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,101	21,054	17,843	19,456	18,917	19,98	19,671	18,389
TiO <sub>2</sub>	0,052	0,048	0,231	0,005	0	0,003	0,019	0,032
MgO	3,602	7,93	5,247	2,897	2,362	2,446	3,953	4,053
<b>Total</b>	<b>86,14</b>	<b>87,051</b>	<b>86,822</b>	<b>86,395</b>	<b>84,38</b>	<b>84,628</b>	<b>86,645</b>	<b>84,415</b>

Sample	1075-17	1075-20	1075-16	1330-6-10	1330-6-9	1330-6-3	1330-6-1	1330-6-2
FeO	38,531	38,133	38,035	45,125	43,431	45,608	44,234	40,915
Na <sub>2</sub> O	0,006	0,02	0,051	0,026	0,02	0,091	0	0
K <sub>2</sub> O	0,068	0,036	0,157	0,002	0,04	0,016	0,012	0,011
SiO <sub>2</sub>	21,77	23,727	22,784	22,191	22,255	22,521	23,006	23,286
MnO	0,818	0,855	0,853	0,705	0,533	0,472	0,622	0,347
CaO	0,063	0,025	0,061	0	0	0,023	0,008	0,037
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,056	18,363	18,389	19,761	19,645	19,31	19,41	19,155
TiO <sub>2</sub>	0,012	0,021	0,032	0,009	0,005	0,029	0,003	0
MgO	3,793	4,47	4,053	1,764	3,473	2,023	2,639	5,145
<b>Total</b>	<b>84,117</b>	<b>85,65</b>	<b>84,415</b>	<b>89,583</b>	<b>89,402</b>	<b>90,093</b>	<b>89,934</b>	<b>88,896</b>

Sample	1375-9B-76	1375-9B-77	1375-9B-78	1375-9B-79	1375-9B-80	1375-9B-81	1375-9B-82	1375-9B-83
FeO	32,774	27,121	44,128	37,107	32,852	42,369	34,102	34,706
Na <sub>2</sub> O	0,013	0	0,006	0	0,037	0	0,035	0
K <sub>2</sub> O	0,016	0,022	0	0,041	0,188	0	0,009	0
SiO <sub>2</sub>	24,144	24,965	21,932	23,706	24,664	23,697	24,353	23,144
MnO	0,244	0,291	0,29	0,204	0,232	0,338	0,28	0,123
CaO	0	0,019	0	0,035	0,046	0,024	0,009	0,074
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,02	21,184	18,345	20,07	21,054	17,676	20,838	20,317
TiO <sub>2</sub>	0,054	0,076	0,016	0,061	0,048	0	0,038	0,042
MgO	8,542	12,643	0,6	5,566	7,93	1,67	7,272	7,067
<b>Total</b>	<b>86,807</b>	<b>86,321</b>	<b>85,317</b>	<b>86,79</b>	<b>87,051</b>	<b>85,774</b>	<b>86,936</b>	<b>85,473</b>

## Annexe II

Sample	1375-9B-84	1375-9B-3	1375-9B-44	1375-9B-45	1375-9B-47	1375-9B-57	1375-9B-58	1375-9B-71
FeO	34,683	37,779	32,815	24,56	30,198	31,619	32,639	32,84
Na <sub>2</sub> O	0,082	0,045	0	0,062	0,068	0,04	0	0,075
K <sub>2</sub> O	0,027	0,223	0,047	0,633	0,367	0,27	0,103	0,777
SiO <sub>2</sub>	22,26	25,281	23,355	27,324	25,209	23,877	23,206	25,306
MnO	0,317	0,157	0,195	0,069	0,291	0,107	0,214	0,169
CaO	0,069	0,016	0,05	0,048	0,044	0,029	0,018	0,141
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,968	17,843	20,823	21,962	21,149	20,636	20,823	20,699
TiO <sub>2</sub>	0,049	0,231	0,045	0,042	0,079	0,052	0,078	0,085
MgO	6,999	5,247	8,245	12,863	8,785	8,355	8,9	6,274
<b>Total</b>	<b>84,454</b>	<b>86,822</b>	<b>85,575</b>	<b>87,563</b>	<b>86,19</b>	<b>84,985</b>	<b>85,981</b>	<b>86,366</b>

Sample	1375-9B-17	1375-9B-18	1375-9B-19	1375-9B-21	1375-9B-22	1375-9B-23	1375-9B-24	1375-9B-25
FeO	41,437	41,685	28,352	33,83	37,036	31,004	27,35	28,796
Na <sub>2</sub> O	0,026	0	0,061	0	0,022	0,037	0	0,018
K <sub>2</sub> O	0	0,012	0,04	0	0,02	0	0,018	0,038
SiO <sub>2</sub>	21,725	23,251	23,843	22,759	23,163	24,234	24,023	24,416
MnO	0,142	0,387	0,144	0,175	0,343	0,202	0,125	0,142
CaO	0,021	0,014	0,093	0,022	0	0,009	0,027	0,018
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,935	18,664	21,46	20,803	19,963	22,021	21,419	21,207
TiO <sub>2</sub>	0,054	0,038	0,1	0,056	0,184	0,064	0,085	0,033
MgO	3,672	3,021	12,595	7,744	5,655	9,8	12,273	10,991
<b>Total</b>	<b>85,012</b>	<b>87,072</b>	<b>86,688</b>	<b>85,389</b>	<b>86,386</b>	<b>87,371</b>	<b>85,32</b>	<b>85,659</b>

Sample	1375-9B-26	1375-9B-27	1375-9B-28	1375-9B-29	1375-9B-30	1375-9B-31	1375-9B-32	1375-9B-33
FeO	33,147	29,608	33,607	29,172	29,241	31,745	23,745	28,4
Na <sub>2</sub> O	0,042	0,031	0,04	0,047	0,018	0,049	0,017	0,005
K <sub>2</sub> O	0,135	0,047	0,014	0,049	0,214	0	0,035	0
SiO <sub>2</sub>	22,967	23,794	24,257	23,432	24,721	22,306	25,086	23,369
MnO	0,257	0,086	0,1	0,225	0,24	0,228	0,149	0,087
CaO	0,035	0,022	0,04	0,046	0,041	0,029	0,022	0,016
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,564	20,707	20,623	20,994	21,544	19,993	21,424	21,161
TiO <sub>2</sub>	0,038	0,028	0	0,063	0,07	0,058	0,043	0,05
MgO	7,893	11,029	8,407	10,988	10,06	8,83	15,513	12,739
<b>Total</b>	<b>85,078</b>	<b>85,352</b>	<b>87,088</b>	<b>85,016</b>	<b>86,149</b>	<b>83,238</b>	<b>86,034</b>	<b>85,827</b>

Sample	1375-9B-35	1375-9B-41	1375-9B-42	1375-9B-43	1375-9B-44	1375-9B-45	1375-9B-47	1375-9B-49
FeO	31,579	41,644	30,899	29,427	32,815	24,56	30,198	36,862
Na <sub>2</sub> O	0	0	0,05	0,058	0	0,062	0,068	0
K <sub>2</sub> O	0,092	0,02	0,18	0,09	0,047	0,633	0,367	0,011
SiO <sub>2</sub>	24,101	22,141	23,89	24,374	23,355	27,324	25,209	22,899
MnO	0,123	0,188	0,246	0,272	0,195	0,069	0,291	0,23
CaO	0,036	0,03	0,06	0,021	0,05	0,048	0,044	0,034
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,282	17,776	20,825	21,116	20,823	21,962	21,149	19,874
TiO <sub>2</sub>	0,096	0,048	0,067	0,039	0,045	0,042	0,079	0,052
MgO	9,3	2,884	9,038	10,077	8,245	12,863	8,785	5,762
<b>Total</b>	<b>86,609</b>	<b>84,731</b>	<b>85,255</b>	<b>85,474</b>	<b>85,575</b>	<b>87,563</b>	<b>86,19</b>	<b>85,724</b>

Sample	1375-9B-50	1375-9B-51	1375-9B-52	1375-9B-53	1375-9B-54	1375-9B-55	1375-9B-56	1375-9B-57
FeO	39,936	30,441	26,717	34,817	43,684	34,281	34,391	31,619
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,127	0,025	0,011	0	0,095	0	0,04
K <sub>2</sub> O	0,034	0,007	0,018	0,031	0	0,047	0,009	0,27
SiO <sub>2</sub>	23,487	24,637	24,567	22,483	23,042	23,15	22,583	23,877
MnO	0,329	0,093	0,179	0,078	0,337	0,306	0,273	0,107
CaO	0,069	0,101	0,017	0,036	0,06	0,048	0,001	0,029
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,313	21,44	20,9	20,299	17,353	20,11	20,807	20,636
TiO <sub>2</sub>	0,027	0,079	0,045	0,032	0,027	0,069	0,014	0,052
MgO	4,059	10,648	12,846	7,886	0,672	8,128	7,623	8,355
<b>Total</b>	<b>86,314</b>	<b>87,573</b>	<b>85,314</b>	<b>85,673</b>	<b>85,175</b>	<b>86,234</b>	<b>85,701</b>	<b>84,985</b>

## Annexe II

Sample	1375-9B-58	1375-9B-59	1375-9B-61	1375-9B-62	1375-9B-63	1375-9B-65	1375-9B-66	1375-9B-67
FeO	32,639	28,123	37,458	31,561	34,826	32,335	32,788	36,613
Na <sub>2</sub> O	0	0,023	0,035	0	0,033	0	0,03	0,011
K <sub>2</sub> O	0,103	0,033	0,035	0,013	0,018	0,005	0,009	0
SiO <sub>2</sub>	23,206	23,309	23,299	23,83	23,603	23,492	23,264	22,931
MnO	0,214	0,131	0,266	0,154	0,319	0,125	0,246	0,252
CaO	0,018	0,046	0,005	0,004	0,007	0,017	0,03	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,823	20,756	19,249	21,184	21,023	20,53	21,105	20,519
TiO <sub>2</sub>	0,078	0,071	0,032	0,057	0,049	0,017	0,062	0,078
MgO	8,9	12,075	5,336	9,597	7,26	8,745	8,048	5,989
<b>Total</b>	<b>85,981</b>	<b>84,567</b>	<b>85,715</b>	<b>86,4</b>	<b>87,138</b>	<b>85,266</b>	<b>85,582</b>	<b>86,393</b>

Sample	1375-9B-68	1375-9B-69	1375-9B-70	1375-9B-71	1375-9B-72	1375-9B-73	1375-9B-74	1375-9B-75
FeO	34,128	37,252	38,284	32,84	31,424	34,524	26,962	37,142
Na <sub>2</sub> O	0,035	0,078	0	0,075	0	0,035	0,028	0,05
K <sub>2</sub> O	0,007	0,07	0,016	0,777	0,007	0,016	0,022	0,569
SiO <sub>2</sub>	23,253	22,585	23,192	25,306	23,293	21,891	24,955	24,236
MnO	0,142	0,173	0,272	0,169	0,318	0,141	0,235	0,335
CaO	0,071	0,083	0,01	0,141	0,012	0,063	0,019	0,053
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,47	19,404	19,69	20,699	20,656	20,218	20,97	20,101
TiO <sub>2</sub>	0,065	0,015	0,06	0,085	0	0,004	0,064	0,052
MgO	8,801	5,823	5,199	6,274	9,752	7,623	12,086	3,602
<b>Total</b>	<b>86,972</b>	<b>85,483</b>	<b>86,723</b>	<b>86,366</b>	<b>85,462</b>	<b>84,515</b>	<b>85,341</b>	<b>86,14</b>

Sample	1375-9B-8	1375-9B-9	1375-9B-10	1375-9B-11	1375-9B-12	1375-9B-13	1375-9B-14	1375-9B-15
FeO	23,166	30,474	37,702	34,013	34,187	34,395	30,26	31,284
Na <sub>2</sub> O	0,127	0	0,011	0,119	0	0,041	0,003	0,053
K <sub>2</sub> O	0,391	0,018	0	0,007	0,018	0,095	0	0,4
SiO <sub>2</sub>	25,995	24,037	22,765	22,761	22,816	23,887	24,056	24,942
MnO	0,084	0,136	0,235	0,325	0,072	0,148	0,346	0,145
CaO	0	0	0	0,052	0,085	0,042	0,022	0,046
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,996	20,884	19,693	20,886	20,577	20,731	20,934	21,082
TiO <sub>2</sub>	0,051	0,06	0,08	0,087	0,048	0,044	0,038	0,054
MgO	14,916	11,026	5,878	7,562	7,843	7,762	10,65	9,039
<b>Total</b>	<b>86,726</b>	<b>86,635</b>	<b>86,364</b>	<b>85,812</b>	<b>85,646</b>	<b>87,145</b>	<b>86,309</b>	<b>87,045</b>

Sample	1039-3A-17	1039-3A-19	1039-3A-20	1039-3A-21	1039-3A-22	1039-3A-23	1039-3A-24	1039-3A-25
FeO	38,299	39,851	40,777	40,85	40,169	39,699	39,463	39,889
Na <sub>2</sub> O	0,017	0	0	0,009	0,003	0	0	0,034
K <sub>2</sub> O	0	0	0,009	0,007	0,011	0,009	0,057	0,263
SiO <sub>2</sub>	24,426	23,516	23,044	22,353	23,92	23,133	23,619	24,2
MnO	1,217	1,254	1,445	1,3	1,571	1,129	1,212	1,206
CaO	0,046	0,048	0,022	0,029	0,026	0,025	0,033	0,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,358	18,666	19,137	20,114	19,354	18,956	18,805	19,254
TiO <sub>2</sub>	0,017	0,047	0,017	0	0,036	0,01	0,001	0,026
MgO	4,307	3,872	3,021	2,164	3,275	3,362	3,609	3,08
<b>Total</b>	<b>86,687</b>	<b>87,254</b>	<b>87,472</b>	<b>86,826</b>	<b>88,365</b>	<b>86,323</b>	<b>86,799</b>	<b>88,012</b>

Sample	1039-3A-37	1039-3A-38	1039-3A-25	1375-9B-2	1375-9B-3	1375-9B-5	1375-9B-6	1375-9B-7
FeO	40,312	40,013	39,889	45,143	37,779	28,324	34,307	26,446
Na <sub>2</sub> O	0,02	0	0,034	0,012	0,045	0,067	0	0
K <sub>2</sub> O	0,009	0	0,263	0,019	0,223	0,029	0	0,088
SiO <sub>2</sub>	23,044	23,526	24,2	22,547	25,281	24,189	23,876	25,244
MnO	1,244	1,118	1,206	0,17	0,157	0,249	0,269	0,266
CaO	0,047	0,027	0,06	0,026	0,016	0,046	0,011	0,047
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,758	18,309	19,254	18,037	17,843	21,253	20,663	21,272
TiO <sub>2</sub>	0,002	0,059	0,026	0,069	0,231	0,075	0,068	0,047
MgO	3,145	3,943	3,08	1,331	5,247	12,111	7,966	12,721
<b>Total</b>	<b>86,581</b>	<b>86,995</b>	<b>88,012</b>	<b>87,354</b>	<b>86,822</b>	<b>86,343</b>	<b>87,16</b>	<b>86,131</b>

## Annexe II

<b>Sample</b>	<b>1039-3A-2</b>	<b>1039-3A-3</b>	<b>1039-3A-4</b>	<b>1039-3A-8</b>	<b>1039-3A-9</b>	<b>1039-3A-10</b>
FeO	39,144	39,438	40,111	40,142	40,04	39,516
Na <sub>2</sub> O	0	0,003	0	0	0	0
K <sub>2</sub> O	0	0,03	0,004	0,018	0,018	0,162
SiO <sub>2</sub>	23,508	22,911	23,212	22,625	23,031	23,374
MnO	1,157	1,401	1,719	1,642	1,265	1,245
CaO	0,009	0,041	0,022	0,015	0,017	0,027
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,213	18,702	19,62	18,881	18,374	18,866
TiO <sub>2</sub>	0,033	0,032	0,012	0,011	0,018	0,006
MgO	4,821	3,073	2,883	2,922	3,714	3,727
<b>Total</b>	<b>86,885</b>	<b>85,631</b>	<b>87,583</b>	<b>86,256</b>	<b>86,477</b>	<b>86,923</b>

## Annexe II

Sample	DDH-9-2	DDH-9-3	DDH-9-2	DDH-9-1	CSD1-2-3	CSD1-10-3	DDH-2-1
FeO	22,16	22,47	22,53	21,93	1,80	1,44	10,06
Na <sub>2</sub> O	0,18	0,13	0,13	0,08	0,37	0,48	0,19
K <sub>2</sub> O	9,71	9,54	9,55	8,01	8,40	10,28	5,66
SiO <sub>2</sub>	34,28	34,41	34,13	33,69	43,82	45,45	39,36
MnO	0,33	0,41	0,35	0,43	0,08	0,00	0,10
CaO	0,00	0,05	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,21	21,00	21,11	20,96	32,87	36,74	23,18
TiO <sub>2</sub>	2,77	2,81	2,81	2,44	0,69	0,51	1,29
MgO	6,87	6,88	6,68	7,47	0,87	0,78	3,11
<b>total</b>	<b>97,50</b>	<b>97,69</b>	<b>97,29</b>	<b>94,99</b>	<b>88,93</b>	<b>95,67</b>	<b>82,93</b>

Sample	ASD2-13-2	PYI-24-1	PYI-24-2	PYI-24-3	DRDI-14B-2	DRDI-14B-2	ASD2-13-4
FeO	13,05	2,37	6,41	2,04	3,04	2,92	1,68
Na <sub>2</sub> O	0,26	0,06	0,11	0,05	0,54	0,46	0,46
K <sub>2</sub> O	7,35	8,35	8,62	8,90	9,35	9,36	9,45
SiO <sub>2</sub>	42,27	50,04	49,43	50,40	47,04	46,79	47,57
MnO	0,16	0,06	0,04	0,04	0,02	0,00	0,00
CaO	0,05	0,06	0,16	0,02	0,00	0,01	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,87	33,21	29,79	33,10	33,03	33,72	35,16
TiO <sub>2</sub>	1,60	0,21	0,33	0,10	0,53	0,58	1,22
MgO	11,25	1,27	1,29	1,18	1,20	1,11	1,48
<b>total</b>	<b>96,84</b>	<b>95,61</b>	<b>96,18</b>	<b>95,84</b>	<b>94,75</b>	<b>94,95</b>	<b>97,01</b>

Sample	ASD2-13-1	CSD1-2-1	CSD1-10-2	ASD2-4-2	CSD1-10-1	ASD2-4-1	DRDI-14B-3
FeO	2,51	1,64	1,47	2,19	3,77	2,09	3,55
Na <sub>2</sub> O	0,55	0,54	0,71	0,25	0,39	0,42	0,56
K <sub>2</sub> O	9,67	9,74	9,89	9,90	9,98	10,03	10,10
SiO <sub>2</sub>	47,22	45,98	46,38	48,36	44,67	48,00	46,57
MnO	0,01	0,00	0,03	0,09	0,02	0,00	0,00
CaO	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,05	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,52	36,18	36,72	33,93	34,93	34,58	33,38
TiO <sub>2</sub>	0,13	0,72	0,85	0,53	0,08	0,49	0,61
MgO	0,72	0,68	0,51	1,19	0,76	1,13	1,63
<b>total</b>	<b>95,33</b>	<b>95,48</b>	<b>96,56</b>	<b>96,47</b>	<b>94,59</b>	<b>96,79</b>	<b>96,41</b>

Sample	CSD1-10-1	ASD2-13-1	ASD2-4-3	CSD1-10-3	ASD2-13-3	ASD2-13-2	ASD2-4-4
FeO	4,00	2,61	1,83	1,44	3,30	1,07	1,13
Na <sub>2</sub> O	0,55	0,25	0,43	0,48	0,42	0,53	0,40
K <sub>2</sub> O	10,12	10,14	10,27	10,28	10,29	10,32	10,34
SiO <sub>2</sub>	44,83	50,50	47,68	45,45	47,39	47,79	47,41
MnO	0,14	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
CaO	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,39	32,66	34,95	36,74	33,99	35,56	36,60
TiO <sub>2</sub>	0,11	0,56	0,67	0,51	1,04	0,02	0,70
MgO	0,08	2,00	1,15	0,78	2,29	1,04	0,96
<b>total</b>	<b>94,22</b>	<b>98,71</b>	<b>96,99</b>	<b>95,67</b>	<b>98,75</b>	<b>96,32</b>	<b>97,55</b>

Sample	ASD2-4-1	DDH-2-2	DDH-9-2	DDH-9-3	CSD1-2-2	DDH-9-1	DDH-2-3
FeO	2,06	0,86	1,16	1,11	2,25	1,11	0,62
Na <sub>2</sub> O	0,50	0,28	0,40	0,44	0,57	0,43	0,30
K <sub>2</sub> O	10,35	10,44	10,46	10,51	10,62	10,64	10,65
SiO <sub>2</sub>	48,02	46,77	45,63	46,31	45,85	45,23	45,79
MnO	0,00	0,01	0,06	0,03	0,00	0,06	0,00
CaO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,41	38,01	37,34	37,99	36,52	37,72	37,06
TiO <sub>2</sub>	0,69	0,00	0,70	0,55	0,83	0,61	1,00
MgO	2,05	0,75	0,57	0,47	0,58	0,47	0,87
<b>total</b>	<b>98,06</b>	<b>97,13</b>	<b>96,31</b>	<b>97,41</b>	<b>97,22</b>	<b>96,26</b>	<b>96,30</b>

## Annexe II

Sample	CSD1-2-4	CSD1-1-1	CSD1-1-1	CSD1-1-1	CSD1-1-1	CSD1-1-2	CSD1-1-2
FeO	1,93	22,32	22,77	21,33	20,99	20,09	21,26
Na <sub>2</sub> O	0,45	0,03	0,01	0,01	0,00	0,04	0,02
K <sub>2</sub> O	10,70	0,03	0,04	0,02	0,06	0,09	0,10
SiO <sub>2</sub>	46,54	27,47	28,45	27,96	28,56	29,01	28,68
MnO	0,00	0,24	0,25	0,23	0,24	0,47	0,49
CaO	0,00	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,42	26,34	25,54	26,91	26,52	26,84	26,10
TiO <sub>2</sub>	0,77	0,00	0,00	0,10	0,08	0,05	0,05
MgO	0,36	10,84	10,99	11,00	10,52	11,21	10,72
<b>total</b>	<b>97,16</b>	<b>87,33</b>	<b>88,08</b>	<b>87,59</b>	<b>87,01</b>	<b>87,84</b>	<b>87,46</b>

Sample	CSD1-1-2	CSD1-1-2	CSD1-1-2	CSD1-1-2	CSD1-1-2	CSD1-1-3	CSD1-1-3
FeO	18,38	22,79	24,38	21,67	22,11	23,17	20,63
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,04	0,06	0,02	0,00	0,02	0,01
K <sub>2</sub> O	0,18	0,03	0,04	0,03	0,04	0,02	0,00
SiO <sub>2</sub>	28,77	28,55	26,75	27,59	27,45	28,55	28,04
MnO	0,34	0,22	0,20	0,25	0,20	0,19	0,21
CaO	0,12	0,02	0,03	0,02	0,07	0,13	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,65	26,40	25,72	27,18	27,02	25,54	26,36
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	10,94	11,16	10,75	11,18	10,86	11,12	11,16
<b>total</b>	<b>86,50</b>	<b>89,22</b>	<b>87,93</b>	<b>87,95</b>	<b>87,75</b>	<b>88,74</b>	<b>86,48</b>

Sample	CSD1-1-3	CSD1-1-3	CSD1-1-2	CSD1-1-2	CSD1-1-1	CSD1-1-1	CSD1-1-1
FeO	22,33	22,60	27,88	27,60	27,77	27,37	28,40
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
K <sub>2</sub> O	0,00	0,04	0,03	0,08	0,06	0,01	0,06
SiO <sub>2</sub>	28,03	28,10	26,09	26,67	25,53	25,50	25,42
MnO	0,20	0,30	0,42	0,20	0,26	0,23	0,25
CaO	0,04	0,07	0,02	0,08	0,09	0,14	0,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,52	26,39	22,07	22,24	21,39	21,73	21,19
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,12	0,07	0,07	0,43	0,05
MgO	10,68	10,75	10,90	11,02	10,65	10,81	10,66
<b>total</b>	<b>87,82</b>	<b>88,27</b>	<b>87,52</b>	<b>87,98</b>	<b>85,82</b>	<b>86,22</b>	<b>86,23</b>

Sample	CSD1-1-1	CSD1-1-3	CSD1-1-3-1	CSD1-1-3-2	CSD1-1-3-3	CSD1-1-3-4	CSD1-1-3-5
FeO	27,65	21,22	22,65	20,56	21,71	26,08	24,02
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,00	0,04
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,04	0,07
SiO <sub>2</sub>	26,12	29,43	28,42	28,87	27,97	27,14	27,89
MnO	0,39	0,14	0,19	0,33	0,32	0,48	0,43
CaO	0,59	0,08	0,06	0,09	0,06	0,00	0,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,52	26,95	25,30	26,21	25,40	23,49	25,02
TiO <sub>2</sub>	0,17	0,00	0,00	0,04	0,00	0,23	0,05
MgO	10,92	12,42	12,01	11,38	11,25	10,94	11,52
<b>total</b>	<b>88,39</b>	<b>90,27</b>	<b>88,64</b>	<b>87,57</b>	<b>86,76</b>	<b>88,40</b>	<b>89,13</b>

Sample	CSD1-1-3-7	ASD2-6-2	ASD2-6-2	ASD2-6-2	ASD2-6-2	ASD2-6-3	ASD2-6-3
FeO	32,03	36,34	35,77	37,08	39,35	38,85	39,15
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,03	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00
K <sub>2</sub> O	0,04	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01
SiO <sub>2</sub>	24,76	23,63	23,98	23,71	23,70	23,52	24,09
MnO	0,40	0,49	0,37	0,46	0,32	0,46	0,30
CaO	0,08	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,52	21,76	21,34	21,84	20,92	21,83	21,37
TiO <sub>2</sub>	0,10	0,00	0,08	0,04	0,00	0,00	0,04
MgO	10,35	6,68	7,15	6,69	4,91	4,96	4,64
<b>total</b>	<b>89,31</b>	<b>88,94</b>	<b>88,77</b>	<b>89,85</b>	<b>89,22</b>	<b>89,61</b>	<b>89,59</b>

Annexe II

Sample	ASD2-6-3	ASD2-6-3	ASD2-6-4	ASD2-6-4	ASD2-6-4	ASD2-6-5	ASD2-6-5
FeO	38,61	36,77	34,62	39,19	39,98	37,19	35,97
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,01	0,03	0,00	0,03	0,02	0,01
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,02	0,02	0,04	0,19	0,02
SiO <sub>2</sub>	23,29	26,74	23,52	23,24	23,12	24,37	23,92
MnO	0,38	0,34	0,35	0,26	0,32	0,39	0,44
CaO	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,82	19,69	18,45	21,64	21,44	21,96	21,78
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,04	0,02	0,08	0,02	0,04	0,03
MgO	5,61	5,28	4,56	5,14	4,48	5,67	7,02
<b>total</b>	<b>89,74</b>	<b>88,88</b>	<b>81,60</b>	<b>89,58</b>	<b>89,43</b>	<b>89,84</b>	<b>89,25</b>

Sample	ASD2-6-5	ASD2-6-5	ASD2-6-6	ASD2-6-6	ASD2-6-7	ASD2-6-7	ASD2-6-7
FeO	38,31	37,15	34,56	36,32	38,95	38,14	37,67
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,07	0,00	0,01	0,03	0,01
K <sub>2</sub> O	0,03	0,01	0,01	0,00	0,19	0,02	0,02
SiO <sub>2</sub>	23,89	22,12	24,63	23,93	23,59	23,64	23,65
MnO	0,37	0,46	0,45	0,52	0,35	0,40	0,26
CaO	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,86	20,09	21,14	22,09	23,07	21,45	21,54
TiO <sub>2</sub>	0,26	0,04	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00
MgO	4,68	3,94	7,25	6,92	4,72	5,48	5,95
<b>total</b>	<b>88,39</b>	<b>83,82</b>	<b>88,17</b>	<b>89,79</b>	<b>90,87</b>	<b>89,18</b>	<b>89,09</b>

Sample	ASD2-6-7	ASD2-6-9	ASD2-6-9	ASD2-6-9	ASD2-6-9	ASD2-4-1	ASD2-4-1
FeO	38,51	36,42	34,84	38,10	38,94	37,90	38,12
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,02	0,05	0,02	0,00	0,01
K <sub>2</sub> O	0,04	0,11	0,00	0,02	0,06	0,05	0,07
SiO <sub>2</sub>	23,55	24,15	24,28	24,24	25,07	23,48	24,03
MnO	0,30	0,46	0,34	0,35	0,30	0,46	0,52
CaO	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,26	22,03	21,48	20,95	19,88	21,48	21,32
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,07	0,02	0,00	0,00	0,10	0,00
MgO	5,27	6,62	7,90	6,14	4,90	6,09	6,12
<b>total</b>	<b>88,93</b>	<b>89,87</b>	<b>88,89</b>	<b>89,85</b>	<b>89,16</b>	<b>89,55</b>	<b>90,20</b>

Sample	ASD2-4-1	ASD2-4-1	ASD2-4-3	ASD2-4-3	ASD2-4-3	ASD2-4-3	ASD2-4-3
FeO	37,95	38,84	33,46	35,78	36,27	36,30	35,51
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00
K <sub>2</sub> O	0,03	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,00
SiO <sub>2</sub>	23,98	23,29	25,11	23,74	24,49	23,34	24,77
MnO	0,38	0,37	0,46	0,37	0,33	0,35	0,37
CaO	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,22	20,69	21,40	21,91	21,68	21,46	21,51
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,02
MgO	5,98	5,35	9,59	7,56	7,29	6,87	8,47
<b>total</b>	<b>89,56</b>	<b>88,57</b>	<b>90,01</b>	<b>89,43</b>	<b>90,08</b>	<b>88,35</b>	<b>90,65</b>

Sample	ASD2-4-3	ASD2-4-3	ASD2-4-3	ASD2-4-3	ASD2-4-3	ASD2-4-3	ASD2-4-4
FeO	36,82	37,35	37,44	35,92	34,69	35,70	37,36
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,05	0,02	0,01	0,00	0,05	0,02
K <sub>2</sub> O	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01	0,01
SiO <sub>2</sub>	24,58	23,69	24,29	25,03	26,81	24,65	24,45
MnO	0,40	0,46	0,35	0,36	0,32	0,40	0,31
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,05	20,96	21,66	20,83	20,77	21,27	21,51
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,05	0,03	0,04	0,03	0,00	0,00
MgO	7,48	5,13	7,10	7,01	7,35	7,78	6,40
<b>total</b>	<b>90,34</b>	<b>87,69</b>	<b>90,93</b>	<b>89,20</b>	<b>89,97</b>	<b>89,85</b>	<b>90,06</b>

## Annexe II

Sample	ASD2-4-4	ASD2-4-4	ASD2-4-4	ASD2-6	ASD2-6	ASD2-6	ASD2-6
FeO	37,05	36,90	38,18	35,97	35,31	35,48	36,51
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,01	0,06	0,00	0,00	0,00	0,03
K <sub>2</sub> O	0,00	0,02	0,00	0,09	0,00	0,00	0,01
SiO <sub>2</sub>	24,48	24,32	23,82	24,22	23,91	24,28	23,81
MnO	0,45	0,31	0,43	0,53	0,36	0,38	0,44
CaO	0,07	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,20	21,55	21,50	22,08	22,12	21,70	22,13
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,01	0,03	0,06	0,02	0,10	0,08
MgO	6,98	7,27	6,52	6,33	8,16	8,22	7,27
<b>total</b>	<b>90,31</b>	<b>90,40</b>	<b>90,54</b>	<b>89,28</b>	<b>89,88</b>	<b>90,16</b>	<b>90,28</b>

Sample	DRDI-20-7	DRDI-20-7	DRDI-20-7	DRDI-20-7	DRDI-20-7	DRDI-19-1	DRDI-19-1
FeO	39,64	37,57	37,22	40,20	37,55	39,80	38,43
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,00
K <sub>2</sub> O	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00
SiO <sub>2</sub>	22,41	22,86	22,81	22,91	22,75	23,76	22,54
MnO	2,36	2,76	2,55	2,51	2,82	3,02	2,93
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,06	22,19	22,13	22,61	21,94	20,54	22,19
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,01	0,09	0,06	0,00	0,00	0,02
MgO	2,38	3,89	4,15	2,30	4,51	2,60	2,92
<b>total</b>	<b>89,85</b>	<b>89,29</b>	<b>88,95</b>	<b>90,63</b>	<b>89,61</b>	<b>89,80</b>	<b>89,05</b>

Sample	DRDI-19-1	DRDI-19-1	DRDI-19-2	DRDI-19-2	DRDI-19-3	DRDI-19-3	DRDI-19-3
FeO	37,49	36,48	36,22	37,48	39,43	39,88	39,30
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,03	0,07	0,03	0,00	0,01	0,02
K <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,00
SiO <sub>2</sub>	22,52	22,96	23,42	22,60	22,12	22,30	22,62
MnO	2,70	2,72	2,78	2,91	3,20	3,03	3,31
CaO	0,03	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,89	22,57	22,19	22,06	21,68	21,56	20,68
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,03	0,04	0,00	0,03	0,07	0,05
MgO	4,28	4,59	3,58	3,68	2,37	2,20	2,81
<b>total</b>	<b>89,95</b>	<b>89,41</b>	<b>88,30</b>	<b>88,83</b>	<b>88,85</b>	<b>89,07</b>	<b>88,80</b>

Sample	DRDI-19-3	DRDI-19-3	DRDI-19-3	DRDI-19-4	DRDI-19-4	DRDI-19-4	DRDI-23-2
FeO	35,12	37,86	38,14	38,70	36,16	39,96	27,46
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,06	0,00	0,06	0,06	0,01	0,03
K <sub>2</sub> O	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,77
SiO <sub>2</sub>	21,57	22,12	22,92	22,88	22,97	22,47	27,60
MnO	2,85	2,92	3,31	3,13	2,82	3,08	0,15
CaO	0,00	0,00	0,00	0,06	0,02	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,53	20,98	22,06	21,74	22,25	21,35	21,27
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,01	0,06
MgO	3,65	2,54	3,54	2,97	4,58	1,55	12,59
<b>total</b>	<b>83,83</b>	<b>86,49</b>	<b>90,02</b>	<b>89,54</b>	<b>88,89</b>	<b>88,43</b>	<b>89,92</b>

Sample	DRDI-23-2	DRDI-23-2	DRDI-23-3	DRDI-23-3	DRDI-23-3	DRD 1-20-1	DRD 1-20-1
FeO	25,04	27,39	26,62	27,67	27,63	37,645	38,668
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,00	0,00	0,03	0,04	0	0
K <sub>2</sub> O	0,94	0,06	0,37	0,10	0,12	0	0,004
SiO <sub>2</sub>	28,67	26,74	26,91	26,20	26,57	22,246	21,821
MnO	0,18	0,21	0,12	0,18	0,08	2,68	2,501
CaO	0,01	0,01	0,00	0,05	0,04	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,69	20,15	20,51	21,35	21,43	22,27	22,505
TiO <sub>2</sub>	0,06	0,03	0,05	0,03	0,15	0	0,008
MgO	13,63	12,33	12,27	12,66	12,65	3,296	2,8
<b>total</b>	<b>90,25</b>	<b>86,93</b>	<b>86,86</b>	<b>88,26</b>	<b>88,71</b>	<b>88,137</b>	<b>88,307</b>



## Annexe II

Comment	DRD 1-20-1	DRD 1-20-1	DRD 1-20-1	DRD 1-20-1	DRD 1-20-1	DRD 1-20-2	DRD 1-20-2
FeO	37,741	37,427	39,625	38,413	39,965	37,844	40,521
Na <sub>2</sub> O	0	0,031	0,017	0,026	0	0,003	0
K <sub>2</sub> O	0,029	0,029	0,011	0,046	0,021	0	0,03
SiO <sub>2</sub>	22,422	22,96	22,605	22,907	22,382	22,664	22,507
MnO	2,7	2,71	2,968	2,862	2,341	2,987	3,096
CaO	0,003	0	0	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,849	22,387	21,587	21,694	22,856	21,803	21,257
TiO <sub>2</sub>	0,072	0,064	0	0,063	0	0	0,059
MgO	3,955	4,514	3,101	2,881	2,483	3,788	2,189
<b>Total</b>	<b>89,771</b>	<b>90,122</b>	<b>89,914</b>	<b>88,892</b>	<b>90,048</b>	<b>89,089</b>	<b>89,659</b>

Comment	DRD 1-20-2	DRD 1-20-2	DRD 1-20-2	DRD 1-20-3	DRD 1-20-3	DRD 1-20-4	DRD 1-20-4
FeO	38,202	39,38	39,087	36,489	35,693	39,02	38,728
Na <sub>2</sub> O	0,006	0,026	0,006	0	0,006	0	0
K <sub>2</sub> O	0	0	0,027	0,009	0	0,014	0,009
SiO <sub>2</sub>	22,373	22,384	22,815	22,489	23,449	22,222	22,634
MnO	3,096	3,093	3,274	2,706	2,974	2,498	2,718
CaO	0	0,03	0,035	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,681	21,759	21,32	22,942	22,029	23,679	22,926
TiO <sub>2</sub>	0,083	0	0	0,036	0,012	0,004	0,008
MgO	3,631	2,803	2,378	3,451	4,002	2,363	2,825
<b>Total</b>	<b>90,072</b>	<b>89,475</b>	<b>88,942</b>	<b>88,122</b>	<b>88,165</b>	<b>89,8</b>	<b>89,848</b>

Comment	DRD 1-20-4	DRD 1-20-4	DRD 1-20-4	DRD 1-20-4	DRD 1-20-5	DRD 1-20-5	DRD 1-20-5
FeO	39,158	38,121	40,178	38,732	37,835	39,351	39,036
Na <sub>2</sub> O	0,023	0,009	0,064	0,009	0,038	0,038	0,006
K <sub>2</sub> O	0,023	0	0	0,013	0,021	0,007	0,021
SiO <sub>2</sub>	22,035	22,278	22,075	22,031	20,026	20,681	21,817
MnO	2,528	2,61	2,304	2,591	2,549	3,034	2,453
CaO	0	0,051	0	0	0	0,039	0,013
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,836	22,484	23,431	22,641	22,621	22,849	23,984
TiO <sub>2</sub>	0,008	0,031	0	0	0	0,066	0,028
MgO	1,243	2,862	0,915	1,596	1,85	0,094	2,062
<b>Total</b>	<b>87,854</b>	<b>88,446</b>	<b>88,967</b>	<b>87,613</b>	<b>84,94</b>	<b>86,159</b>	<b>89,42</b>

Comment	DRD 1-20-5	DRD 1-20-5	DRD 1-20-5	DRD 1-20-6	DRD 1-20-6	DRD 1-20-6	DRD 1-20-6
FeO	37,595	36,649	37,213	39,537	39,995	37,711	34,345
Na <sub>2</sub> O	0,034	0,079	0,009	0	0,006	0,031	0,025
K <sub>2</sub> O	0	0,022	0,012	0,002	0	0	0
SiO <sub>2</sub>	21,722	22,284	22,454	21,934	21,925	22,379	23,743
MnO	2,424	2,77	2,961	2,357	2,644	2,506	1,939
CaO	0	0	0	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,733	22,799	21,722	22,219	22,667	21,952	20,726
TiO <sub>2</sub>	0,024	0,055	0,02	0,016	0	0	0,008
MgO	3,214	3,451	2,38	0,187	2,199	3,433	6,915
<b>Total</b>	<b>88,746</b>	<b>88,109</b>	<b>86,771</b>	<b>86,252</b>	<b>89,436</b>	<b>88,012</b>	<b>87,701</b>

Comment	DRD 1-20-6	DRD 1-20-6	DRD 1-20-6	DRD 1-20-6	DRD 1-20-7	DRD 1-20-7	DRD 1-20-7
FeO	38,728	39,298	40,289	38,657	38,901	39,864	37,647
Na <sub>2</sub> O	0,037	0,064	0,023	0,006	0,043	0,026	0
K <sub>2</sub> O	0,048	0	0,016	0,009	0,011	0	0,002
SiO <sub>2</sub>	21,685	22,215	21,965	22,102	22,905	22,425	23,112
MnO	2,712	2,52	2,42	2,606	2,412	2,22	2,703
CaO	0,028	0	0	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,297	23,283	23,152	22,961	22,453	22,617	21,757
TiO <sub>2</sub>	0,02	0	0,043	0	0,032	0	0,039
MgO	2,035	0,614	2,14	2,644	3,107	1,647	4,375
<b>Total</b>	<b>88,59</b>	<b>87,994</b>	<b>90,048</b>	<b>88,985</b>	<b>89,864</b>	<b>88,799</b>	<b>89,635</b>

## Annexe II

Comment	DRD 1-20-7	DRD 1-20-7	DRD 1-20-7	DRD 1-20-7	DRD 1-20-7	DRD 1-20-7	DRD 1-20-7
FeO	38,775	39,288	39,637	37,567	37,222	40,201	37,554
Na <sub>2</sub> O	0,037	0	0	0,006	0,006	0,014	0,011
K <sub>2</sub> O	0,02	0	0,002	0,005	0	0,02	0,02
SiO <sub>2</sub>	22,633	22,432	22,414	22,861	22,807	22,909	22,752
MnO	2,533	2,314	2,362	2,763	2,547	2,513	2,821
CaO	0	0	0	0,003	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,401	22,491	23,057	22,19	22,129	22,613	21,944
TiO <sub>2</sub>	0	0	0	0,012	0,091	0,059	0
MgO	2,265	2,427	2,379	3,887	4,15	2,296	4,512
<b>Total</b>	<b>88,664</b>	<b>88,952</b>	<b>89,851</b>	<b>89,294</b>	<b>88,952</b>	<b>90,625</b>	<b>89,614</b>

Comment	DRD 1-19-1	DRD 1-19-1	DRD 1-19-1	DRD 1-19-1	DRD 1-19-2	DRD 1-19-2	DRD 1-19-3
FeO	39,796	38,43	37,485	36,484	36,22	37,483	39,434
Na <sub>2</sub> O	0,061	0	0,037	0,031	0,067	0,031	0
K <sub>2</sub> O	0,016	0	0,013	0,013	0	0,013	0,027
SiO <sub>2</sub>	23,755	22,541	22,517	22,96	23,424	22,595	22,115
MnO	3,023	2,927	2,696	2,72	2,777	2,912	3,195
CaO	0,008	0,017	0,026	0	0	0,061	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,54	22,194	22,889	22,572	22,192	22,057	21,684
TiO <sub>2</sub>	0	0,024	0	0,032	0,043	0	0,027
MgO	2,596	2,92	4,283	4,593	3,579	3,676	2,372
<b>Total</b>	<b>89,795</b>	<b>89,053</b>	<b>89,946</b>	<b>89,405</b>	<b>88,302</b>	<b>88,828</b>	<b>88,854</b>

Comment	DRD 1-19-3	DRD 1-19-3	DRD 1-19-3	DRD 1-19-3	DRD 1-19-3	DRD 1-19-4	DRD 1-19-4
FeO	39,883	39,301	35,121	37,856	38,136	38,7	36,159
Na <sub>2</sub> O	0,009	0,023	0,102	0,055	0	0,06	0,062
K <sub>2</sub> O	0,007	0	0,02	0	0,02	0	0,02
SiO <sub>2</sub>	22,302	22,618	21,567	22,118	22,918	22,878	22,972
MnO	3,03	3,307	2,845	2,916	3,314	3,131	2,821
CaO	0	0,004	0	0	0	0,059	0,024
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,562	20,683	20,526	20,975	22,06	21,739	22,25
TiO <sub>2</sub>	0,074	0,051	0	0,031	0,032	0	0
MgO	2,198	2,814	3,653	2,54	3,544	2,974	4,58
<b>Total</b>	<b>89,065</b>	<b>88,801</b>	<b>83,834</b>	<b>86,491</b>	<b>90,024</b>	<b>89,541</b>	<b>88,888</b>

Comment	DRD 1-19-4	DRD 1-23-2	DRD 1-23-2	DRD 1-23-2	DRD 1-23-3	DRD 1-23-3	DRD 1-23-3
FeO	39,964	27,455	25,039	27,393	26,618	27,671	27,634
Na <sub>2</sub> O	0,009	0,03	0,037	0	0	0,028	0,043
K <sub>2</sub> O	0	0,766	0,936	0,064	0,374	0,101	0,117
SiO <sub>2</sub>	22,471	27,604	28,665	26,743	26,906	26,201	26,574
MnO	3,075	0,147	0,179	0,211	0,123	0,176	0,078
CaO	0	0	0,014	0,011	0,001	0,047	0,035
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,346	21,268	21,685	20,153	20,513	21,346	21,43
TiO <sub>2</sub>	0,012	0,057	0,058	0,029	0,053	0,028	0,147
MgO	1,549	12,59	13,634	12,326	12,274	12,664	12,649
<b>Total</b>	<b>88,426</b>	<b>89,917</b>	<b>90,247</b>	<b>86,93</b>	<b>86,862</b>	<b>88,262</b>	<b>88,707</b>

Comment	CSD 1-1-1	CSD 1-1-1	CSD 1-1-1	CSD 1-1-1	CSD 1-1-2	CSD 1-1-2	CSD 1-1-2
FeO	22,318	22,767	21,334	20,994	20,089	21,261	21,161
Na <sub>2</sub> O	0,027	0,005	0,005	0,002	0,043	0,017	0,007
K <sub>2</sub> O	0,028	0,041	0,017	0,058	0,089	0,096	0,028
SiO <sub>2</sub>	27,472	28,454	27,955	28,563	29,008	28,675	28,069
MnO	0,244	0,249	0,228	0,237	0,470	0,487	0,423
CaO	0,060	0,041	0,037	0,040	0,032	0,052	0,050
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,338	25,537	26,913	26,517	26,842	26,102	27,100
TiO <sub>2</sub>	0,000	0,000	0,099	0,079	0,050	0,054	0,000
MgO	10,839	10,989	11,004	10,515	11,213	10,715	10,695
<b>Total</b>	<b>87,326</b>	<b>88,083</b>	<b>87,592</b>	<b>87,005</b>	<b>87,836</b>	<b>87,459</b>	<b>87,533</b>

## Annexe II

Comment	CSD 1-1-2	CSD 1-1-2	CSD 1-1-2	CSD 1-1-2	CSD 1-1-2	CSD 1-1-3	CSD 1-1-3
FeO	18,382	22,791	24,381	21,665	22,114	23,171	20,629
Na <sub>2</sub> O	0,104	0,042	0,057	0,024	0,002	0,022	0,007
K <sub>2</sub> O	0,181	0,032	0,041	0,032	0,043	0,019	0,004
SiO <sub>2</sub>	28,771	28,545	26,752	27,586	27,450	28,545	28,036
MnO	0,336	0,220	0,196	0,252	0,196	0,191	0,209
CaO	0,117	0,024	0,033	0,024	0,070	0,129	0,068
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,653	26,400	25,716	27,180	27,021	25,541	26,359
TiO <sub>2</sub>	0,013	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
MgO	10,944	11,163	10,750	11,184	10,858	11,117	11,163
<b>Total</b>	<b>86,501</b>	<b>89,221</b>	<b>87,926</b>	<b>87,947</b>	<b>87,754</b>	<b>88,735</b>	<b>86,475</b>

Comment	CSD 1-1-3	CSD 1-1-3	CSD 1-1-2	CSD 1-1-2	CSD 1-1-1	CSD 1-1-1	CSD 1-1-1
FeO	22,328	22,601	27,881	27,6045	27,772	27,3653	28,4002
Na <sub>2</sub> O	0,015	0,037	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0407
K <sub>2</sub> O	0,002	0,039	0,0324	0,0798	0,0636	0,0086	0,0604
SiO <sub>2</sub>	28,030	28,098	26,0856	26,6729	25,5329	25,4996	25,4166
MnO	0,200	0,295	0,4168	0,1998	0,2645	0,228	0,2539
CaO	0,041	0,065	0,0157	0,0839	0,0856	0,1361	0,1491
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,523	26,389	22,0706	22,2425	21,388	21,7303	21,1929
TiO <sub>2</sub>	0,000	0,000	0,1249	0,0736	0,0694	0,433	0,0531
MgO	10,677	10,748	10,8952	11,0183	10,6479	10,8145	10,663
<b>Total</b>	<b>87,816</b>	<b>88,272</b>	<b>87,5225</b>	<b>87,9756</b>	<b>85,8242</b>	<b>86,2157</b>	<b>86,2299</b>

Comment	CSD 1-1-1	CSD 1-1-3	CSD 1-1-3-1	CSD 1-1-3-2	CSD 1-1-3-3	CSD 1-1-3-4	CSD 1-1-3-5
FeO	27,6525	21,2244	22,6458	20,5615	21,7113	26,0786	24,0172
Na <sub>2</sub> O	0,0235	0,018	0,0229	0,0271	0,0508	0,0003	0,0425
K <sub>2</sub> O	0,0001	0,0023	0,0034	0,0551	0,0001	0,038	0,0718
SiO <sub>2</sub>	26,1219	29,4272	28,4197	28,8682	27,968	27,1418	27,889
MnO	0,3915	0,143	0,1853	0,3337	0,3153	0,4799	0,4272
CaO	0,5904	0,0842	0,055	0,0919	0,0648	0,0002	0,0854
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,5216	26,9474	25,3005	26,2123	25,4004	23,494	25,0236
TiO <sub>2</sub>	0,1654	0,0002	0,0002	0,0419	0,0002	0,2274	0,0523
MgO	10,9231	12,4237	12,0064	11,3822	11,2491	10,937	11,518
<b>Total</b>	<b>88,39</b>	<b>90,2704</b>	<b>88,6392</b>	<b>87,5739</b>	<b>86,76</b>	<b>88,3972</b>	<b>89,127</b>

Comment	CSD 1-1-3-7	ASD 2-6-2	ASD 2-6-2	ASD 2-6-2	ASD 2-6-2	ASD 2-6-3	ASD 2-6-3
FeO	32,0321	36,344	35,773	37,084	39,347	38,846	39,147
Na <sub>2</sub> O	0,0406	0,03	0,052	0,031	0,003	0	0
K <sub>2</sub> O	0,0354	0,004	0	0	0,029	0,004	0,009
SiO <sub>2</sub>	24,7566	23,634	23,977	23,712	23,7	23,522	24,086
MnO	0,3965	0,486	0,369	0,458	0,315	0,455	0,296
CaO	0,0793	0	0,036	0	0	0	0,019
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,5234	21,76	21,34	21,835	20,918	21,826	21,365
TiO <sub>2</sub>	0,0985	0	0,08	0,036	0	0	0,036
MgO	10,345	6,678	7,145	6,694	4,907	4,96	4,636
<b>Total</b>	<b>89,3074</b>	<b>88,936</b>	<b>88,772</b>	<b>89,85</b>	<b>89,219</b>	<b>89,613</b>	<b>89,594</b>

Comment	ASD 2-6-3	ASD 2-6-3	ASD 2-6-4	ASD 2-6-4	ASD 2-6-4	ASD 2-6-5	ASD 2-6-5
FeO	38,614	36,768	34,617	39,193	39,977	37,189	35,972
Na <sub>2</sub> O	0,028	0,008	0,028	0	0,031	0,022	0,014
K <sub>2</sub> O	0	0	0,023	0,022	0,041	0,193	0,02
SiO <sub>2</sub>	23,29	26,743	23,522	23,242	23,117	24,37	23,917
MnO	0,383	0,344	0,352	0,261	0,322	0,391	0,443
CaO	0	0	0,036	0,004	0	0	0,051
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,818	19,692	18,448	21,644	21,438	21,957	21,778
TiO <sub>2</sub>	0	0,044	0,02	0,079	0,024	0,04	0,032
MgO	5,61	5,277	4,558	5,138	4,477	5,674	7,018
<b>Total</b>	<b>89,743</b>	<b>88,876</b>	<b>81,604</b>	<b>89,583</b>	<b>89,427</b>	<b>89,836</b>	<b>89,245</b>

## Annexe II

Comment	ASD 2 -6-5	ASD 2 -6-5	ASD 2 -6-6	ASD 2 -6-6	ASD 2 -6-7	ASD 2 -6-7	ASD 2 -6-7
FeO	38,306	37,145	34,561	36,322	38,945	38,137	37,668
Na <sub>2</sub> O	0,008	0,006	0,074	0	0,008	0,031	0,008
K <sub>2</sub> O	0,025	0,014	0,014	0	0,189	0,018	0,018
SiO <sub>2</sub>	23,886	22,117	24,625	23,931	23,59	23,639	23,647
MnO	0,369	0,457	0,453	0,521	0,353	0,4	0,263
CaO	0	0	0,052	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,859	20,094	21,137	22,092	23,07	21,446	21,536
TiO <sub>2</sub>	0,257	0,039	0	0,008	0	0,02	0
MgO	4,679	3,943	7,251	6,916	4,719	5,484	5,947
<b>Total</b>	<b>88,389</b>	<b>83,815</b>	<b>88,167</b>	<b>89,79</b>	<b>90,874</b>	<b>89,175</b>	<b>89,087</b>

Comment	ASD 2 -6-7	ASD 2 -6-9	ASD 2 -6-9	ASD 2 -6-9	ASD 2 -6-9	ASD 2 -4-1	ASD 2 -4-1
FeO	38,506	36,423	34,842	38,097	38,937	37,899	38,124
Na <sub>2</sub> O	0	0	0,019	0,048	0,023	0	0,006
K <sub>2</sub> O	0,04	0,109	0	0,02	0,056	0,045	0,074
SiO <sub>2</sub>	23,554	24,148	24,277	24,243	25,074	23,477	24,034
MnO	0,302	0,463	0,344	0,353	0,3	0,458	0,515
CaO	0	0,005	0	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,259	22,025	21,483	20,947	19,877	21,48	21,324
TiO <sub>2</sub>	0,004	0,068	0,02	0	0	0,103	0,004
MgO	5,268	6,624	7,9	6,142	4,895	6,091	6,123
<b>Total</b>	<b>88,933</b>	<b>89,865</b>	<b>88,885</b>	<b>89,85</b>	<b>89,162</b>	<b>89,553</b>	<b>90,204</b>

Comment	ASD 2 -4-1	ASD 2 -4-1	ASD 2 -4-3	ASD 2 -4-3	ASD 2 -4-3	ASD 2 -4-3	ASD 2 -4-3
FeO	37,95	38,841	33,458	35,784	36,268	36,296	35,513
Na <sub>2</sub> O	0	0,017	0	0,016	0,014	0,014	0,003
K <sub>2</sub> O	0,031	0	0,007	0,024	0,005	0,018	0
SiO <sub>2</sub>	23,975	23,294	25,106	23,738	24,49	23,335	24,769
MnO	0,381	0,374	0,455	0,373	0,333	0,348	0,371
CaO	0,023	0	0	0,005	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,221	20,691	21,4	21,913	21,676	21,458	21,513
TiO <sub>2</sub>	0,004	0,004	0	0,02	0,004	0,012	0,016
MgO	5,979	5,35	9,588	7,557	7,288	6,871	8,467
<b>Total</b>	<b>89,564</b>	<b>88,571</b>	<b>90,014</b>	<b>89,43</b>	<b>90,078</b>	<b>88,352</b>	<b>90,652</b>

Comment	ASD 2 -4-3	ASD 2 -4-3	ASD 2 -4-3	ASD 2 -4-3	ASD 2 -4-3	ASD 2 -4-3	ASD 2 -4-4
FeO	36,815	37,354	37,436	35,922	34,691	35,696	37,356
Na <sub>2</sub> O	0	0,048	0,017	0,011	0	0,049	0,017
K <sub>2</sub> O	0,014	0	0,036	0	0	0,005	0,011
SiO <sub>2</sub>	24,582	23,69	24,291	25,031	26,808	24,647	24,447
MnO	0,403	0,458	0,351	0,36	0,318	0,402	0,314
CaO	0	0	0	0	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,049	20,957	21,664	20,834	20,771	21,27	21,513
TiO <sub>2</sub>	0,004	0,052	0,028	0,036	0,032	0,004	0
MgO	7,476	5,133	7,103	7,008	7,351	7,78	6,398
<b>Total</b>	<b>90,343</b>	<b>87,692</b>	<b>90,926</b>	<b>89,202</b>	<b>89,971</b>	<b>89,853</b>	<b>90,056</b>

Comment	ASD 2 -4-4	ASD 2 -4-4	ASD 2 -4-4	ASD 2 -6	ASD 2 -6	ASD 2 -6	ASD 2 -6
FeO	37,052	36,903	38,179	35,974	35,312	35,475	36,506
Na <sub>2</sub> O	0,028	0,014	0,056	0	0	0	0,03
K <sub>2</sub> O	0	0,022	0	0,087	0	0	0,013
SiO <sub>2</sub>	24,484	24,324	23,824	24,217	23,905	24,28	23,805
MnO	0,45	0,311	0,43	0,527	0,355	0,376	0,444
CaO	0,066	0	0	0,006	0	0,011	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,203	21,546	21,502	22,079	22,124	21,704	22,129
TiO <sub>2</sub>	0,052	0,012	0,028	0,056	0,024	0,1	0,084
MgO	6,977	7,266	6,517	6,333	8,156	8,218	7,265
<b>Total</b>	<b>90,312</b>	<b>90,398</b>	<b>90,536</b>	<b>89,279</b>	<b>89,876</b>	<b>90,164</b>	<b>90,276</b>

## Annexe II

Sample	M52-224,80m-1-4	R6-23,70m-1-1	M52-347,40m-5-3	R6-23,70m-1-2	M52-349,40-2-3
Na <sub>2</sub> O	0,72	0,09	0,09	0,10	0,29
MgO	1,93	0,49	3,77	0,55	2,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,39	31,56	26,10	31,19	30,36
SiO <sub>2</sub>	44,80	47,51	49,21	48,46	44,33
K <sub>2</sub> O	8,62	9,08	9,15	9,16	9,16
CaO	0,05	0,10	0,12	0,12	0,12
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,08	0,79	0,04	0,67
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,05	0,01	0,00
MnO	0,02	0,06	0,04	0,14	0,00
FeO	4,23	5,44	3,35	5,83	2,26
<b>total</b>	<b>94,80</b>	<b>94,41</b>	<b>92,67</b>	<b>95,60</b>	<b>89,44</b>

Sample	R1-30,00m-5-5	M52-551,00m-1-1	R6-23,70m-5-1	R6-23,70m-2-2	R6-23,70m-7-1
Na <sub>2</sub> O	0,15	0,04	0,02	0,08	0,04
MgO	2,04	1,55	0,65	0,47	0,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,02	29,13	30,26	31,87	31,98
SiO <sub>2</sub>	50,50	49,20	45,67	47,86	47,56
K <sub>2</sub> O	9,17	9,19	9,23	9,23	9,27
CaO	0,15	0,14	0,13	0,09	0,06
TiO <sub>2</sub>	0,14	0,10	0,69	0,09	0,02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,00	0,01	0,03	0,05
MnO	0,08	0,29	0,06	0,15	0,15
FeO	1,78	4,11	6,33	5,50	4,55
<b>total</b>	<b>95,06</b>	<b>93,74</b>	<b>93,05</b>	<b>95,37</b>	<b>94,20</b>

Sample	R6-34,70m-2-3	R6-23,70m-4-1	M52-501,00m-4-2	R6-34,70m-3-4	M52-274,60m-1-2
Na <sub>2</sub> O	0,11	0,10	0,03	0,11	0,71
MgO	1,71	0,54	1,77	1,23	1,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,45	31,24	27,73	30,52	32,13
SiO <sub>2</sub>	49,51	47,34	46,38	49,11	50,22
K <sub>2</sub> O	9,31	9,33	9,36	9,37	9,39
CaO	0,09	0,15	0,23	0,16	0,13
TiO <sub>2</sub>	0,03	0,21	0,04	0,11	0,55
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01
MnO	0,12	0,12	0,13	0,10	0,06
FeO	4,29	5,49	4,16	2,66	2,57
<b>total</b>	<b>93,63</b>	<b>94,52</b>	<b>89,83</b>	<b>93,39</b>	<b>97,21</b>

Sample	R6-23,70m-3-1	R1-21,20m-4-2	R6-34,70m-2-1	M52-236,50m-2-3	R6-34,70m-4-2
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,13	0,15	0,32	0,11
MgO	0,52	1,60	2,27	1,16	2,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,56	29,84	28,37	28,15	28,11
SiO <sub>2</sub>	47,34	47,48	50,42	41,75	48,97
K <sub>2</sub> O	9,40	9,42	9,51	9,55	9,58
CaO	0,11	0,12	0,07	0,04	0,08
TiO <sub>2</sub>	0,16	0,32	0,03	0,73	0,32
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,02	0,00	0,01	0,08
MnO	0,09	0,00	0,09	0,08	0,05
FeO	5,60	5,42	3,77	4,99	4,12
<b>total</b>	<b>94,82</b>	<b>94,35</b>	<b>94,69</b>	<b>86,79</b>	<b>93,48</b>

## Annexe II

Sample	R6-34,70m-5-2	M52-347,40m-4-4	M52-236,50m-3-3	R6-34,70m-5-1	R6-23,70m-5-2
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,58	0,90	0,16	0,12
MgO	1,98	0,83	0,57	1,56	0,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,16	34,24	36,83	30,07	31,95
SiO <sub>2</sub>	49,15	46,80	45,74	49,13	48,22
K <sub>2</sub> O	9,59	9,59	9,59	9,64	9,65
CaO	0,13	0,07	0,05	0,08	0,06
TiO <sub>2</sub>	0,06	0,15	0,58	0,33	0,07
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,04	0,08	0,00	0,00
MnO	0,13	0,07	0,05	0,07	0,05
FeO	4,43	1,34	1,04	2,47	5,68
<b>total</b>	<b>92,72</b>	<b>93,71</b>	<b>95,43</b>	<b>93,51</b>	<b>96,34</b>

Sample	R6-34,70m-3-2	R6-23,70m-7-2	M52-501,00m-3-3	R1-21,20m-4-3	R6-23,70m-3-2
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,13	0,05	0,06	0,06
MgO	2,89	0,55	1,61	1,19	0,49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,58	32,01	29,06	31,43	31,87
SiO <sub>2</sub>	47,97	47,60	48,37	48,97	46,75
K <sub>2</sub> O	9,66	9,67	9,68	9,72	9,79
CaO	0,09	0,07	0,15	0,13	0,14
TiO <sub>2</sub>	0,33	0,00	0,06	0,14	0,05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,02	0,00	0,06	0,00
MnO	0,26	0,16	0,09	0,04	0,12
FeO	6,82	4,23	4,29	3,77	5,06
<b>total</b>	<b>93,67</b>	<b>94,44</b>	<b>93,35</b>	<b>95,51</b>	<b>94,33</b>

Sample	R6-34,70m-3-1	M52-236,50m-1-1	R1-21,20m-2-2	M52-274,60m-7-1	R6-34,70m-3-3
Na <sub>2</sub> O	0,16	0,91	0,09	0,79	0,20
MgO	1,53	0,81	1,29	0,65	1,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,29	34,63	31,21	35,25	31,40
SiO <sub>2</sub>	48,80	46,33	49,21	44,01	48,49
K <sub>2</sub> O	9,79	9,82	9,84	9,84	9,86
CaO	0,10	0,01	0,09	0,03	0,21
TiO <sub>2</sub>	0,39	0,59	0,13	0,48	0,61
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02
MnO	0,03	0,00	0,12	0,08	0,00
FeO	2,81	3,62	3,89	1,07	1,86
<b>total</b>	<b>93,89</b>	<b>96,73</b>	<b>95,87</b>	<b>92,24</b>	<b>94,32</b>

Sample	M52-224,80m-2-5	R1-21,20m-4-1	R1-30,00m-4-4	R1-21,20m-5-1	M52-551,00m-4-1
Na <sub>2</sub> O	0,43	0,05	0,41	0,43	0,56
MgO	1,00	1,21	0,90	0,82	0,42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,67	31,52	33,73	33,90	35,54
SiO <sub>2</sub>	45,83	48,62	47,33	46,28	45,50
K <sub>2</sub> O	9,90	9,90	9,94	9,96	10,03
CaO	0,06	0,13	0,24	0,07	0,06
TiO <sub>2</sub>	0,22	0,05	0,27	0,03	0,24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00
MnO	0,02	0,11	0,07	0,00	0,02
FeO	1,72	3,48	0,82	2,93	1,94
<b>total</b>	<b>91,86</b>	<b>95,09</b>	<b>93,73</b>	<b>94,43</b>	<b>94,32</b>

## Annexe II

Sample	M52-219,50-3-3	R1-21,20m-5-3	R1-21,20m-5-2	M52-349,40-5-2	R1-21,20m-5-4
Na <sub>2</sub> O	0,23	0,54	0,09	0,61	0,31
MgO	0,96	0,59	0,96	1,38	0,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,37	33,88	30,42	32,27	33,38
SiO <sub>2</sub>	45,58	44,62	46,81	45,18	47,50
K <sub>2</sub> O	10,04	10,05	10,08	10,10	10,11
CaO	0,07	0,05	0,06	0,08	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,13	0,00	0,02	0,68	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
MnO	0,16	0,09	0,00	0,03	0,00
FeO	2,98	3,48	3,11	4,02	2,78
<b>total</b>	<b>93,53</b>	<b>93,30</b>	<b>91,56</b>	<b>94,35</b>	<b>94,93</b>

Sample	R6-34,70m-2-4	R6-34,70m-1-4	M52-274,60m-5-2	R6-34,70m-5-4	R6-34,70m-5-3
Na <sub>2</sub> O	0,51	0,29	0,21	0,12	0,35
MgO	0,26	0,62	1,15	1,76	0,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,90	33,07	29,11	30,48	35,09
SiO <sub>2</sub>	46,88	46,66	47,98	48,26	45,68
K <sub>2</sub> O	10,11	10,14	10,16	10,16	10,18
CaO	0,00	0,02	0,06	0,04	0,03
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,12	0,00	0,66	0,42
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
MnO	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00
FeO	0,66	1,53	4,71	2,48	0,88
<b>total</b>	<b>95,38</b>	<b>92,47</b>	<b>93,42</b>	<b>93,96</b>	<b>93,08</b>

Sample	R6-34,70m-1-3	R6-34,70m-1-1	M52-274,60m-4-1	M52-236,50m-1-3	R1-30,00m-3-3
Na <sub>2</sub> O	0,43	0,45	0,53	0,50	0,41
MgO	0,58	0,50	0,11	0,75	0,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,12	35,12	31,83	34,80	35,82
SiO <sub>2</sub>	45,69	46,03	43,03	46,69	45,13
K <sub>2</sub> O	10,18	10,20	10,26	10,26	10,26
CaO	0,00	0,07	0,02	0,01	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,14	0,15	0,04	1,01	0,53
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
MnO	0,00	0,02	0,13	0,05	0,04
FeO	1,04	1,05	4,96	2,30	1,01
<b>total</b>	<b>93,19</b>	<b>93,60</b>	<b>90,92</b>	<b>96,37</b>	<b>93,82</b>

Sample	M52-224,80m-4-3	M52-236,50m-7-1	M52-224,80m-3-3	M52-347,40m-4-1	M52-274,60m-7-3
Na <sub>2</sub> O	0,59	0,57	0,53	0,43	0,38
MgO	0,87	0,40	0,26	0,67	0,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,26	35,97	34,69	35,67	35,26
SiO <sub>2</sub>	46,53	44,75	44,47	45,52	49,26
K <sub>2</sub> O	10,28	10,28	10,29	10,30	10,31
CaO	0,03	0,06	0,03	0,00	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,88	0,20	0,03	0,84	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	1,97	2,45	2,13	1,09	1,51
<b>total</b>	<b>95,41</b>	<b>94,68</b>	<b>92,43</b>	<b>94,53</b>	<b>97,17</b>

## Annexe II

Sample	M52-501,00m-4-1	M52-347,40m-1-1	M52-347,40m-4-3	R1-30,00m-2-3	M52-347,40m-1-2
Na <sub>2</sub> O	0,37	0,45	0,51	0,53	0,52
MgO	0,62	0,56	0,35	0,75	0,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,51	36,40	35,70	36,20	35,88
SiO <sub>2</sub>	46,98	46,35	45,83	46,75	45,44
K <sub>2</sub> O	10,32	10,32	10,35	10,35	10,37
CaO	0,06	0,04	0,05	0,06	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,09	0,41	0,31	0,53	0,21
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
MnO	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
FeO	1,80	0,76	1,59	0,90	1,80
<b>total</b>	<b>94,75</b>	<b>95,29</b>	<b>94,70</b>	<b>96,10</b>	<b>94,69</b>

Sample	M52-347,40m-3-3	M52-274,60m-6-2	M52-349,40-1-3	R1-21,20m-3-3	M52-274,60m-2-4
Na <sub>2</sub> O	0,50	0,61	0,45	0,45	0,64
MgO	0,40	0,74	0,41	0,43	0,64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,94	35,16	37,13	35,82	36,40
SiO <sub>2</sub>	46,27	46,14	47,53	45,57	45,58
K <sub>2</sub> O	10,37	10,38	10,38	10,39	10,40
CaO	0,05	0,05	0,05	0,12	0,06
TiO <sub>2</sub>	0,04	0,78	0,12	0,00	0,30
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
FeO	1,50	1,59	2,34	1,11	0,96
<b>total</b>	<b>95,08</b>	<b>95,45</b>	<b>98,41</b>	<b>93,91</b>	<b>94,98</b>

Sample	M52-274,60m-6-1	M52-274,60m-2-1	M52-236,50m-3-1	M52-274,60m-7-2	R1-30,00m-4-2
Na <sub>2</sub> O	0,66	0,53	0,38	0,55	0,64
MgO	0,85	0,79	0,98	0,58	0,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,41	34,11	34,19	35,65	36,59
SiO <sub>2</sub>	47,18	45,57	46,05	45,42	45,11
K <sub>2</sub> O	10,43	10,45	10,48	10,49	10,52
CaO	0,02	0,05	0,21	0,03	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,79	0,91	0,60	0,40	0,56
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01
MnO	0,02	0,00	0,06	0,00	0,01
FeO	1,47	1,98	2,26	1,07	1,06
<b>total</b>	<b>96,83</b>	<b>94,41</b>	<b>95,21</b>	<b>94,19</b>	<b>95,04</b>

Sample	M52-274,60m-3-3	M52-274,60m-7-4	R1-21,20m-3-4	M52-349,40-5-6	M52-349,40-1-2
Na <sub>2</sub> O	0,67	0,50	0,58	0,53	0,57
MgO	0,43	0,62	0,38	0,68	0,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,31	36,77	36,92	33,43	37,04
SiO <sub>2</sub>	46,29	46,01	45,85	44,97	46,37
K <sub>2</sub> O	10,53	10,53	10,56	10,56	10,57
CaO	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,10	0,41	0,11	0,77	0,12
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,04	0,02	0,00	0,00
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
FeO	1,89	1,05	0,81	3,06	1,25
<b>total</b>	<b>96,28</b>	<b>95,93</b>	<b>95,23</b>	<b>94,00</b>	<b>96,21</b>



## Annexe II

Sample	R1-21,20m-3-2	M52-501,00m-1-1	M52-349,40-2-2	M52-349,40-1-1	M52-274,60m-4-2
Na <sub>2</sub> O	0,62	0,46	0,55	0,45	0,51
MgO	0,40	0,62	0,36	0,65	0,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,69	36,07	37,57	34,49	32,54
SiO <sub>2</sub>	46,28	45,97	46,52	45,52	44,85
K <sub>2</sub> O	10,57	10,57	10,58	10,59	10,59
CaO	0,02	0,00	0,03	0,02	0,03
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,33	0,62	0,96	0,54
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,02	0,00	0,01	0,08
MnO	0,04	0,00	0,00	0,03	0,00
FeO	0,89	0,79	0,67	2,34	3,99
<b>total</b>	<b>96,56</b>	<b>94,82</b>	<b>96,91</b>	<b>95,06</b>	<b>94,10</b>

Sample	R1-21,20m-3-1	M52-274,60m-3-1	M52-224,80m-2-4	M52-274,60m-4-4	M52-274,60m-6-5
Na <sub>2</sub> O	0,42	0,53	0,35	0,53	0,52
MgO	0,55	0,66	0,83	0,53	0,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,62	36,41	34,68	36,21	34,71
SiO <sub>2</sub>	46,25	45,35	46,65	46,15	45,16
K <sub>2</sub> O	10,59	10,62	10,63	10,63	10,64
CaO	0,04	0,03	0,03	0,05	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,16	0,11	0,49	0,46	0,41
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
MnO	0,00	0,03	0,00	0,09	0,04
FeO	1,26	1,32	1,61	1,35	2,68
<b>total</b>	<b>94,89</b>	<b>95,06</b>	<b>95,26</b>	<b>96,01</b>	<b>94,78</b>

Sample	M52-274,60m-3-2	M52-274,60m-5-3	M52-274,60m-3-4	M52-274,60m-2-5	M52-224,80m-3-2
Na <sub>2</sub> O	0,57	0,60	0,59	0,38	0,48
MgO	0,55	0,32	0,45	0,68	0,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,92	33,50	36,53	36,14	35,51
SiO <sub>2</sub>	45,45	45,78	45,71	45,59	45,03
K <sub>2</sub> O	10,66	10,67	10,67	10,67	10,70
CaO	0,00	0,02	0,03	0,02	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,09	0,25	0,24	0,00	0,53
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,00	0,03	0,00	0,02
MnO	0,00	0,04	0,00	0,00	0,03
FeO	2,51	4,36	1,09	0,95	1,22
<b>total</b>	<b>94,77</b>	<b>95,53</b>	<b>95,35</b>	<b>94,43</b>	<b>93,96</b>

Sample	R1-30,00m-3-2	R6-34,70m-1-2	M52-274,60m-6-3	M52-274,60m-2-3	R6-34,70m-4-1
Na <sub>2</sub> O	0,61	0,30	0,59	0,53	0,21
MgO	0,48	0,37	0,43	0,89	0,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,46	35,15	36,43	34,56	33,84
SiO <sub>2</sub>	46,04	45,77	45,77	46,32	46,66
K <sub>2</sub> O	10,70	10,71	10,71	10,72	10,74
CaO	0,02	0,02	0,00	0,01	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,55	0,06	0,27	0,28	0,15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,00	0,00	0,05	0,00
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	0,99	1,24	1,43	1,55	1,28
<b>total</b>	<b>95,89</b>	<b>93,63</b>	<b>95,63</b>	<b>94,91</b>	<b>93,73</b>

## Annexe II

Sample	M52-274,60m-2-6	M52-349,40-3-1	M52-274,60m-4-3	R1-30,00m-5-3	M52-274,60m-4-5
Na <sub>2</sub> O	0,17	0,56	0,62	0,53	0,53
MgO	1,41	0,55	0,65	0,52	0,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,20	36,70	34,68	35,86	37,07
SiO <sub>2</sub>	46,53	45,38	45,92	44,76	45,71
K <sub>2</sub> O	10,75	10,75	10,78	10,79	10,83
CaO	0,06	0,01	0,00	0,01	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,44	0,15	1,08	0,56	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00
MnO	0,04	0,08	0,00	0,00	0,04
FeO	3,62	0,90	1,64	1,14	1,55
<b>total</b>	<b>95,25</b>	<b>95,07</b>	<b>95,37</b>	<b>94,18</b>	<b>96,07</b>

Sample	R1-21,20m-1-1	M52-349,40-3-2	M52-274,60m-5-1	M52-349,40-4-1	R1-21,20m-1-2
Na <sub>2</sub> O	0,45	0,37	0,31	0,39	0,37
MgO	0,44	0,36	1,02	0,43	0,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,65	36,13	32,31	36,34	36,13
SiO <sub>2</sub>	45,51	45,20	45,67	45,98	45,97
K <sub>2</sub> O	10,87	10,95	11,01	11,01	11,12
CaO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,09	0,10	0,09	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,02	0,00	0,06	0,00
MnO	0,01	0,00	0,00	0,03	0,01
FeO	1,27	1,34	4,08	1,53	1,22
<b>total</b>	<b>95,23</b>	<b>94,46</b>	<b>94,50</b>	<b>95,87</b>	<b>95,35</b>

Sample	M52-551,00m-C4-2	M52-224,80m-C5-4	M52-274,60m-C3-5	M52-347,40m-C5-2	M52-236,50m-C3-2
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,06	0,05	0,02	0,01
MgO	0,01	13,31	8,41	11,74	11,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,00	18,26	18,16	20,35	17,06
SiO <sub>2</sub>	53,95	27,25	25,36	27,55	28,64
K <sub>2</sub> O	0,15	0,23	0,25	0,26	0,29
CaO	10,70	0,27	0,09	0,16	0,25
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,01	0,00	0,09	0,12
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,05	0,05	0,03
MnO	0,00	0,57	0,58	0,18	0,39
FeO	0,02	25,51	31,32	25,50	29,14
<b>total</b>	<b>87,04</b>	<b>85,48</b>	<b>84,27</b>	<b>85,90</b>	<b>87,70</b>

Sample	M52-236,50m-C2-5	M52-224,80m-C2-1	M52-224,80m-C1-3	M52-219,50-C2-1	M52-236,50m-C2-6
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,06	0,09	0,05	0,04
MgO	10,50	13,10	13,47	11,69	13,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,15	16,79	19,12	18,30	17,38
SiO <sub>2</sub>	28,95	26,95	28,66	29,16	28,77
K <sub>2</sub> O	0,30	0,33	0,37	0,44	0,56
CaO	0,33	0,25	0,31	0,37	0,18
TiO <sub>2</sub>	0,24	0,78	0,00	0,00	1,95
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,07	0,00	0,21	0,05
MnO	0,37	0,45	0,66	0,35	0,55
FeO	29,01	27,52	25,45	24,37	24,55
<b>total</b>	<b>87,94</b>	<b>86,29</b>	<b>88,12</b>	<b>84,94</b>	<b>87,19</b>

## Annexe II

Sample	M52-274,60m-C1-1	M52-236,50m-C1-4	R6-39,50m-C2-1	M52-274,60m-C1-1	M52-274,60m-C1-2
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,01	0,12	0,04	0,11
MgO	11,65	14,02	10,96	11,76	12,82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,00	18,10	19,70	17,48	17,64
SiO <sub>2</sub>	29,07	29,49	27,57	30,06	31,30
K <sub>2</sub> O	0,63	0,64	0,77	0,77	0,81
CaO	0,26	0,13	0,10	0,39	0,56
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,89	0,29	0,00	0,67
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,04	0,00	0,01	0,25
MnO	0,56	0,51	0,83	0,32	0,37
FeO	27,16	22,60	26,75	25,61	22,83
<b>total</b>	<b>87,36</b>	<b>86,43</b>	<b>87,09</b>	<b>86,44</b>	<b>87,36</b>

Sample	R6-39,50m-C1-4	M52-347,40m-C5-5	R6-39,50m-C1-2	M52-219,50-C5-2	M52-219,50-C3-1
Na <sub>2</sub> O	0,11	0,14	0,03	0,03	0,07
MgO	10,96	10,41	11,71	11,53	16,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,79	10,76	20,08	17,56	17,67
SiO <sub>2</sub>	28,68	19,20	27,85	33,11	30,90
K <sub>2</sub> O	0,88	0,90	0,91	1,06	1,30
CaO	0,12	1,73	0,06	0,30	0,28
TiO <sub>2</sub>	0,19	1,75	0,44	0,10	1,61
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,00	0,00	0,04	0,10
MnO	0,60	0,31	1,02	0,38	0,17
FeO	24,98	37,83	24,60	20,92	15,14
<b>total</b>	<b>87,37</b>	<b>83,03</b>	<b>86,70</b>	<b>85,03</b>	<b>83,45</b>

Sample	M52-236,50m-C1-2	R6-39,50m-C4-4	M52-236,50m-C7-2	M52-224,80m-C4-1	M52-347,40m-C3-1
Na <sub>2</sub> O	0,08	0,15	0,11	0,02	0,06
MgO	8,46	10,59	12,31	12,28	12,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,78	19,49	21,00	17,22	23,29
SiO <sub>2</sub>	30,75	28,22	30,98	31,33	35,69
K <sub>2</sub> O	1,39	1,40	1,42	1,59	1,67
CaO	0,25	0,09	0,22	0,22	0,17
TiO <sub>2</sub>	0,09	3,23	0,17	0,62	0,02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,03	0,05	0,00	0,03
MnO	0,48	0,58	0,44	0,39	0,36
FeO	27,41	23,77	22,26	22,08	14,33
<b>total</b>	<b>86,76</b>	<b>87,54</b>	<b>88,96</b>	<b>85,75</b>	<b>88,14</b>

Sample	M52-274,60m-C1-2	R6-39,50m-C4-2	M52-236,50m-C2-4	M52-349,40-C5-3	R6-39,50m-C3-1
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,07	0,05	0,08	0,01
MgO	11,30	10,87	9,96	10,69	10,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,78	19,25	19,72	18,35	19,49
SiO <sub>2</sub>	33,78	29,69	30,62	29,80	29,98
K <sub>2</sub> O	1,79	2,11	2,37	2,50	2,55
CaO	0,62	0,14	0,23	0,24	0,11
TiO <sub>2</sub>	0,48	1,26	1,85	0,22	1,14
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,23	0,02	0,00	0,00	0,03
MnO	0,34	0,55	0,56	0,26	0,69
FeO	19,17	23,30	24,76	8,24	22,12
<b>total</b>	<b>85,50</b>	<b>87,25</b>	<b>90,12</b>	<b>70,38</b>	<b>86,38</b>

## Annexe II

Sample	M52-347,40m-C2-1	M52-347,40m-C3-2	M52-349,40-C5-4	R6-39,50m-C1-1	M52-224,80m-C5-1
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,07	0,28	0,07	0,05
MgO	11,30	15,41	12,77	10,05	12,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,65	18,20	20,40	18,90	18,51
SiO <sub>2</sub>	37,63	32,94	34,91	29,45	33,04
K <sub>2</sub> O	2,66	2,68	2,70	2,93	3,01
CaO	0,25	0,17	0,42	0,12	0,22
TiO <sub>2</sub>	0,11	1,12	1,13	3,89	1,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,02	0,00	0,07	0,00
MnO	0,40	0,57	0,43	0,49	0,45
FeO	14,48	17,50	13,42	20,49	20,07
<b>total</b>	<b>87,55</b>	<b>88,68</b>	<b>86,45</b>	<b>86,45</b>	<b>88,82</b>

Sample	M52-219,50-C5-3	R6-39,50m-C3-2	M52-224,80m-C4-2	M52-219,50-C2-3	M52-224,80m-C5-5
Na <sub>2</sub> O	0,20	0,01	0,02	0,04	0,05
MgO	9,84	10,33	10,96	11,83	11,72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,98	19,60	18,35	16,21	17,22
SiO <sub>2</sub>	33,30	30,50	34,62	31,22	32,66
K <sub>2</sub> O	3,09	3,31	3,32	3,33	3,54
CaO	0,26	0,20	0,18	0,30	0,18
TiO <sub>2</sub>	2,03	1,66	1,08	2,03	1,27
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,03	0,00	0,03	0,09
MnO	0,30	0,99	0,27	0,27	0,33
FeO	19,91	21,09	18,31	21,06	20,70
<b>total</b>	<b>85,90</b>	<b>87,72</b>	<b>87,10</b>	<b>86,31</b>	<b>87,76</b>

Sample	M52-347,40m-C2-2	M52-347,40m-C5-1	M52-224,80m-C5-7	M52-219,50-C2-2	M52-224,80m-C3-5
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,09	0,14	0,11	0,10
MgO	9,63	8,53	10,19	12,02	9,73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,69	13,98	18,74	15,99	18,46
SiO <sub>2</sub>	40,24	27,20	33,48	32,40	32,69
K <sub>2</sub> O	3,75	3,85	3,87	3,90	3,99
CaO	0,26	0,16	0,18	0,18	0,47
TiO <sub>2</sub>	0,23	1,47	1,66	2,27	1,51
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
MnO	0,27	0,16	0,38	0,26	0,40
FeO	11,47	33,42	20,39	21,34	21,31
<b>total</b>	<b>89,61</b>	<b>88,87</b>	<b>89,05</b>	<b>88,49</b>	<b>88,66</b>

Sample	R6-39,50m-C4-3	M52-224,80m-C2-3	R6-39,50m-C2-2	R1-30,00m-C2-2	M52-349,40-C5-5
Na <sub>2</sub> O	0,08	0,13	0,06	0,02	0,04
MgO	10,10	10,61	9,29	8,41	8,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,90	17,02	20,96	21,11	21,49
SiO <sub>2</sub>	30,46	34,57	33,55	33,42	40,26
K <sub>2</sub> O	4,15	4,20	4,22	4,27	4,29
CaO	0,12	0,28	0,12	0,22	0,24
TiO <sub>2</sub>	1,74	2,07	1,21	1,96	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,00	0,08	0,03	0,00
MnO	0,80	0,39	0,51	0,25	0,25
FeO	20,49	18,83	17,57	21,44	12,37
<b>total</b>	<b>86,86</b>	<b>88,10</b>	<b>87,57</b>	<b>91,13</b>	<b>87,62</b>

## Annexe II

Sample	M52-349,40-C1-4	M52-219,50-C4-1	M52-349,40-C5-1	M52-219,50-C3-2	M52-219,50-C5-1
Na <sub>2</sub> O	0,16	0,05	0,18	0,18	0,21
MgO	12,45	10,33	10,76	9,86	8,82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,68	17,87	20,69	15,17	19,86
SiO <sub>2</sub>	32,52	31,84	36,74	32,21	35,70
K <sub>2</sub> O	4,36	4,41	4,66	4,71	4,81
CaO	0,25	0,18	0,21	1,83	0,23
TiO <sub>2</sub>	2,17	0,51	1,38	2,05	1,60
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,00	0,04	0,00	0,01
MnO	0,15	0,35	0,34	0,29	0,18
FeO	18,99	21,74	12,84	19,87	19,51
<b>total</b>	<b>87,78</b>	<b>87,27</b>	<b>87,84</b>	<b>86,17</b>	<b>90,92</b>

Sample	R6-39,50m-C2-4	M52-219,50-C4-3	M52-349,40-C2-1	R6-39,50m-C2-3	R1-30,00m-C3-4
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,18	0,05	0,03	0,02
MgO	8,74	11,58	8,60	10,05	7,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,25	16,51	22,76	19,71	21,30
SiO <sub>2</sub>	29,92	34,24	43,22	31,60	34,56
K <sub>2</sub> O	4,81	4,89	4,93	4,93	4,98
CaO	0,26	0,09	0,29	0,12	0,15
TiO <sub>2</sub>	1,88	2,92	0,03	1,87	1,90
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,08	0,03
MnO	0,57	0,33	0,19	0,65	0,25
FeO	21,30	20,12	9,87	20,82	18,41
<b>total</b>	<b>85,75</b>	<b>90,86</b>	<b>89,94</b>	<b>89,86</b>	<b>88,82</b>

Sample	M52-347,40m-C2-3	M52-224,80m-C5-2	M52-347,40m-C1-5	R1-30,00m-C5-4	M52-224,80m-C1-2
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,09	0,04	0,04	0,13
MgO	9,35	9,95	10,53	7,86	8,76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,17	17,53	19,41	19,89	18,07
SiO <sub>2</sub>	43,92	34,34	38,74	33,27	34,77
K <sub>2</sub> O	4,98	5,11	5,16	5,31	5,33
CaO	0,25	0,20	0,15	1,62	0,18
TiO <sub>2</sub>	0,63	1,84	1,13	3,56	1,33
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,04	0,06	0,05	0,04
MnO	0,17	0,28	0,42	0,39	0,26
FeO	7,34	20,53	13,34	20,27	19,93
<b>total</b>	<b>90,88</b>	<b>89,89</b>	<b>88,97</b>	<b>92,26</b>	<b>88,81</b>

Sample	R6-39,50m-C1-3	M52-224,80m-C3-1	M52-236,50m-C7-3	M52-347,40m-C1-3	R1-30,00m-C4-3
Na <sub>2</sub> O	0,08	0,11	0,26	0,00	0,07
MgO	9,68	8,79	6,49	8,88	8,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,95	17,85	26,67	23,89	20,59
SiO <sub>2</sub>	32,24	37,46	39,84	43,05	32,65
K <sub>2</sub> O	5,39	5,44	5,52	5,64	5,71
CaO	0,03	0,13	0,15	0,19	0,13
TiO <sub>2</sub>	1,39	0,92	0,13	0,52	2,25
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,02	0,05	0,03	0,04
MnO	0,33	0,28	0,16	0,22	0,32
FeO	21,62	17,24	14,17	7,95	21,51
<b>total</b>	<b>90,77</b>	<b>88,24</b>	<b>93,44</b>	<b>90,38</b>	<b>91,29</b>

## Annexe II

Sample	M52-347,40m-C1-4	R1-30,00m-C4-1	M52-224,80m-C5-6	R1-30,00m-C1-3	M52-224,80m-C3-4
Na <sub>2</sub> O	0,11	0,15	0,09	0,13	0,12
MgO	8,54	8,18	9,22	8,17	8,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,79	20,64	16,82	21,01	17,24
SiO <sub>2</sub>	36,41	33,11	35,52	33,31	34,46
K <sub>2</sub> O	5,77	5,81	5,83	5,87	5,88
CaO	0,14	0,20	0,26	0,06	0,15
TiO <sub>2</sub>	2,67	2,23	2,14	1,90	2,18
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,06	0,00	0,03	0,01
MnO	0,24	0,35	0,25	0,35	0,16
FeO	16,35	21,19	20,75	21,70	21,46
<b>total</b>	<b>90,06</b>	<b>91,93</b>	<b>90,88</b>	<b>92,53</b>	<b>89,86</b>

Sample	M52-219,50-C4-2	M52-219,50-C4-4	R1-30,00m-C3-1	R1-30,00m-C5-1	M52-224,80m-C1-5
Na <sub>2</sub> O	0,05	0,13	0,13	0,09	0,04
MgO	8,87	8,44	7,44	8,55	8,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,93	16,93	19,37	20,43	15,52
SiO <sub>2</sub>	33,91	34,11	32,42	33,44	35,49
K <sub>2</sub> O	5,94	5,99	6,03	6,09	6,09
CaO	0,11	0,20	0,71	0,11	0,24
TiO <sub>2</sub>	1,73	2,02	3,01	2,37	3,24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,00	0,04	0,06	0,00
MnO	0,26	0,25	0,25	0,17	0,15
FeO	17,83	20,33	20,44	21,38	18,94
<b>total</b>	<b>88,65</b>	<b>88,40</b>	<b>89,84</b>	<b>92,69</b>	<b>88,25</b>

Sample	M52-347,40m-C2-4	R1-30,00m-C1-2	M52-347,40m-C2-5	M52-224,80m-C5-3	R6-39,50m-C3-4
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,12	0,09	0,03	0,02
MgO	7,76	8,47	9,06	5,96	9,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,64	19,94	17,87	17,27	19,33
SiO <sub>2</sub>	44,95	31,84	37,73	36,36	33,02
K <sub>2</sub> O	6,11	6,30	6,37	6,76	6,82
CaO	0,23	0,12	0,16	0,14	0,11
TiO <sub>2</sub>	0,62	2,10	1,77	1,44	1,88
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	0,02	0,10
MnO	0,25	0,37	0,47	0,21	0,41
FeO	7,11	22,82	17,01	20,55	20,04
<b>total</b>	<b>91,71</b>	<b>92,08</b>	<b>90,53</b>	<b>88,74</b>	<b>91,17</b>

Sample	M52-224,80m-C2-2	R1-30,00m-C1-1	R6-39,50m-C4-1	R1-30,00m-C2-4	M52-219,50-C3-4
Na <sub>2</sub> O	0,12	0,13	0,12	0,08	0,19
MgO	5,19	7,92	8,27	7,98	7,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,09	19,77	19,73	20,38	19,66
SiO <sub>2</sub>	35,66	33,45	34,84	33,40	33,92
K <sub>2</sub> O	7,13	7,16	7,23	7,32	7,45
CaO	0,16	0,10	0,11	0,30	0,21
TiO <sub>2</sub>	1,80	2,20	1,79	2,30	2,45
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,04	0,00	0,02	0,03
MnO	0,21	0,25	0,28	0,36	0,25
FeO	21,09	20,97	17,32	20,89	17,93
<b>total</b>	<b>90,46</b>	<b>91,99</b>	<b>89,69</b>	<b>93,02</b>	<b>89,89</b>

## Annexe II

Sample	M52-347,40m-C3-4	M52-274,60m-C6-4	M52-349,40-C1-6	M52-224,80m-C1-1	M52-219,50-C5-4
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,23	0,12	0,25	0,23
MgO	5,52	4,52	7,69	8,10	6,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,69	30,53	16,59	18,64	17,01
SiO <sub>2</sub>	39,33	41,13	36,80	34,51	34,49
K <sub>2</sub> O	7,50	7,64	7,76	7,79	7,81
CaO	0,12	0,12	0,08	0,17	0,12
TiO <sub>2</sub>	1,83	0,19	2,65	2,37	2,33
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00
MnO	0,29	0,14	0,32	0,16	0,39
FeO	19,37	8,22	20,08	19,00	21,58
<b>total</b>	<b>91,77</b>	<b>92,72</b>	<b>92,11</b>	<b>91,00</b>	<b>90,86</b>

Sample	R1-30,00m-C1-4	M52-347,40m-C4-2	R1-30,00m-C5-2	M52-347,40m-C5-4	9134-236,50m-C4-3
Na <sub>2</sub> O	0,11	0,22	0,14	0,31	0,16
MgO	8,01	7,51	7,84	9,32	12,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,27	19,71	20,28	17,99	18,97
SiO <sub>2</sub>	34,40	38,41	34,38	36,33	24,70
K <sub>2</sub> O	7,94	7,95	7,96	8,07	0,17
CaO	0,01	0,13	0,07	0,08	0,15
TiO <sub>2</sub>	2,11	2,51	2,17	2,90	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,06	0,03	0,01	0,02
MnO	0,23	0,14	0,17	0,29	0,52
FeO	21,52	14,97	20,45	17,91	25,13
<b>total</b>	<b>94,62</b>	<b>91,61</b>	<b>93,50</b>	<b>93,22</b>	<b>82,64</b>

Sample	9134-236,50m-C1-3	9134-236,50m-C3-1	9134-236,50m-C1-4	9134-236,50m-C4-2	9134-236,50m-C3-4
Na <sub>2</sub> O	0,11	0,10	0,16	0,13	0,20
MgO	10,84	11,05	11,36	11,76	11,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,99	19,25	19,63	19,43	19,71
SiO <sub>2</sub>	24,71	24,80	25,42	25,45	25,65
K <sub>2</sub> O	0,14	0,03	0,14	0,21	0,20
CaO	0,10	0,15	0,09	0,06	0,06
TiO <sub>2</sub>	0,06	0,17	0,00	0,00	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,03	0,03	0,07	0,04
MnO	0,55	0,35	0,35	0,46	0,48
FeO	27,13	28,17	27,66	26,97	27,74
<b>total</b>	<b>82,64</b>	<b>84,09</b>	<b>84,84</b>	<b>84,54</b>	<b>85,77</b>

Sample	9134-236,50m-C3-2	9134-224,80-C2-4	9134-224,80m-C4-3	9134-236,50m-C3-3	9134-347,40m-C2-1
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,01	0,00	0,04	0,02
MgO	11,96	11,67	13,29	11,17	12,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,13	20,00	20,24	20,92	31,51
SiO <sub>2</sub>	26,26	26,66	26,82	30,83	37,09
K <sub>2</sub> O	0,06	0,01	0,11	1,00	0,36
CaO	0,14	0,00	0,26	0,28	0,31
TiO <sub>2</sub>	0,12	0,03	0,45	0,00	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,01	0,02	0,01	0,03
MnO	0,44	0,56	0,34	0,37	0,14
FeO	28,04	27,03	24,28	22,80	4,08
<b>total</b>	<b>87,24</b>	<b>85,99</b>	<b>85,80</b>	<b>87,41</b>	<b>86,29</b>

## Annexe II

sample	R03-85,50m-1-1	Tupos1-971,20n	Tupos1-971,20n	Tupos1-971,20r	Tupos1-971,20n	MH39-001-500	Tupos1-971,20m
SiO <sub>2</sub>	47,8	48,1	47,4	48,1	49,8	46,7	47,7
TiO <sub>2</sub>	0,1	0,7	1,0	0,0	1,3	0,5	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,0	36,4	33,3	37,5	31,7	36,4	35,7
FeO	2,9	0,8	3,6	1,1	3,1	0,9	1,1
MnO	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
MgO	4,2	0,7	1,3	0,4	1,4	0,8	1,0
CaO	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,7	0,9	0,5	0,2	0,6	0,6
K <sub>2</sub> O	8,3	8,5	8,8	8,8	9,0	9,2	9,3
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Total	91,7	96,1	96,4	96,4	96,6	95,1	95,6

sample	Tupos1-992,4m-	Tupos1-975m-5-	Tupos1-975m-4-	Tupos1-971,20r	Tupos1-971,20-	Tupos1-975m-	MH39-1-523,70m
SiO <sub>2</sub>	48,7	47,2	47,4	47,7	47,7	47,2	49,4
TiO <sub>2</sub>	0,1	0,3	0,0	0,1	0,4	1,5	0,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,5	36,3	37,7	36,9	35,8	35,2	24,1
FeO	2,5	1,2	1,0	1,0	1,4	1,0	6,3
MnO	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MgO	1,2	0,5	0,1	0,6	0,6	0,7	1,2
CaO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,2
K <sub>2</sub> O	9,4	9,4	9,5	9,5	9,7	10,0	9,2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Total	95,7	95,6	96,3	96,4	96,1	96,1	90,7

sample	MH39-001-452r	Tupos1-975,90n	Tupos1-915,40n	Tupos1-975,90r	Tupos1-913m-1	Tupos1-968,80	R03-54,10m-4-2
SiO <sub>2</sub>	46,0	45,8	45,0	45,7	45,7	47,3	48,9
TiO <sub>2</sub>	0,0	0,7	0,9	1,0	0,6	0,6	0,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,3	27,0	30,1	26,6	26,1	31,4	33,2
FeO	1,9	4,4	1,0	4,3	4,2	0,8	0,3
MnO	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MgO	0,1	1,3	0,6	1,2	1,7	0,7	0,1
CaO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,2	0,5	0,2	0,1	0,4	0,0
K <sub>2</sub> O	10,3	8,8	9,8	9,1	9,3	9,3	0,1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	88,9	88,4	87,9	88,2	87,7	90,4	82,8

sample	Tupos1-913m-2-	R03--85,50m-1-:	MH39-001-500,	MH39-001-500,1	MH39-001-500,	9226-500,10m-	MH39-1-500,10m
SiO <sub>2</sub>	43,7	31,78	35,02	34,99	36,33	34,96	35,14
TiO <sub>2</sub>	0,0	1,56	2,93	2,32	3,48	2,05	2,64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,0	19,93	14,75	17,95	14,40	18,66	16,68
FeO	0,0	22,73	19,64	18,61	18,86	17,71	18,98
MnO	0,0	0,15	0,29	0,28	0,34	0,25	0,36
MgO	1,3	8,88	10,66	10,60	11,66	10,56	10,01
CaO	0,2	0,05	0,40	0,07	0,06	0,08	0,29
Na <sub>2</sub> O	0,0	0,06	0,11	0,26	0,33	0,06	0,03
K <sub>2</sub> O	9,2	4,02	4,99	5,95	6,08	7,20	7,31
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6	0,06	0,00	0,06	0,00	0,05	0,04
Total	64,1	89,22	88,78	91,09	91,52	91,58	91,49



## Annexe II

sample	Tupos1-992,4m-	Tupos1-992,4-1-	MH39-001-500,	R03-85,50m-2-1	MH39-001-452,(	MH39-001-502	MH39-1-523,70m
SiO <sub>2</sub>	34,02	34,42	35,76	42,06	28,00	27,01	33,82
TiO <sub>2</sub>	1,36	3,26	2,62	0,38	2,15	1,41	2,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,67	17,22	18,08	14,65	14,90	11,31	14,79
FeO	23,44	25,35	19,62	1,30	23,13	33,14	20,45
MnO	0,54	0,54	0,28	0,11	1,06	0,33	0,39
MgO	4,49	4,57	9,64	25,01	12,64	9,10	10,56
CaO	0,19	0,02	0,07	0,00	0,12	0,20	0,44
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,11	0,13	0,11	0,07	0,18	0,12
K <sub>2</sub> O	8,58	9,07	9,18	10,59	1,60	3,54	5,52
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,00	0,05	0,00	0,00	0,02	0,05
Total	91,31	94,56	95,45	99,94	83,66	86,24	88,34

sample	Tupos1-915,40m	Tupos1-913m-2-	MH39-001-502n	MH39-001-502n	MH39-001-502n	Tupos1-915,40	R03-54,10m-4-1
SiO <sub>2</sub>	33,08	33,66	34,20	35,56	36,09	36,19	37,51
TiO <sub>2</sub>	4,95	2,25	2,46	1,53	1,46	1,28	0,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,05	14,69	15,23	13,31	12,90	15,27	24,52
FeO	20,25	18,33	20,20	17,12	16,45	16,44	14,83
MnO	0,28	0,29	0,35	0,37	0,44	0,28	0,05
MgO	10,59	11,60	8,93	13,87	14,25	11,81	2,12
CaO	0,34	0,08	0,04	0,10	0,11	0,20	0,23
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,35	0,13	0,05	0,07	0,05	0,10
K <sub>2</sub> O	5,61	6,12	9,57	6,43	7,12	7,87	2,34
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,03	0,06	0,03	0,04	0,04	0,01
Total	86,37	87,40	91,18	88,37	88,93	89,44	82,18

sample	Tupos1-913m-1-	MH39-001-971,4	Tupos1-975,90n	Tupos1-975,90n	Tupos1-975,90n	Tupos1-975,90	Tupos1-975,90m
SiO <sub>2</sub>	39,65	23,86	24,69	24,89	25,18	26,57	24,70
TiO <sub>2</sub>	0,15	0,13	0,09	0,04	0,08	0,05	0,14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,89	15,85	15,06	14,93	15,33	15,03	14,88
FeO	11,51	35,28	34,57	33,70	32,61	32,55	32,08
MnO	0,05	0,77	0,76	0,87	1,01	0,75	0,78
MgO	5,04	6,75	8,58	9,64	10,61	9,73	9,77
CaO	0,04	0,19	0,06	0,11	0,04	0,09	0,15
Na <sub>2</sub> O	0,28	0,08	0,00	0,03	0,00	0,04	0,00
K <sub>2</sub> O	5,13	0,02	0,01	0,01	0,01	0,07	0,08
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,00	0,07	0,06	0,03	0,08	0,09
Total	86,80	82,92	83,89	84,26	84,89	84,95	82,66

sample	Tupos1-975,90n	Tupos1-913m-2-	Tupos1-913m-2-	Tupos1-992,4m-	Tupos1-992,4m-	Tupos1-975m-1	Tupos1-992,4m
SiO <sub>2</sub>	25,14	24,52	28,49	30,17	30,43	24,26	29,80
TiO <sub>2</sub>	0,64	0,01	0,08	0,02	0,01	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,00	16,53	16,33	12,95	12,51	17,12	12,01
FeO	31,01	28,81	23,78	28,76	27,91	42,57	31,41
MnO	0,77	0,67	0,74	0,44	0,41	0,31	0,42
MgO	10,30	13,52	13,42	14,58	14,04	2,19	11,79
CaO	0,65	0,04	0,12	0,12	0,12	0,03	0,14
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,01	0,02	0,02	0,06	0,00	0,00
K <sub>2</sub> O	0,05	0,00	0,20	0,00	0,00	0,01	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
Total	83,66	84,12	83,19	87,04	85,51	86,51	85,58

## Annexe II

sample	Tupos1-992,4m-	Tupos1-975m-2-	Tupos1-975m-3-	Tupos1-992,4m-	Tupos1-975m-1	Tupos1-992,4n	Tupos1-992,4m
SiO <sub>2</sub>	32,16	24,38	25,54	33,44	25,51	28,41	26,90
TiO <sub>2</sub>	0,00	0,10	0,00	0,31	0,02	6,23	0,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,47	17,04	17,91	18,78	17,91	17,22	18,67
FeO	33,41	43,51	31,97	13,58	34,16	24,41	32,13
MnO	0,62	0,37	1,00	0,85	1,00	0,59	0,47
MgO	9,93	1,49	9,29	18,27	8,20	5,61	8,36
CaO	0,16	0,08	0,03	0,72	0,03	4,79	0,12
Na <sub>2</sub> O	0,06	0,00	0,05	0,05	0,00	0,06	0,01
K <sub>2</sub> O	0,02	0,02	0,03	0,04	0,09	0,53	0,54
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,02
Total	87,82	86,98	85,83	86,05	86,93	87,86	87,90

sample	Tupos1-968,80n	Tupos1-968,80n	Tupos1-975,90n	Tupos1-975,90m
SiO <sub>2</sub>	24,33	25,42	26,88	25,60
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,02	0,01	0,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,48	13,82	15,65	14,14
FeO	42,13	42,00	30,45	36,04
MnO	0,48	0,56	0,81	1,01
MgO	3,18	2,88	11,54	7,98
CaO	0,08	0,12	0,05	0,26
Na <sub>2</sub> O	0,03	0,09	0,08	0,04
K <sub>2</sub> O	0,05	0,08	0,12	0,03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,02	0,05	0,05
Total	84,84	85,01	85,64	85,42

## Annexe II

Sample	1326-3	1326-3	1326-3	1326-3	1326-3	1326-3	1326-3	1326-3	1326-3	1326-3
Al	0,805	0,584	0,5	0,968	0	0,165	0,006	0,209	0,429	0,022
Si	16,189	16,452	16,164	16,299	16,894	16,677	16,828	16,506	16,552	16,815
P	0,078	0,004	0,199	0,191	0	0,019	0	0,178	0,138	0,017
S	0,064	0	0,028	0	0,011	0,03	0	0,012	0	0,026
Ca	1,571	1,189	1,168	1,146	0	0,186	0,006	0,182	0,395	0
Fe	0,528	0,642	0,708	0,425	0	0,216	0,017	0,234	0,228	0,017
Y	0,392	0,187	0,404	1,647	0	0,1	0	0,404	0,727	0
Zr	14,313	14,771	14,646	13,359	16,29	15,876	16,359	15,58	15,05	16,26
Hf	0,174	0,194	0,176	0,177	0,23	0,213	0,196	0,213	0,178	0,234
Pb	0	0,003	0,005	0	0,001	0	0,002	0,011	0,004	0,009
Th	0,027	0,004	0,017	0,022	0	0,006	0,001	0,004	0	0,001
U	0,062	0,056	0,055	0,068	0,005	0,013	0,006	0,011	0,017	0,005
O	65,805	65,924	65,932	65,73	66,686	66,503	66,663	66,455	66,287	66,682
Total	100,009	100,01	100	100,031	100,117	100,005	100,084	100	100,004	100,088

Sample	1326-3	1326-3	1012B-1	1012B-1	1012B-1	1012B-1	1012B-1	1012B-1	1012B-1	1012B-1
Al	0,415	0,215	1,067	0,839	0,051	0	0,52	0,007	0	0,542
Si	16,416	16,439	15,988	16,29	16,688	16,813	16,367	16,762	16,774	16,353
P	0,052	0,077	0,404	0,323	0	0	0,168	0,05	0	0,045
S	0,022	0	0,013	0	0	0,015	0	0,008	0,041	0,023
Ca	0,261	0,188	0,578	0,457	0,188	0,027	0,297	0,049	0,021	0,495
Fe	0,597	0,265	0,387	0,462	0,321	0,013	0,351	0,088	0,043	0,662
Y	0,419	0,223	1,846	1,422	0	0	0,795	0	0	0,58
Zr	15,352	15,936	13,533	13,919	16,191	16,342	15,034	16,244	16,251	14,901
Hf	0,174	0,183	0,163	0,203	0,181	0,214	0,192	0,205	0,291	0,201
Pb	0,007	0,007	0,004	0,006	0	0	0,009	0,007	0	0,004
Th	0,006	0,008	0,03	0,014	0,003	0,004	0,021	0	0,004	0,037
U	0,024	0,021	0,057	0,034	0,022	0,009	0,022	0,008	0,008	0,051
O	66,256	66,449	65,93	66,034	66,494	66,673	66,248	66,639	66,67	66,108
Total	100	100,012	100	100,005	100,139	100,111	100,025	100,066	100,102	100

Sample	1012B-1	1012B-1	1012B-1	1012B-2	1012B-2	1012B-2	1012B-2	1012B-2	1012B-2	1012B-2
Al	0,951	0,004	1,086	0	1,079	0,371	0,918	0,062	0,014	0,006
Si	16,216	16,867	16,118	16,803	15,84	16,277	16,056	16,594	16,684	16,663
P	0,38	0,017	0,46	0	0,464	0,004	0,382	0,018	0,024	0,024
S	0,006	0	0,042	0,022	0,021	0	0,013	0,01	0,007	0
Ca	0,546	0,002	0,562	0,007	0,754	0,379	0,501	0,123	0	0
Fe	0,441	0,009	0,309	0,004	0,224	0,589	0,469	0,23	0,129	0,131
Y	1,7	0	2,394	0	3,513	0,099	1,594	0,029	0	0
Zr	13,518	16,268	12,797	16,398	11,942	15,733	13,798	16,115	16,381	16,381
Hf	0,175	0,221	0,165	0,193	0,153	0,26	0,201	0,255	0,221	0,242
Pb	0,007	0,006	0	0,006	0,017	0,007	0,011	0	0	0,003
Th	0,061	0	0,1	0,003	0,179	0	0,029	0,007	0,001	0
U	0,038	0,005	0,081	0,001	0,159	0,033	0,038	0,017	0,001	0,016
O	65,959	66,674	65,887	66,677	65,654	66,261	65,989	66,541	66,65	66,643
Total	100	100,075	100,001	100,113	100	100,012	100	100,001	100,112	100,108

## Annexe II

Sample	1012B-2	1012B-2	1012B-3	1012B-3	1012B-3	1012B-3	1012B-3	1012B-3	1012B-3	19-9-1
Al	0	0,128	0,921	1,035	1,163	0,164	1,682	0,675	0,6	0,602
Si	16,774	16,519	15,98	16,181	16,118	16,33	15,438	16,395	15,966	13,681
P	0,014	0,049	0,067	0,245	0,055	0,057	0,332	0,271	0,142	1,751
S	0	0,047	0	0,007	0	0,027	0,005	0,016	0,084	0
Ca	0	0,083	0,668	0,578	0,693	0,131	0,732	0,416	0,322	1,1
Fe	0,076	0,095	0,575	0,395	0,483	0,094	0,745	0,267	0,15	0,433
Y	0	0,177	0,783	1,514	1,061	0,301	3,003	1,429	1,051	0,441
Zr	16,389	16,098	14,811	13,778	14,191	16,107	12,047	14,085	14,992	15,413
Hf	0,219	0,185	0,161	0,193	0,218	0,19	0,162	0,209	0,207	0,214
Pb	0	0,007	0	0	0,004	0,02	0,035	0,007	0,077	0,007
Th	0,005	0,014	0,045	0,074	0,041	0,032	0,233	0,04	0,089	0,024
U	0	0,021	0,058	0,046	0,075	0,021	0,147	0,053	0,058	0,073
O	66,667	66,578	65,975	65,965	65,908	66,526	65,439	66,136	66,26	66,269
Total	100,143	100	100,045	100,011	100,01	100	100	100	100	100,007

Sample	19-9-1	19-9-1	19-9-1	19-9-1	19-9-1	19-9-1	19-9-1	19-9-1	19-9-1	19-9-1
Al	0,005	0,277	0,024	0,525	0,54	0,583	0,031	0,298	0,632	0,358
Si	16,582	15,616	16,72	14,006	14,15	13,996	16,777	15,353	13,885	15,323
P	0	0,6	0,012	1,618	1,555	1,451	0,034	0,699	1,57	0,777
S	0,039	0,016	0,029	0,028	0,006	0	0,026	0,01	0	0,015
Ca	0,016	0,395	0,019	0,99	0,872	0,916	0,015	0,438	0,993	0,468
Fe	0,222	0,427	0,04	0,342	0,392	0,451	0,019	0,973	0,397	0,273
Y	0	0,174	0	0,384	0,42	0,436	0	0,144	0,389	0,159
Zr	16,405	15,845	16,363	15,423	15,375	15,6	16,276	15,61	15,604	15,858
Hf	0,196	0,193	0,202	0,234	0,247	0,23	0,209	0,186	0,198	0,203
Pb	0	0,001	0	0,007	0,002	0	0,001	0,007	0,002	0,005
Th	0,004	0,016	0	0,051	0,036	0,039	0,002	0,019	0,023	0,069
U	0,014	0,017	0	0,044	0,06	0,041	0,008	0,023	0,033	0,026
O	66,608	66,422	66,667	66,348	66,346	66,282	66,677	66,24	66,29	66,466
Total	100,092	100	100,075	100	100	100,024	100,075	100	100,015	100

Sample	19-9-1	19-9-1	19-9-1	19-9-1	19-9-1	19-9-2	19-9-2	19-9-2	19-9-2	19-9-2
Al	0,871	0,098	0,614	0,791	0,791	0,048	0,809	0,544	0,254	0,691
Si	15,346	16,584	14,631	15,354	14,046	16,833	13,823	15,096	15,421	15,596
P	0,791	0,021	1,386	0,87	1,233	0,01	1,64	0,896	0,694	0,658
S	0	0	0,02	0,002	0,078	0,01	0,033	0,058	0,032	0,031
Ca	0,425	0,08	0,765	0,445	0,892	0	0,938	0,549	0,452	0,38
Fe	0,566	0,391	0,271	0,596	0,349	0,028	0,323	0,784	0,295	0,474
Y	0,789	0	0,274	0,826	0,327	0	0,336	0,201	0,103	0,67
Zr	14,762	16,144	15,294	14,641	15,675	16,319	15,493	15,308	15,967	14,948
Hf	0,177	0,197	0,223	0,188	0,228	0,175	0,157	0,238	0,247	0,232
Pb	0,001	0,007	0	0,012	0,001	0	0	0	0,001	0
Th	0,052	0,006	0,09	0,058	0,034	0,003	0,063	0,033	0,033	0,028
U	0,029	0,011	0,029	0,025	0,049	0	0,047	0,027	0,017	0,018
O	66,191	66,495	66,414	66,192	66,298	66,674	66,341	66,267	66,484	66,276
Total	100	100,034	100,01	100	100	100,1	100,002	100	100	100

## Annexe II

<b>Sample</b>	<b>19-9-2</b>	<b>19-9-2</b>	<b>19-9-2</b>	<b>19-9-2</b>	<b>19-9-2</b>	<b>19-9-2</b>	<b>19-9-2</b>	<b>19-9-2</b>	<b>19-9-2</b>	<b>19-9-2</b>	<b>19-9-2</b>
Al	0,579	0,524	0,316	0,64	0,15	0,619	0,327	0,014	0,589	0,513	1,062
Si	15,439	15,576	16,5	15,354	16,512	14,658	14,699	16,773	14,548	14,956	15,076
P	0,893	0,575	0,034	0,763	0,132	1,944	1,46	0,031	1,163	0,729	0,328
S	0,02	0,034	0	0,015	0	0,057	0,03	0,001	0	0,041	0,018
Ca	0,401	0,472	0,156	0,574	0,115	0,564	0,133	0,014	0,716	0,372	0,566
Fe	0,477	0,755	0,708	1,018	0,466	0,704	0,372	0,082	0,77	0,482	0,835
Y	0,594	0,091	0	0,293	0	0,901	0,919	0	0,275	0,419	0,331
Zr	14,927	15,417	15,768	14,903	15,824	13,668	15,071	16,298	15,265	15,676	15,352
Hf	0,233	0,236	0,249	0,282	0,362	0,288	0,25	0,193	0,303	0,305	0,299
Pb	0,012	0	0	0	0	0,004	0	0,012	0,015	0,011	0
Th	0,071	0,038	0	0,022	0,01	0,229	0,186	0,004	0,116	0,116	0,068
U	0,024	0,022	0,012	0,028	0,009	0,032	0,026	0,003	0,037	0,022	0,043
O	66,33	66,263	66,345	66,115	66,477	66,332	66,552	66,645	66,213	66,358	66,032
Total	100	100,004	100,089	100,007	100,058	100	100,023	100,07	100,011	100	100,011

## Annexe II

Sample	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1
Al	0	0	0,006	0,092	0,034	0	0,013	0,461
Si	16,663	16,864	16,821	15,938	16,398	16,645	16,669	14,75
P	0	0,004	0	0,333	0,05	0	0,006	1,128
S	0	0	0	0,056	0	0	0,019	0,027
Ca	0	0,003	0	0,106	0,025	0	0,003	0,304
Fe	0,011	0	0	0,081	0,008	0,019	0,027	0,259
Y	0	0	0	0,11	0	0	0	0,495
Zr	16,562	16,346	16,442	16,452	16,676	16,607	16,445	15,817
Hf	0,186	0,192	0,193	0,18	0,183	0,191	0,195	0,201
Pb	0,001	0,006	0	0	0	0	0,004	0,001
Th	0,005	0,001	0,007	0	0,002	0,004	0,006	0,009
U	0,001	0	0,004	0,01	0,007	0	0,002	0,032
O	66,68	66,677	66,675	66,646	66,657	66,673	66,67	66,516
Total	100,109	100,094	100,147	100,003	100,04	100,139	100,058	100

Sample	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1	9316-6-1
Al	0,376	0,514	0,889	0,756	0,67	0,949	0,888	0,892
Si	15,211	14,801	10,803	13,692	12,792	10,746	12,111	12,195
P	0,804	1,093	4,404	2,493	2,603	4,511	3,255	3,026
S	0,008	0,008	0,695	0,168	0,48	0,754	0,532	0,191
Ca	0,309	0,338	0,698	0,559	0,46	0,681	0,557	0,676
Fe	0,18	0,225	0,14	0,319	0,116	0,147	0,224	0,302
Y	0,41	0,533	2,457	1,732	1,58	2,501	1,912	2,172
Zr	15,961	15,743	12,32	13,512	14,067	12,096	13,245	13,822
Hf	0,201	0,216	0,139	0,186	0,154	0,134	0,166	0,168
Pb	0,005	0,001	0,006	0,001	0	0,004	0	0
Th	0	0,003	0,493	0,082	0,301	0,49	0,325	0,093
U	0,025	0,037	0,162	0,069	0,086	0,169	0,128	0,072
O	66,508	66,489	66,793	66,43	66,695	66,818	66,661	66,401
Total	100	100	100	100	100,003	100	100,005	100,011

Sample	9316-6-3	9316-6-3	9316-6-3	9316-6-3	9316-6-3	9316-6-3	9316-6-3	9316-6-4
Al	0	0,726	0,939	0,789	0,785	2,966	0,864	0
Si	16,861	10,836	11,354	11,25	12,385	12,271	16,234	16,71
P	0	4,357	3,802	3,8	2,942	3,677	1,638	0,01
S	0	0,624	0,322	0,818	0,323	0,338	0,165	0,021
Ca	0,001	0,609	0,764	0,557	0,543	0,692	0,324	0
Fe	0,008	0,169	0,319	0,18	0,202	0,406	0,183	0
Y	0	2,419	2,417	2,12	1,995	2,057	0,875	0
Zr	16,333	12,707	13,138	12,899	13,808	10,899	12,7	16,464
Hf	0,206	0,131	0,135	0,153	0,195	0,134	0,239	0,186
Pb	0,003	0	0,01	0,002	0,004	0,001	0	0
Th	0	0,45	0,208	0,432	0,178	0,239	0,181	0,005
U	0,005	0,157	0,106	0,16	0,088	0,13	0,065	0
O	66,675	66,819	66,484	66,841	66,551	66,189	66,538	66,693
Total	100,091	100,005	100	100	100	100	100,007	100,09

## Annexe II

Sample	9316-6-4	9316-6-4	9316-6-4	9316-6-4	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1
Al	0	0,175	0,4	0,089	0,915	1,008	1,046	1,084
Si	16,88	15,844	14,994	16,229	13,313	13,011	12,654	13,111
P	0	0,264	0,999	0,148	2,559	2,44	1,599	1,693
S	0	0,079	0,017	0,044	0	0	0,055	0,025
Ca	0	0,176	0,319	0,168	0,774	1,015	1,266	1,085
Fe	0,006	0,066	0,208	0,039	0,715	0,627	0,694	0,824
Y	0	0,137	0,446	0,017	2,485	2,479	1,67	1,835
Zr	16,317	16,406	15,787	16,204	12,9	13,087	14,885	14,217
Hf	0,216	0,226	0,278	0,427	0,093	0,108	0,096	0,096
Pb	0	0,006	0	0,004	0	0,015	0,001	0
Th	0,002	0,01	0,002	0,001	0,148	0,16	0,103	0,106
U	0,008	0,01	0,029	0,012	0,103	0,112	0,085	0,09
O	66,676	66,602	66,522	66,618	66,024	65,939	65,845	65,835
Total	100,105	100	100,001	100	100,03	100,002	100	100,001

Sample	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1
Al	0,964	0,994	0,873	0,989	1,09	0,856	1,031	1,102
Si	13,855	13,788	13,879	13,57	13,396	14,62	13,795	13,802
P	2,032	2,293	2,315	2,209	1,688	1,338	2,266	2,264
S	0,024	0	0	0,014	0,04	0	0,039	0,005
Ca	0,851	0,914	0,842	0,887	1,361	0,927	0,951	1,087
Fe	0,451	0,472	0,435	0,447	0,463	0,371	0,411	0,399
Y	2,263	2,332	2,278	2,44	1,803	1,436	2,397	2,509
Zr	13,18	12,845	12,975	13,059	13,963	14,131	12,716	12,531
Hf	0,104	0,109	0,104	0,102	0,089	0,124	0,113	0,108
Pb	0,013	0,008	0	0,006	0,007	0	0,006	0
Th	0,168	0,173	0,164	0,175	0,143	0,094	0,179	0,183
U	0,058	0,072	0,064	0,081	0,089	0,061	0,066	0,07
O	66,037	66,022	66,097	66,021	65,869	66,066	66,03	65,952
Total	100	100,022	100,026	100	100	100,026	100	100,012

Sample	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1	9321-8-1
Al	0,923	0,936	0,983	1,018	0,945	0,999	0,97	1,074
Si	13,937	14,257	13,661	13,587	13,742	13,57	13,697	13,755
P	2,064	2,079	2,161	2,161	2,214	2,283	2,169	2,14
S	0,022	0,015	0,004	0,01	0,036	0,027	0,063	0,02
Ca	0,938	1,031	0,892	1,078	1	0,992	0,998	1,134
Fe	0,732	0,571	0,51	0,509	0,492	0,495	0,479	0,423
Y	2,218	2,278	2,266	2,425	2,35	2,36	2,352	2,464
Zr	12,875	12,54	13,156	12,886	12,877	12,916	12,913	12,716
Hf	0,107	0,104	0,103	0,118	0,111	0,112	0,113	0,103
Pb	0,008	0	0,004	0,006	0	0	0,003	0
Th	0,17	0,164	0,167	0,196	0,173	0,168	0,17	0,187
U	0,069	0,076	0,077	0,08	0,072	0,078	0,072	0,065
O	65,935	65,948	66,018	65,925	66,007	66,001	66,002	65,923
Total	100	100	100	100	100,017	100,001	100	100,003

## Annexe II

Sample	9321-8-2	9321-8-2	9321-8-2	9321-8-2	9321-8-2	9321-8-2	9321-8-2	9321-8-2
Al	0,021	0,981	1,083	0,71	0,925	0,396	0	0,868
Si	16,66	13,727	13,669	15,328	13,487	15,901	16,727	13,358
P	0,022	1,56	1,689	1,089	2,311	0,08	0,008	2,13
S	0	0,031	0,024	0,031	0,023	0	0,019	0,035
Ca	0	1,213	1,189	0,669	0,932	0,173	0	0,595
Fe	0,072	0,417	0,482	0,425	0,687	1,269	0,152	0,783
Y	0	1,572	1,843	1,165	2,301	0	0	2,278
Zr	16,484	14,091	13,722	14,111	12,935	15,885	16,328	13,485
Hf	0,188	0,232	0,183	0,176	0,159	0,165	0,206	0,186
Pb	0,007	0,012	0,001	0	0	0,004	0,001	0,004
Th	0	0,115	0,122	0,072	0,168	0	0	0,159
U	0	0,085	0,083	0,05	0,092	0,025	0,004	0,071
O	66,649	65,964	65,911	66,184	65,983	66,137	66,639	66,048
Total	100,102	100	100	100,009	100,004	100,035	100,085	100

Sample	9321-8-2	9321-8-2	9321-8-2	9321-8-2	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3
Al	0,233	0,99	0,934	0,795	1,07	0,92	0,851	0,94
Si	16,271	13,417	13,823	14,566	13,287	14,701	14,289	13,583
P	0,036	2,036	2,277	1,391	1,738	1,298	1,581	2,172
S	0,005	0,026	0	0,003	0,039	0	0	0,035
Ca	0,169	1,021	0,521	0,703	1,347	0,448	0,718	0,974
Fe	0,669	0,877	0,773	0,889	0,639	0,516	0,534	0,619
Y	0	1,884	2,257	1,426	1,813	1,06	1,255	2,183
Zr	16,142	13,432	12,962	13,896	13,809	14,525	14,278	13,055
Hf	0,155	0,154	0,161	0,165	0,221	0,224	0,231	0,215
Pb	0	0	0,007	0	0	0,003	0	0
Th	0	0,178	0,154	0,118	0,109	0,028	0,051	0,154
U	0,024	0,086	0,099	0,05	0,106	0,069	0,083	0,081
O	66,367	65,906	66,068	65,999	65,829	66,225	66,158	65,99
Total	100,072	100,008	100,036	100,002	100,007	100,017	100,028	100,003

Sample	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3
Al	0,963	0,969	0,82	0,981	1,099	0,852	1,096	1,13
Si	13,739	13,53	15,224	15,097	13,722	14,302	13,544	13,569
P	1,712	1,678	1,116	0,965	1,294	1,222	1,781	1,817
S	0,049	0,014	0,028	0	0,019	0	0	0,051
Ca	1,124	1,095	0,277	0,953	1,147	0,788	1,197	1,214
Fe	0,634	0,71	0,713	0,675	0,656	0,526	0,478	0,466
Y	1,716	1,629	1,149	0,866	1,338	1,123	1,883	1,903
Zr	13,715	14,043	14,132	14,136	14,402	14,684	13,741	13,53
Hf	0,229	0,247	0,226	0,226	0,288	0,257	0,203	0,195
Pb	0	0,004	0,005	0,007	0	0,006	0	0,003
Th	0,107	0,068	0,011	0,039	0,069	0,074	0,107	0,105
U	0,08	0,097	0,097	0,09	0,086	0,073	0,093	0,097
O	65,939	65,915	66,202	65,972	65,882	66,1	65,904	65,92
Total	100,009	100	100	100,008	100,003	100,006	100,027	100



## Annexe II

Sample	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-3	9321-8-5	9321-8-5	9321-8-5
Al	1,099	0,959	0,969	0,197	2,212	0,011	0,01	0,914
Si	14,013	13,923	13,403	16,2	11,604	16,712	16,641	13,973
P	1,536	1,46	2,04	0,243	1,907	0,035	0,091	2,141
S	0,027	0,051	0,016	0	0,012	0,002	0,017	0
Ca	0,969	0,795	1,04	0,15	1,257	0,017	0,006	0,68
Fe	0,674	0,791	0,935	0,148	0,518	0,171	0,289	1,07
Y	1,6	1,35	1,959	0,152	1,925	0	0	1,927
Zr	13,733	14,275	13,335	16,145	14,563	16,309	16,174	12,919
Hf	0,209	0,217	0,207	0,21	0,122	0,173	0,189	0,192
Pb	0,013	0	0	0,002	0,001	0	0,013	0,017
Th	0,126	0,09	0,14	0,012	0,099	0	0	0,153
U	0,072	0,079	0,092	0,02	0,074	0	0,005	0,105
O	65,93	66,016	65,866	66,542	65,707	66,617	66,587	65,947
Total	100	100,008	100,002	100,02	100	100,047	100,024	100,04

Sample	9321-8-5	9321-8-5	9321-8-5	9321-8-7	9321-8-7	9321-8-7	9321-8-7	9321-8-7
Al	0,801	0,924	0,906	0	0,461	0,91	0,48	0,447
Si	14,153	15,2	13,938	16,728	15,389	14,557	15,511	15,849
P	1,253	1,267	1,992	0,004	0,508	1,299	0,782	0,433
S	0,015	0,025	0,008	0	0	0,023	0,014	0,012
Ca	0,582	0,344	0,488	0	0,566	0,678	0,426	0,351
Fe	0,818	0,611	0,915	0,031	0,233	0,308	0,256	0,11
Y	0,933	0,68	1,992	0	0,477	1,201	0,742	0,334
Zr	15,017	14,344	13,309	16,538	15,936	14,577	15,21	15,872
Hf	0,21	0,202	0,185	0,119	0,105	0,096	0,108	0,1
Pb	0	0	0	0,003	0	0	0,003	0
Th	0,036	0,048	0,136	0,004	0,009	0,084	0,057	0,006
U	0,062	0,054	0,081	0,006	0,006	0,06	0,042	0,027
O	66,128	66,301	66,051	66,664	66,332	66,212	66,37	66,459
Total	100,008	100	100,001	100,096	100,022	100,005	100	100

Sample	9321-8-7	9321-8-7	9321-8-7	9321-8-7	9321-8-7	9321-8-7	9321-8-7	9321-8-7
Al	0,995	0,039	0,784	0,99	0,854	0,801	0,038	0,58
Si	14,61	16,728	15,118	14,476	14,106	15,345	16,582	15,395
P	1,319	0,051	1,142	1,846	1,138	1,4	0,027	0,681
S	0,036	0	0,008	0,016	0	0,029	0	0
Ca	0,502	0,05	0,499	0,855	0,757	0,65	0,001	0,479
Fe	0,485	0,066	0,444	0,49	0,455	0,426	0,186	0,425
Y	1,086	0	1,129	1,854	1,046	1,32	0	0,65
Zr	14,521	16,338	14,396	13,125	15,295	13,584	16,432	15,337
Hf	0,101	0,12	0,117	0,102	0,102	0,105	0,18	0,104
Pb	0	0,014	0,002	0	0,01	0	0	0
Th	0,059	0	0,085	0,133	0,061	0,094	0,002	0,052
U	0,065	0,002	0,05	0,059	0,059	0,053	0,006	0,046
O	66,224	66,618	66,226	66,059	66,129	66,199	66,613	66,268
Total	100,004	100,026	100	100,005	100,012	100,006	100,068	100,019

Annexe II

Sample	9321-8-7	9321-8-7	9322-21-1	9322-21-1	9322-21-1	9322-21-1	9322-21-1	9322-21-1
Al	0,275	0,069	0	1,003	0,948	1,027	1,028	0,774
Si	16,371	16,859	16,55	12,157	12,709	11,571	12,037	12,962
P	0,041	0,086	0,055	2,984	2,654	3,261	3,086	2,396
S	0	0	0	0	0,008	0,002	0,014	0,024
Ca	0,096	0,077	0,026	1,127	1,043	1,321	1,231	0,831
Fe	0,371	0,062	0	0,33	0,357	0,392	0,335	0,257
Y	0,035	0,019	0	2,09	1,747	2,394	2,181	1,618
Zr	16,243	16,048	16,527	13,644	13,834	13,292	13,409	14,371
Hf	0,108	0,155	0,201	0,176	0,191	0,193	0,19	0,191
Pb	0,015	0,002	0	0	0,013	0,014	0	0
Th	0,015	0,004	0,006	0,263	0,221	0,372	0,268	0,21
U	0,015	0,01	0,002	0,085	0,085	0,096	0,094	0,056
O	66,45	66,616	66,671	66,161	66,192	66,065	66,131	66,314
Total	100,034	100,008	100,038	100,019	100	100	100,005	100,005

Sample	9322-21-1	9322-21-1	9322-21-1	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-3
Al	0,423	2,584	1,036	0,005	0,342	0,137	0,117	0,324
Si	14,998	14,714	15,341	16,624	15,118	16,186	16,232	16,204
P	0,526	0,574	1,031	0	0,672	0,21	0,167	0,241
S	0	0	0	0	0,033	0	0,016	0,027
Ca	0,547	0,537	0,634	0	0,387	0,177	0,176	0,25
Fe	0,083	0,139	0,522	0,027	0,146	0,058	0,07	0,404
Y	0,573	0,584	0,637	0	0,604	0,219	0,17	0,236
Zr	16,152	14,57	14,297	16,545	15,987	16,251	16,277	15,683
Hf	0,248	0,192	0,259	0,204	0,15	0,161	0,153	0,177
Pb	0,009	0,014	0	0	0,013	0,001	0,017	0,011
Th	0	0,004	0,016	0,006	0,007	0,005	0,004	0,027
U	0,091	0,097	0,069	0,003	0,091	0,037	0,037	0,017
O	66,371	66,001	66,171	66,663	66,45	66,562	66,564	66,401
Total	100,021	100,011	100,013	100,077	100	100,004	100	100

Sample	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-3
Al	0,763	0,386	0,858	1,031	1,101	0,618	0,675	1,138
Si	12,396	15,28	13,637	12,318	12,77	14,599	14,983	12,984
P	2,017	1,021	1,792	2,638	2,383	1,319	0,706	2,137
S	0,005	0	0,023	0	0	0	0	0,035
Ca	0,642	0,386	0,968	0,986	1,117	0,669	0,509	1,007
Fe	0,326	0,239	0,56	0,639	0,409	0,337	0,651	0,722
Y	0,959	0,601	1,011	1,646	1,528	1,113	0,645	0,937
Zr	16,224	15,346	14,644	14,2	14,185	14,736	15,375	14,624
Hf	0,164	0,19	0,178	0,157	0,148	0,19	0,154	0,169
Pb	0	0	0,002	0,005	0,007	0,002	0,014	0
Th	0,066	0,087	0,092	0,14	0,175	0,096	0,064	0,031
U	0,051	0,031	0,083	0,123	0,072	0,063	0,057	0,108
O	66,399	66,458	66,151	66,116	66,112	66,261	66,171	66,115
Total	100,013	100,023	100	100,001	100,007	100,002	100,005	100,008

## Annexe II

Sample	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-3	9322-21-6	9322-21-6	9322-21-6	9322-21-6	9322-21-6
Al	1,208	1,266	1,503	1,037	0,986	1,133	0,754	1,095
Si	13,557	12,336	13,478	11,701	12,187	12,594	14,771	11,095
P	1,636	2,358	1,538	3,834	3,348	2,312	0,899	3,392
S	0,006	0,025	0,035	0,056	0,007	0	0	0,011
Ca	0,608	0,841	0,93	1,44	1,24	0,911	0,437	1,471
Fe	0,617	0,69	0,538	0,437	0,544	0,877	0,648	1,19
Y	1	1,475	1,332	2,578	2,364	1,422	0,612	2,498
Zr	14,858	14,573	14,253	12,045	12,562	14,333	15,32	12,798
Hf	0,164	0,144	0,229	0,196	0,198	0,216	0,244	0,198
Pb	0,009	0	0	0	0,015	0,012	0,01	0,002
Th	0,032	0,051	0,131	0,518	0,412	0,025	0,045	0,436
U	0,144	0,142	0,065	0,06	0,068	0,154	0,078	0,065
O	66,162	66,101	65,976	66,096	66,069	66,022	66,214	65,749
Total	100	100,001	100,008	100	100	100,011	100,031	100

Sample	9322-21-6	9322-21-6	9322-21-6	9322-21-6	9322-21-6	9322-21-6	9322-21-6	9312-4-4
Al	0,83	1,168	0,998	0,74	0,86	1,068	0,981	0,003
Si	14,515	12,143	13,982	19,571	14,599	11,394	11,735	16,731
P	0,939	2,764	0,902	0,988	0,893	3,561	3,593	0
S	0,002	0,033	0	0,004	0,011	0,018	0,07	0,002
Ca	0,502	1,128	0,686	0,598	0,586	1,476	1,463	0
Fe	0,601	0,495	0,812	0,529	0,723	1,402	0,496	0,026
Y	0,974	1,958	0,528	0,604	0,501	2,528	2,413	0
Zr	15,111	13,651	15,73	10,448	15,31	12,122	12,447	16,451
Hf	0,217	0,184	0,201	0,185	0,259	0,186	0,203	0,167
Pb	0	0,005	0,003	0	0	0	0	0,015
Th	0,046	0,279	0,027	0,034	0,021	0,487	0,464	0,006
U	0,11	0,117	0,081	0,07	0,089	0,056	0,065	0,007
O	66,156	66,075	66,059	66,235	66,16	65,71	66,07	66,662
Total	100,001	100	100,009	100,006	100,012	100,01	100,001	100,07

Sample	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4
Al	0,671	0,714	0,502	0,38	0,702	0,07	0,703	0,006
Si	13,488	14,01	14,88	15,009	14,785	16,411	13,847	16,575
P	2,324	1,632	1,331	0,888	1,178	0,194	1,878	0,029
S	0	0,03	0,001	0,006	0,024	0,031	0,03	0,005
Ca	1,202	1,172	0,867	0,604	0,962	0,122	1,827	0
Fe	0,425	0,423	0,326	0,248	0,295	0,084	0,482	0,026
Y	2,252	1,555	1,208	0,794	1,241	0,119	2,746	0
Zr	13,302	14,011	14,256	15,461	14,3	16,183	12,276	16,582
Hf	0,14	0,144	0,162	0,172	0,166	0,15	0,141	0,159
Pb	0	0,002	0,005	0	0	0	0,001	0,003
Th	0,056	0,171	0,17	0,047	0,129	0,008	0,257	0,003
U	0,127	0,096	0,088	0,064	0,09	0,017	0,167	0
O	66,03	66,038	66,204	66,342	66,128	66,609	65,645	66,673
Total	100,017	100	100	100,015	100	100	100	100,061

## Annexe II

Sample	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-4	9312-4-5
Al	0,545	0,673	0,248	0,449	0,905	1,605	0,219	0,092
Si	14,202	14,08	15,794	15,189	13,855	15,623	15,945	16,656
P	1,862	1,989	0,715	0,82	1,588	0,586	0,053	0
S	0,047	0,01	0,029	0,01	0,018	0	0	0
Ca	0,971	1,371	0,424	0,529	1,864	0,453	0,327	0,01
Fe	0,363	0,369	0,178	0,416	0,401	1,14	0,53	0,018
Y	1,695	2,257	0,661	0,554	2,47	0,538	0,131	0
Zr	13,814	12,9	15,269	15,43	12,548	13,889	16,219	16,481
Hf	0,144	0,144	0,166	0,189	0,167	0,201	0,185	0,202
Pb	0	0,003	0	0,008	0,005	0	0	0,004
Th	0,075	0,144	0,034	0,033	0,39	0,05	0,045	0
U	0,112	0,129	0,043	0,049	0,17	0,053	0,026	0,002
O	66,177	65,933	66,445	66,322	65,618	65,873	66,332	66,642
Total	100,007	100	100,004	100	100	100,01	100,012	100,107

Sample	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5
Al	0,47	0,507	0,116	0,546	0	4,462	0,243	0,588
Si	15,27	14,967	16,199	15,582	16,634	13,543	15,881	15,564
P	0,816	1,16	0,091	0,681	0,021	0,964	0,507	0,842
S	0	0,051	0	0	0,027	0,011	0,01	0,048
Ca	0,504	0,8	0,227	0,395	0,018	0,858	0,326	0,893
Fe	0,314	0,48	0,492	0,587	0,014	0,245	0,206	0,185
Y	0,775	0,946	0,037	0,78	0	1	0,356	1,193
Zr	15,21	14,488	16,221	14,983	16,492	12,981	15,764	14,018
Hf	0,188	0,19	0,187	0,174	0,179	0,148	0,181	0,169
Pb	0,001	0,012	0,011	0,006	0	0	0	0,008
Th	0,102	0,122	0,005	0,008	0	0,157	0,016	0,225
U	0,051	0,073	0,02	0,058	0,003	0,079	0,033	0,103
O	66,317	66,204	66,408	66,223	66,682	65,554	66,478	66,164
Total	100,016	100	100,014	100,022	100,069	100,002	100,001	100

Sample	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5
Al	1,389	0,62	0,625	0,702	0,549	0,663	0,484	0,39
Si	14,288	14,324	15,529	14,51	15,034	14,482	15,772	15,209
P	1,188	1,406	0,358	1,151	1,098	1,046	0,534	0,702
S	0,02	0,01	0	0,053	0,036	0	0,001	0,032
Ca	1,051	0,833	0,523	1,379	1,008	1,086	0,347	0,44
Fe	0,385	0,464	0,465	0,365	0,396	0,49	0,7	0,443
Y	1,302	1,045	0,448	1,887	1,155	1,471	0,495	0,484
Zr	13,987	14,79	15,433	13,513	14,253	14,165	15,164	15,709
Hf	0,153	0,188	0,203	0,178	0,187	0,293	0,203	0,19
Pb	0	0,002	0	0	0,006	0,001	0,007	0,011
Th	0,202	0,042	0,142	0,236	0,078	0,225	0,001	0,002
U	0,093	0,083	0,058	0,164	0,092	0,122	0,05	0,037
O	65,945	66,193	66,218	65,863	66,107	65,959	66,241	66,351
Total	100,003	100	100,001	100,001	100	100,003	100	100

## Annexe II

Sample	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9312-4-5	9326-17-1
Al	0,452	0,534	0,87	0,326	0,585	4,839	0,624	0,415
Si	15,078	14,642	13,959	15,826	14,941	15,572	15,114	15,823
P	0,797	1,243	1,533	0,257	0,645	1,235	0,901	0,41
S	0,03	0	0,074	0,008	0	0,025	0	0
Ca	0,829	0,695	1,939	0,247	0,86	1,355	0,465	0,353
Fe	0,648	0,505	0,326	0,599	0,435	0,431	0,588	0,4
Y	0,942	0,746	2,519	0,192	0,893	1,454	0,985	0,24
Zr	14,53	15,102	12,457	15,902	15,295	9,394	14,857	15,9
Hf	0,188	0,189	0,188	0,26	0,179	0,23	0,195	0,127
Pb	0,002	0,001	0	0,006	0,002	0,009	0,008	0,004
Th	0,319	0,03	0,303	0	0,007	0,094	0,004	0,009
U	0,101	0,069	0,207	0,04	0,071	0,129	0,072	0,037
O	66,084	66,257	65,628	66,342	66,093	65,234	66,193	66,351
Total	100	100,011	100,003	100,006	100,007	100	100,006	100,068

Sample	9326-17-1	9326-17-1	9326-17-1	9326-17-1	9326-17-1	9326-17-1	9326-17-1	9326-17-1
Al	0,578	0,883	0,986	0,874	0,868	0,68	0,832	0,663
Si	15,959	13,093	12,988	13,805	13,587	14,971	13,883	14,599
P	0,11	1,79	1,598	1,577	1,36	0,61	1,177	0,763
S	0	0,09	0,039	0	0,022	0,01	0,036	0,027
Ca	0,264	1,025	1,205	0,682	0,817	0,483	0,827	0,759
Fe	0,752	0,67	0,553	1,29	1,127	0,662	0,644	0,465
Y	0,149	1,82	1,618	1,522	1,391	0,584	1,32	0,729
Zr	15,736	14,265	14,688	14,068	14,648	15,548	14,891	15,551
Hf	0,236	0,162	0,187	0,144	0,152	0,207	0,194	0,188
Pb	0,003	0,018	0,009	0,01	0	0,001	0,012	0,004
Th	0,012	0,102	0,133	0,081	0,072	0,026	0,078	0,03
U	0,023	0,107	0,075	0,09	0,079	0,037	0,084	0,06
O	66,212	65,973	65,923	65,867	65,876	66,179	66,022	66,162
Total	100,035	100	100	100,009	100	100	100	100

Sample	9326-17-1	9326-17-1	9326-17-1	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2
Al	0,864	0,626	0,794	0	1,118	1,06	0,927	0,805
Si	13,699	14,292	13,579	16,855	13,986	12,963	13,88	13,881
P	1,482	1,015	1,488	0,01	1,328	1,684	1,161	1,181
S	0,025	0	0,006	0	0,038	0,028	0,06	0,063
Ca	0,948	0,744	0,873	0,015	0,78	1,244	0,955	0,91
Fe	0,572	0,514	0,922	0,099	0,596	0,558	0,691	0,585
Y	1,513	0,992	1,481	0	1,426	1,637	1,21	1,27
Zr	14,552	15,408	14,568	16,33	14,335	14,53	14,808	14,94
Hf	0,153	0,15	0,189	0,137	0,234	0,225	0,208	0,2
Pb	0	0,004	0	0,003	0,015	0,002	0,006	0,005
Th	0,085	0,06	0,086	0	0,015	0,081	0,035	0,041
U	0,094	0,073	0,076	0	0,116	0,083	0,084	0,08
O	66,021	66,14	65,939	66,638	66,013	65,906	65,973	66,039
Total	100,006	100,018	100,001	100,087	100	100	100	100

## Annexe II

Sample	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2
Al	0,8	0,909	0,371	1,363	1,477	0,493	0,965	0,498
Si	13,898	13,474	16,217	13,221	13,612	15,798	13,291	15,962
P	1,457	1,609	0,23	1,61	1,162	0,276	1,655	0,288
S	0,008	0,034	0,021	0,054	0,022	0,005	0,051	0,005
Ca	0,952	1,06	0,262	1,084	0,887	0,339	1,129	0,347
Fe	0,628	0,498	0,548	0,465	0,636	0,739	0,513	0,821
Y	1,361	1,653	0,129	1,779	1,284	0,211	1,769	0,222
Zr	14,51	14,398	15,619	14,106	14,654	15,584	14,255	15,369
Hf	0,198	0,18	0,224	0,186	0,222	0,273	0,192	0,235
Pb	0,006	0	0	0	0,023	0	0,002	0,005
Th	0,071	0,086	0,002	0,101	0,047	0,01	0,103	0,007
U	0,088	0,103	0,023	0,118	0,082	0,036	0,119	0,037
O	66,024	66,002	66,36	65,914	65,892	66,238	65,956	66,206
Total	100	100,005	100,005	100,002	100	100,003	100	100

Sample	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-2	9326-17-3	9326-17-3	9326-17-3
Al	0,815	0,841	0,929	0,774	0,755	0,003	0,562	0,805
Si	13,919	13,884	13,332	13,847	15,513	16,706	14,966	14,017
P	1,557	1,63	1,484	1,195	0,44	0	0,73	1,534
S	0,014	0,03	0,011	0,042	0	0	0,028	0,047
Ca	1,013	1,054	1,014	0,895	0,375	0	0,642	0,985
Fe	0,768	0,553	0,663	0,644	0,906	0,115	0,513	0,584
Y	1,508	1,641	1,51	1,352	0,477	0	0,808	1,489
Zr	14,071	14,018	14,739	14,901	15,156	16,516	15,306	14,186
Hf	0,199	0,166	0,193	0,177	0,229	0,187	0,169	0,171
Pb	0,007	0	0,011	0,005	0	0,008	0,009	0
Th	0,077	0,08	0,065	0,069	0,008	0	0,034	0,069
U	0,105	0,11	0,101	0,088	0,048	0,007	0,052	0,079
O	65,948	66,002	65,949	66,011	66,105	66,62	66,181	66,033
Total	100	100,008	100	100	100,012	100,162	100	100

Sample	9326-17-3	9326-17-3	9326-17-3	9326-17-3	9326-17-3	9326-17-3	9326-17-3	9326-17-3
Al	0,346	0,786	0,634	1,342	0,943	0,436	0,92	0,529
Si	15,771	13,83	14,771	14,591	13,787	15,289	13,675	16,028
P	0,458	1,523	1,258	0,738	1,237	0,467	1,11	0,368
S	0,005	0,039	0,033	0,012	0,045	0,027	0,051	0,007
Ca	0,384	0,989	0,831	0,644	1,065	0,436	0,915	0,271
Fe	0,432	0,535	0,564	0,587	0,747	0,384	1,31	0,602
Y	0,362	1,537	1,234	0,745	1,069	0,42	1,06	0,179
Zr	15,648	14,388	14,251	15,048	14,876	15,974	14,874	15,47
Hf	0,177	0,152	0,174	0,177	0,18	0,169	0,181	0,173
Pb	0,007	0	0,006	0,001	0,007	0,007	0	0,006
Th	0,016	0,083	0,06	0,022	0,017	0,019	0,04	0,002
U	0,043	0,1	0,075	0,058	0,08	0,038	0,066	0,047
O	66,352	66,039	66,109	66,035	65,947	66,335	65,797	66,319
Total	100	100,001	100	100	100	100	100,001	100

Annexe II

Sample	9326-17-3	9326-17-3	9326-17-3	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10
Al	2,017	0,829	1,837	0,002	0,861	0,842	0,869	0,885
Si	13,747	13,707	13,182	16,609	12,681	13,142	13,452	13,728
P	1,213	1,453	1,595	0,051	1,834	1,692	1,706	1,671
S	0,023	0,018	0,063	0	0,063	0,09	0,051	0,11
Ca	1,042	1,021	1,016	0,013	1,329	1,264	1,106	1,256
Fe	0,791	0,705	0,562	0,234	0,742	0,575	0,492	0,532
Y	1,104	1,466	1,412	0	1,791	1,884	1,768	1,599
Zr	13,998	14,479	14,123	16,341	14,499	14,205	14,196	13,854
Hf	0,197	0,175	0,161	0,223	0,187	0,17	0,154	0,211
Pb	0,01	0,017	0,009	0,004	0,003	0	0	0
Th	0,043	0,076	0,067	0	0,052	0,108	0,102	0,075
U	0,074	0,102	0,092	0,003	0,098	0,123	0,112	0,112
O	65,742	65,951	65,883	66,6	65,86	65,915	65,998	65,974
Total	100	100	100	100,08	100	100,01	100,007	100,007

Sample	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10
Al	0,8	0,922	0,727	1,299	0,719	1,035	0,862	0,87
Si	13,475	13,299	14,201	15,949	14,309	12,95	13,912	14,203
P	1,705	1,674	0,757	0,889	0,784	1,727	1,27	1,516
S	0,069	0,004	0,023	0,039	0,037	0,065	0,023	0,039
Ca	1,147	1,277	0,922	0,893	0,861	1,365	0,979	1,246
Fe	0,539	0,731	0,434	0,716	0,852	0,695	0,661	0,627
Y	1,654	1,708	1,035	0,572	0,676	1,758	1,073	1,576
Zr	14,24	14,156	15,538	13,347	15,446	14,229	14,892	13,657
Hf	0,169	0,189	0,2	0,234	0,213	0,2	0,197	0,18
Pb	0,02	0,009	0,005	0,006	0,008	0,005	0,015	0,002
Th	0,072	0,078	0,025	0,007	0,005	0,041	0,03	0,081
U	0,114	0,117	0,08	0,071	0,087	0,108	0,074	0,103
O	65,996	65,836	66,053	65,978	66,003	65,822	66,012	65,9
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

Sample	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10	9326-17-10
Al	0,966	0,935	0,851	0,363	0,901	1,018
Si	13,053	13,161	13,152	15,365	13,196	12,994
P	1,721	1,73	1,807	0,611	1,587	1,752
S	0	0,025	0,054	0,026	0,072	0,061
Ca	1,278	1,339	1,264	0,47	1,229	1,283
Fe	0,606	0,576	0,551	0,297	0,667	0,819
Y	1,738	1,78	1,743	0,575	1,672	1,827
Zr	14,407	14,201	14,251	15,62	14,454	14,046
Hf	0,182	0,207	0,175	0,24	0,193	0,212
Pb	0,008	0	0,016	0	0,002	0,001
Th	0,06	0,056	0,08	0,023	0,034	0,053
U	0,112	0,119	0,112	0,048	0,101	0,13
O	65,872	65,874	65,943	66,366	65,893	65,804
Total	100,002	100,003	100	100,003	100	100

## Annexe II

sample	R1-18,90 -3	R1-18,90 -3	R1-18,90 -3	R1-18,90 -3	R1-18,90 -3
Al	0	0,001	0,013	0,086	0,007
Si	16,794	16,795	16,551	16,516	16,823
P	0,025	0	0,151	0,091	0,053
S	0	0	0	0,001	0
Ca	0,001	0,002	0,054	0,275	0,041
Fe	0,003	0,016	0,019	0,004	0
Y	0	0	0	0	0
Zr	16,299	16,384	16,324	16,165	16,203
Hf	0,255	0,233	0,234	0,249	0,245
Pb	0,014	0,007	0,018	0,045	0,016
Th	0,002	0,003	0	0,003	0
U	0,015	0	0,035	0,045	0,024
O	66,676	66,672	66,668	66,568	66,661
Total	100,082	100,114	100,065	100,048	100,074

sample	R1-18,90 -3	R1-18,90 -3	R1-18,90 -3	R1-18,90 -3	Pori1-324,8-3
Al	0,916	0,007	1,124	0,556	0
Si	16,544	16,822	16,706	16,039	16,644
P	0,167	0,03	0,113	0,098	0
S	0	0	0	0,005	0
Ca	0,279	0,069	0,268	0,271	0,01
Fe	0,087	0	0,083	0,084	0,02
Y	0,04	0	0,124	0	0
Zr	14,99	16,121	14,642	16,003	16,606
Hf	0,368	0,376	0,339	0,327	0,185
Pb	0,027	0,017	0,04	0,045	0
Th	0,009	0	0,02	0,005	0,001
U	0,185	0,021	0,201	0,116	0,002
O	66,401	66,654	66,345	66,46	66,653
Total	100,012	100,118	100,006	100,009	100,12

sample	Pori1-324,8-3	Pori1-324,8-3	Pori1-324,8-5	Pori1-324,8-5	R6-15,10-2
Al	0,005	0	0	0,011	0,449
Si	16,821	16,49	16,716	16,771	13,64
P	0	0,029	0,01	0	0,74
S	0	0	0	0	0,046
Ca	0,003	0,006	0	0	1,366
Fe	0,016	0,005	0,02	0	0,97
Y	0	0	0	0	2,337
Zr	16,406	16,603	16,538	16,514	14,545
Hf	0,18	0,249	0,169	0,142	0,15
Pb	0,002	0,003	0,009	0	0,006
Th	0	0,005	0	0,002	0,151
U	0	0,012	0	0	0,039
O	66,664	66,668	66,68	66,68	65,561
Total	100,097	100,07	100,142	100,12	100



## Annexe II

sample	R6-15,10-2	R6-15,10-2	R6-15,10-2	R6-15,10-2	R6-15,10-2
Al	0,014	0,177	0	0,334	0,584
Si	16,67	15,004	17,015	11,181	14,439
P	0,138	0,192	0,012	1,468	0,381
S	0	0,018	0	0,163	0,043
Ca	0,385	0,592	0,026	1,108	0,98
Fe	0,283	0,633	0,01	0,588	0,531
Y	0,289	0,752	0	2,689	1,984
Zr	15,574	16,172	16,182	13,662	14,81
Hf	0,187	0,171	0,181	0,143	0,2
Pb	0,002	0	0	0,005	0,002
Th	0,053	0,145	0,004	2,59	0,193
U	0,004	0,011	0,001	0,175	0,04
O	66,412	66,145	66,663	65,895	65,812
Total	100,011	100,011	100,095	100	100

sample	R6-15,10-2	R6-15,10-2	R6-15,10-2	R6-15,10-2	R6-15,10-3
Al	0	0,006	0,447	0,91	0
Si	16,503	15,784	15,293	14,932	16,597
P	0	0,051	0,11	0,155	0,036
S	0,025	0,022	0	0	0,009
Ca	0,017	0,686	0,812	1,389	0
Fe	0,068	0,641	0,756	0,76	0
Y	0	0,02	0,202	0,527	0
Zr	16,579	16,248	15,926	15,141	16,575
Hf	0,241	0,252	0,337	0,346	0,184
Pb	0	0,012	0,018	0	0
Th	0,001	0,015	0,022	0,05	0,004
U	0	0,031	0,035	0,061	0,002
O	66,661	66,232	66,046	65,736	66,697
Total	100,095	100	100,005	100,005	100,104

sample	R6-15,10-3	R6-15,10-3	R6-15,10-3	R6-15,10-3	R6-15,10-3
Al	0,001	0	0,184	0	0,239
Si	16,504	16,561	16,596	16,653	15,224
P	0,004	0,021	0,006	0,019	0,191
S	0,009	0,024	0	0	0,009
Ca	0,001	0,006	0,011	0,017	0,74
Fe	0,018	0,017	0,008	0,004	0,479
Y	0,006	0	0	0	0,81
Zr	16,591	16,561	16,408	16,448	15,975
Hf	0,189	0,175	0,216	0,203	0,198
Pb	0,003	0,001	0	0,004	0
Th	0,008	0,001	0,001	0,006	0,019
U	0,003	0,008	0,006	0,001	0,005
O	66,662	66,679	66,638	66,664	66,125
Total	100	100,053	100,074	100,02	100,015

## Annexe II

sample	R6-15,10-3	R6-15,10-3	R1-10,20-3	R1-10,20-3	R1-10,20-3
Al	0,167	0,423	0,767	0,589	0
Si	15,003	14,655	15,242	13,187	16,656
P	0,194	0,239	0,133	1,437	0,017
S	0	0,045	0	0,051	0,025
Ca	0,761	0,684	0,903	1,504	0,029
Fe	0,484	0,567	0,953	0,702	0,018
Y	0,634	1,162	0,628	2,588	0
Zr	16,41	15,957	15,314	13,998	16,469
Hf	0,181	0,177	0,183	0,231	0,207
Pb	0	0,002	0,004	0	0,007
Th	0,016	0,034	0,02	0,016	0,008
U	0,006	0,017	0,04	0,042	0,001
O	66,151	66,04	65,83	65,659	66,68
Total	100,006	100	100,018	100,003	100,117

sample	R1-10,20-3	R1-10,20-3	R1-10,20-3	Pori1-347,40-27	Pori1-347,40-27
Al	0,02	0	0,481	0,169	0,051
Si	15,595	16,683	15,292	16,04	16,87
P	0,011	0	0,015	0,021	0,012
S	0	0,016	0,025	0	0
Ca	0,969	0,029	1,155	1,233	0
Fe	1,229	0,013	0,965	0,692	0,043
Y	0	0	0	0,056	0
Zr	16,029	16,484	15,908	15,611	16,251
Hf	0,193	0,202	0,246	0,113	0,238
Pb	0,01	0	0	0,01	0
Th	0,018	0,002	0,003	0,033	0
U	0,033	0,002	0,039	0,04	0,003
O	65,933	66,672	65,895	65,986	66,656
Total	100,041	100,103	100,023	100,005	100,124

sample	Pori1-347,40-27	Pori1-347,40-27	Pori1-347,40-26	Pori1-347,40-26	Pori1-347,40-26
Al	0,06	0,42	0	0,115	0,195
Si	16,744	15,785	16,769	16,356	15,852
P	0,012	0,017	0,016	0,048	0,042
S	0	0	0	0	0
Ca	0,17	1,592	0	0,541	1,065
Fe	0,15	1,019	0,029	0,306	0,647
Y	0	0,188	0	0,038	0,146
Zr	16,178	15,054	16,421	16,069	15,846
Hf	0,15	0,118	0,208	0,159	0,135
Pb	0	0,011	0	0,004	0,005
Th	0,013	0,069	0,007	0,002	0
U	0,014	0,054	0,006	0,015	0,029
O	66,544	65,689	66,688	66,361	66,043
Total	100,034	100,017	100,142	100,014	100,006

## Annexe II

sample	Pori1-347,40-26	Pori1-347,40-25	Pori1-347,40-25	Pori1-347,40-25	Pori1-347,40-25
Al	0,008	0	0,019	0	0,324
Si	16,566	15,923	16,772	16,882	15,825
P	0,03	0,08	0	0,073	0,099
S	0,002	0,025	0,006	0	0
Ca	0,227	1,233	0,011	0,017	1,611
Fe	0,177	0,807	0,057	0,13	0,979
Y	0	0,006	0	0	0,086
Zr	16,286	15,734	16,315	16,165	15,085
Hf	0,212	0,155	0,251	0,167	0,146
Pb	0,008	0,013	0,005	0,003	0,008
Th	0,002	0,002	0,005	0,003	0,049
U	0,013	0,031	0,006	0,008	0,064
O	66,547	66,005	66,65	66,63	65,743
Total	100,08	100,014	100,098	100,079	100,018

sample	Pori1-347,40-25	Pori1-249-4	Pori1-249-4	Pori1-249-4	Pori1-249-4
Al	0	0	0	0,017	0,141
Si	16,565	15,763	16,681	16,669	16,119
P	0,025	0,09	0,012	0,05	0,045
S	0	0	0	0,013	0
Ca	0,033	1,359	0,014	0,014	1,095
Fe	0,136	0,72	0,025	0,02	0,489
Y	0	0,112	0	0	0
Zr	16,487	15,849	16,581	16,334	15,76
Hf	0,241	0,12	0,168	0,207	0,245
Pb	0,001	0,005	0	0,005	0,004
Th	0	0,015	0,004	0,004	0,001
U	0,006	0,035	0	0,013	0,015
O	66,621	65,961	66,666	66,665	66,121
Total	100,115	100,029	100,15	100,012	100,035

## Annexe II

Sample	9322-2-4	9322-2-4	9322-2-4	9322-2-4	9322-2-4	9322-2-4	9322-2-4	9322-2-4	9322-2-4-2
Al	0,005	0,803	0,59	0,911	0,512	0,673	0,946	0,681	1,084
Si	16,707	14,587	15,606	14,388	15,438	14,868	15,26	15,655	14,783
Ca	0,014	0,998	0,563	1,044	0,575	0,718	0,896	0,532	0,821
Fe	0,024	0,495	0,323	0,426	0,257	0,272	0,261	0,324	1,102
S	0,052	0	0	0,047	0,003	0,005	0,052	0,018	0
O	66,685	66,04	66,239	66,06	66,304	66,215	66,135	66,247	65,731
P	0	0,936	0,375	0,952	0,345	0,619	0,748	0,364	0,609
Y	0	0,896	0,537	0,842	0,348	0,708	0,783	0,524	1,265
Zr	16,401	15,036	15,578	15,1	15,986	15,716	14,651	15,334	13,979
Hf	0,199	0,17	0,168	0,178	0,183	0,182	0,195	0,228	0,468
Pb	0	0	0	0	0,002	0	0,002	0,001	0,004
Th	0	0,009	0,041	0,028	0,029	0,011	0,04	0,071	0,11
U	0,004	0,035	0,023	0,028	0,018	0,026	0,033	0,023	0,055
Total	100,091	100,007	100,044	100,005	100	100,011	100	100	100,01

Sample	9322-2-4-2	9322-2-4-2	9322-2-4-2	9322-2-4-2	9322-2-4-2	9322-2-4-2	9322-2-4-2	9322-2-4-2	9322-2-4-7
Al	1,111	1,117	1,066	1,185	1,194	1,117	1,227	1,204	0
Si	13,704	13,99	12,669	14,578	12,905	13,424	13,909	13,877	16,732
Ca	1,155	1,232	1,874	1,119	1,335	1,293	1,145	1,321	0
Fe	0,692	0,931	0,753	0,791	0,798	0,646	0,895	0,942	0,001
S	0,07	0,033	0,034	0,053	0,108	0,037	0,021	0,073	0,028
O	65,85	65,766	65,766	65,839	65,835	65,864	65,735	65,744	66,689
P	1,216	1,308	2,086	1,135	1,629	1,413	1,339	1,496	0,007
Y	1,443	1,314	1,239	1,207	1,357	1,293	1,66	1,457	0
Zr	14,377	13,791	13,866	13,494	14,284	14,437	13,338	13,191	16,451
Hf	0,276	0,32	0,489	0,413	0,379	0,304	0,359	0,409	0,17
Pb	0,004	0,01	0,001	0	0,008	0,007	0,002	0	0,016
Th	0,063	0,124	0,095	0,131	0,12	0,118	0,308	0,24	0
U	0,039	0,063	0,063	0,056	0,046	0,048	0,063	0,051	0,005
Total	100	100	100	100,003	100	100	100	100,004	100,099

Sample	9322-2-4-7	9322-2-4-7	9322-2-4-7	9322-2-4-7	9322-2-4-7	9322-2-4-7	9322-2-4-7	9322-2-4-7	9322-2-2
Al	0,867	1,209	1,142	0,758	0,886	0,45	0,297	1,529	0
Si	14,67	14,333	14,078	14,757	14,645	15,875	15,655	13,861	16,819
Ca	0,881	0,921	1,139	0,834	0,824	0,386	0,589	1,36	0
Fe	0,458	0,398	0,444	0,348	0,408	0,315	0,221	0,405	0,015
S	0	0,066	0,037	0,041	0,016	0,013	0,019	0,035	0,008
O	66,055	65,991	65,931	66,147	66,094	66,332	66,374	65,842	66,676
P	0,657	0,809	0,828	0,558	0,68	0,334	0,243	1,077	0
Y	0,777	1,151	1,03	0,629	0,805	0,482	0,112	1,036	0
Zr	15,417	14,845	15,137	15,726	15,447	15,619	16,28	14,591	16,374
Hf	0,189	0,203	0,194	0,171	0,162	0,157	0,193	0,225	0,176
Pb	0,001	0	0	0,003	0	0,016	0,003	0	0
Th	0,007	0,035	0,014	0,004	0,008	0	0,001	0,004	0
U	0,026	0,04	0,036	0,025	0,028	0,022	0,012	0,037	0,004
Total	100,004	100,001	100,01	100	100,004	100,001	100	100,002	100,072

## Annexe II

Sample	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2
Al	0,998	0,531	0,881	1,076	1,07	1,59	1,425	1,797	1,97
Si	14,055	15,597	14,113	14,477	14,064	13,285	13,188	12,341	12,616
Ca	1,141	0,484	1,047	1,133	1,262	1,404	1,449	1,326	1,746
Fe	0,611	0,303	0,519	0,588	0,517	0,512	0,465	0,542	0,531
S	0,064	0	0,039	0,033	0,044	0,263	0,153	0,181	0,087
O	65,957	66,309	66,09	65,947	65,867	65,835	65,874	65,772	65,707
P	0,961	0,424	1,125	0,894	0,766	1,315	1,443	0,81	1,871
Y	0,862	0,422	0,646	0,779	1,022	1,405	1,249	0,987	1,284
Zr	15,149	15,751	15,364	14,885	15,119	14,103	14,484	15,979	13,929
Hf	0,154	0,167	0,149	0,158	0,225	0,202	0,201	0,197	0,193
Pb	0	0	0	0	0	0,002	0,001	0,009	0
Th	0,023	0,02	0,008	0,002	0,012	0,032	0,023	0,02	0,013
U	0,034	0,018	0,017	0,037	0,031	0,051	0,045	0,039	0,056
Total	100,009	100,024	100	100,008	100	100	100	100	100,003

Sample	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2	9322-2-2
Al	1,176	1,304	1,14	0,849	1,208	1,16	1,205	0,995	0,676
Si	14,188	14,175	14,49	14,725	13,683	14,202	13,722	13,982	14,693
Ca	1,171	1,394	1,118	1,266	1,547	1,449	1,585	1,318	0,689
Fe	0,487	0,555	0,536	0,568	0,568	0,538	0,593	0,603	0,532
S	0,008	0,013	0,039	0,057	0,043	0,036	0,053	0,009	0,022
O	65,956	65,817	65,908	65,986	65,775	65,866	65,775	65,883	66,117
P	1,195	1,148	0,997	1,106	1,17	1,254	1,196	1,003	0,361
Y	0,968	1,088	1,186	0,788	1,168	0,979	1,096	0,88	0,589
Zr	14,562	14,266	14,314	14,387	14,54	14,229	14,49	15,079	16,06
Hf	0,215	0,198	0,23	0,226	0,24	0,22	0,228	0,198	0,199
Pb	0,008	0	0	0,001	0,001	0,008	0	0,002	0
Th	0,017	0,006	0,004	0	0,015	0,011	0,013	0,01	0,02
U	0,05	0,046	0,041	0,043	0,042	0,048	0,048	0,039	0,044
Total	100	100,01	100,001	100,001	100	100	100,004	100	100,001

## Annexe II

Sample	19,9-8	19,9-9	19,9-10	19,9-11	19,9-11	19,9-11	19,9-11	19,9-12
Si	0,925	0,798	0,861	0,923	0,798	0,715	0,867	0,139
P	17,351	16,996	17,001	16,834	16,847	17,108	17,534	17,568
Ca	0,748	0,744	0,769	0,559	0,778	0,715	0,676	0,608
U	0,026	0,037	0,035	0,014	0,026	0,023	0,025	0,067
Y	0,385	0,422	0,454	0,366	0,425	0,479	0,412	0,65
Zr	0,133	0,081	0,065	0,101	0,081	0,09	0,089	0,112
Pb	0,174	0,182	0,167	0,141	0,165	0,181	0,167	0,105
Th	1,398	1,231	1,201	1,169	1,182	1,214	1,232	0,529
La	3,555	3,618	3,542	3,587	3,526	3,636	3,568	3,8
Ce	6,558	6,489	6,464	6,61	6,423	6,521	6,463	6,87
Nd	1,994	2,059	1,984	2,476	2,217	1,928	2,149	1,915
Sm	0,546	0,508	0,534	0,516	0,458	0,453	0,452	0,524
Yb	0	0	0	0	0	0	0,009	0,005
Pr	0,482	0,488	0,538	0,506	0,477	0,488	0,481	0,524
O	67,12	66,878	66,893	66,856	66,844	66,922	67,076	66,911
<b>total</b>	<b>101,395</b>	<b>100,531</b>	<b>100,508</b>	<b>100,658</b>	<b>100,247</b>	<b>100,473</b>	<b>101,2</b>	<b>100,327</b>

Sample	19,9-13	19,9-14	19,9-15	19,9-16	19,9-26	19,9-27	19,9-28	19,9-29
Si	0,089	1,246	0,103	0,295	0,308	0,233	0,381	0,102
P	17,597	16,678	17,429	17,483	17,396	17,649	17,293	17,33
Ca	0,532	0,792	0,485	0,307	0,316	0,055	0,463	0,155
U	0,024	0,009	0,03	0,003	0,002	0	0	0,007
Y	0,486	0,137	0,482	0,269	0,169	0,035	0,189	0,082
Zr	0,039	0,097	0,09	0,047	0,117	0,096	0,085	0,087
Pb	0,059	0,165	0,081	0,062	0,017	0,032	0,099	0,008
Th	0,434	1,474	0,384	0,353	0,452	0,222	0,637	0,1
La	4,208	3,672	4,305	4,304	4,354	4,551	4,378	5,101
Ce	7,181	6,563	7,28	7,339	7,661	8,128	7,544	8,492
Nd	1,933	1,745	2,059	2,128	1,931	2,237	1,853	1,521
Sm	0,45	0,451	0,483	0,448	0,309	0,359	0,379	0,235
Yb	0,008	0,012	0,005	0,001	0,014	0,001	0	0,011
Pr	0,507	0,507	0,505	0,521	0,561	0,571	0,494	0,441
O	66,882	66,874	66,812	66,913	66,958	66,942	66,878	66,749
<b>total</b>	<b>100,429</b>	<b>100,422</b>	<b>100,533</b>	<b>100,473</b>	<b>100,565</b>	<b>101,111</b>	<b>100,673</b>	<b>100,421</b>

Sample	19,9-30	19,9-31	19,9-32	19,9-33	19,9-34	19,9-35	19,9-36	410.5 A-13
Si	0,313	1,214	1,15	0,217	0,999	1,032	1,241	2,025
P	17,38	16,384	16,548	17,502	16,677	16,661	16,264	15,556
Ca	0,113	0,475	0,487	0,257	0,533	0,432	0,446	0,443
U	0	0,011	0,007	0	0,002	0,006	0,006	0,048
Y	0,152	0,049	0,111	0,069	0,113	0,077	0,06	0,626
Zr	0,103	0,053	0,093	0,133	0,095	0,069	0,117	0,096
Pb	0,028	0,132	0,154	0,027	0,149	0,146	0,182	0,21
Th	0,3	1,391	1,352	0,329	1,155	1,097	1,392	1,765
La	4,111	4,253	4,091	7,423	4,444	4,506	4,357	3,287
Ce	7,623	6,652	6,775	3,852	6,881	7,02	7,013	6,148
Nd	2,431	2,086	2,082	2,886	1,906	2,014	1,893	2,101
Sm	0,524	0,45	0,41	0,267	0,317	0,26	0,353	0,608
Yb	0,005	0,013	0,01	0,016	0	0	0,003	0,009
Pr	0,581	0,45	0,468	1,013	0,483	0,443	0,468	0,492
O	66,899	66,868	66,895	66,866	66,88	66,909	66,776	66,679
<b>total</b>	<b>100,563</b>	<b>100,481</b>	<b>100,633</b>	<b>100,857</b>	<b>100,634</b>	<b>100,672</b>	<b>100,571</b>	<b>100,093</b>

## Annexe II

<b>Sample</b>	<b>410.5 A-13</b>	<b>410.5 A-13</b>	<b>410.5 A-13</b>	<b>410.5 A-13</b>	<b>410.5 A-14</b>	<b>410.5 A-15</b>	<b>410.5 A-16</b>	<b>410.5 A-17</b>
Si	1,196	1,2	1,071	0,996	0,78	0,83	0,828	0,273
P	16,348	16,594	16,661	16,836	16,886	17,17	17,176	17,677
Ca	0,405	0,402	0,371	0,335	0,195	0,156	0,142	0,125
U	0,025	0,015	0,031	0,019	0,006	0,022	0,023	0
Y	0,608	0,576	0,609	0,583	0,452	0,742	0,76	0,12
Zr	0,075	0,082	0,028	0,08	0,138	0,133	0,099	0,136
Pb	0,155	0,099	0,083	0,141	0,054	0,106	0,088	0,107
Th	1,056	0,956	1,002	0,902	0,37	0,759	0,812	0,244
La	3,614	3,728	3,663	3,605	4,157	3,839	3,735	4,109
Ce	6,691	6,816	6,859	6,649	7,533	7,012	6,898	7,455
Nd	2,234	2,089	2,16	2,143	1,997	2,001	1,761	2,044
Sm	0,569	0,426	0,558	0,522	0,485	0,535	0,612	0,727
Yb	0,01	0	0	0,013	0	0,007	0	0,012
Pr	0,549	0,521	0,542	0,534	0,477	0,526	0,523	0,571
O	66,773	66,894	66,884	66,929	66,818	66,987	66,989	66,955
<b>total</b>	<b>100,308</b>	<b>100,398</b>	<b>100,522</b>	<b>100,287</b>	<b>100,348</b>	<b>100,825</b>	<b>100,446</b>	<b>100,555</b>

## Annexe II

Sample	02/01/R1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1
Si	0,014	0,427	0,477	0,432	0,434	0,447	0,463	0,503	0,476
P	17,119	16,842	16,729	16,617	16,73	16,666	16,707	16,52	16,66
Ca	0,616	0,519	0,519	0,557	0,549	0,541	0,57	0,571	0,498
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,848	0,867	0,852	0,884	0,887	0,905	0,877	0,87	0,913
La	3,93	3,529	3,512	3,617	3,476	3,616	3,539	3,652	3,557
Ce	7,302	6,959	7,021	7,007	7,055	7,005	6,983	7,035	7,035
Pr	0,579	0,597	0,583	0,578	0,587	0,616	0,596	0,623	0,562
Nd	1,997	2,112	2,194	2,253	2,211	2,203	2,169	2,172	2,152
Sm	0,289	0,405	0,407	0,397	0,407	0,41	0,419	0,411	0,437
Yb	0,026	0,003	0,004	0,015	0,01	0	0,018	0	0,006
Pb	0,106	0,082	0,089	0,098	0,082	0,087	0,101	0,09	0,09
Th	0,3	0,813	0,813	0,82	0,807	0,812	0,789	0,847	0,868
U	0,233	0,053	0,064	0,057	0,057	0,055	0,06	0,058	0,063
Al	0	0	0,004	0	0	0	0,019	0	0
O	66,84	66,891	66,868	66,803	66,852	66,829	66,841	66,784	66,856
<b>total</b>	<b>100,199</b>	<b>100,099</b>	<b>100,136</b>	<b>100,135</b>	<b>100,144</b>	<b>100,192</b>	<b>100,151</b>	<b>100,136</b>	<b>100,173</b>

Sample	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1
Si	0,451	0,454	0,475	0,469	0,442	0,443	0,456	0,474	0,465
P	16,688	16,521	16,642	16,58	16,245	16,798	16,666	16,761	16,6
Ca	0,554	0,57	0,584	0,573	0,544	0,563	0,586	0,556	0,541
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,901	0,946	0,914	0,861	0,953	0,856	0,894	0,844	0,859
La	3,594	3,565	3,604	3,596	3,755	3,527	3,567	3,553	3,589
Ce	6,992	7,069	6,985	6,992	7,241	6,968	6,921	6,994	7,114
Pr	0,586	0,614	0,596	0,617	0,629	0,549	0,602	0,575	0,597
Nd	2,174	2,218	2,208	2,206	2,213	2,148	2,189	2,178	2,153
Sm	0,403	0,41	0,39	0,423	0,415	0,399	0,422	0,418	0,385
Yb	0,002	0,005	0	0,003	0,022	0,011	0,011	0	0
Pb	0,102	0,088	0,088	0,089	0,102	0,098	0,094	0,099	0,093
Th	0,826	0,828	0,83	0,84	0,888	0,825	0,831	0,827	0,874
U	0,062	0,06	0,064	0,068	0,058	0,061	0,062	0,06	0,058
Al	0	0	0	0,025	0	0	0,012	0	0,002
O	66,844	66,766	66,822	66,804	66,676	66,877	66,829	66,876	66,817
<b>total</b>	<b>100,179</b>	<b>100,114</b>	<b>100,202</b>	<b>100,146</b>	<b>100,183</b>	<b>100,123</b>	<b>100,142</b>	<b>100,215</b>	<b>100,147</b>

Sample	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g1	R1-1-3-g2
Si	0,485	0,5	0,487	0,465	0,467	0,458	0,419	0,472	0,472
P	16,608	16,516	16,39	16,817	16,609	16,45	16,222	16,545	16,687
Ca	0,558	0,598	0,584	0,564	0,595	0,554	0,673	0,569	0,517
Fe	0	0	0	0	0	0	0,488	0	0
Y	0,861	0,88	0,944	0,836	0,831	0,842	0,699	0,871	0,862
La	3,595	3,609	3,649	3,54	3,639	3,645	3,748	3,618	3,559
Ce	6,997	6,967	7,124	6,931	7,036	7,176	6,997	7,065	6,929
Pr	0,581	0,621	0,584	0,573	0,593	0,61	0,637	0,604	0,621
Nd	2,22	2,203	2,203	2,131	2,169	2,218	2,27	2,201	2,26
Sm	0,413	0,434	0,437	0,389	0,395	0,397	0,395	0,404	0,425
Yb	0,01	0,006	0	0,014	0,006	0	0	0,025	0
Pb	0,096	0,097	0,108	0,081	0,119	0,104	0,075	0,096	0,066
Th	0,856	0,858	0,861	0,814	0,829	0,808	0,8	0,845	0,811
U	0,068	0,064	0,065	0,062	0,066	0,064	0,053	0,067	0,061
Al	0	0	0	0	0	0	0,037	0	0
O	66,82	66,774	66,721	66,887	66,796	66,722	66,496	66,789	66,843
<b>total</b>	<b>100,168</b>	<b>100,127</b>	<b>100,157</b>	<b>100,104</b>	<b>100,15</b>	<b>100,048</b>	<b>100,009</b>	<b>100,171</b>	<b>100,113</b>



## Annexe II

Sample	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2
Si	0,439	0,446	0,475	0,452	0,466	0,46	0,429	0,442	0,41
P	16,669	16,668	16,595	16,738	16,678	16,634	16,706	16,619	16,572
Ca	0,546	0,49	0,488	0,535	0,571	0,554	0,513	0,541	0,572
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,875	0,883	0,876	0,835	0,881	0,862	0,883	0,9	0,916
La	3,599	3,633	3,575	3,527	3,574	3,535	3,592	3,579	3,551
Ce	7,009	6,999	7,109	6,952	6,895	6,979	6,901	6,976	7,076
Pr	0,627	0,627	0,596	0,64	0,611	0,607	0,617	0,613	0,627
Nd	2,224	2,288	2,214	2,263	2,217	2,256	2,229	2,291	2,274
Sm	0,4	0,407	0,452	0,381	0,404	0,415	0,421	0,375	0,415
Yb	0,016	0	0,005	0,014	0,001	0,015	0	0,013	0,006
Pb	0,084	0,074	0,085	0,09	0,099	0,085	0,094	0,09	0,085
Th	0,782	0,793	0,833	0,805	0,818	0,857	0,813	0,833	0,812
U	0,054	0,061	0,057	0,059	0,059	0,058	0,062	0,058	0,059
Al	0	0	0	0	0,007	0	0,015	0	0
O	66,823	66,842	66,821	66,856	66,828	66,827	66,844	66,805	66,779
<b>total</b>	<b>100,147</b>	<b>100,211</b>	<b>100,181</b>	<b>100,147</b>	<b>100,109</b>	<b>100,144</b>	<b>100,119</b>	<b>100,135</b>	<b>100,154</b>

Sample	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2
Si	0,445	0,421	0,441	0,444	0,42	0,445	0,439	0,422	0,466
P	16,93	16,732	16,565	16,495	16,485	16,914	16,684	16,519	16,483
Ca	0,518	0,547	0,569	0,539	0,551	0,518	0,526	0,538	0,545
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,827	0,852	0,879	0,923	0,904	0,859	0,895	0,914	0,905
La	3,505	3,569	3,587	3,592	3,64	3,489	3,546	3,604	3,632
Ce	6,848	6,843	7,073	7,137	7,063	6,854	7,016	7,168	7,016
Pr	0,597	0,613	0,62	0,62	0,636	0,581	0,631	0,6	0,608
Nd	2,178	2,244	2,254	2,243	2,283	2,224	2,275	2,248	2,295
Sm	0,404	0,42	0,418	0,412	0,392	0,416	0,387	0,405	0,407
Yb	0	0,005	0	0	0,008	0	0	0,001	0
Pb	0,082	0,097	0,089	0,098	0,092	0,085	0,097	0,078	0,091
Th	0,792	0,821	0,819	0,831	0,849	0,812	0,784	0,8	0,866
U	0,063	0,07	0,054	0,066	0,071	0,065	0,053	0,064	0,057
Al	0,007	0,015	0	0	0	0	0	0,006	0,007
O	66,939	66,845	66,779	66,766	66,763	66,934	66,827	66,768	66,77
<b>total</b>	<b>100,135</b>	<b>100,094</b>	<b>100,147</b>	<b>100,166</b>	<b>100,157</b>	<b>100,196</b>	<b>100,16</b>	<b>100,135</b>	<b>100,148</b>

Sample	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g2	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3
Si	0,469	0,432	0,435	0,409	0,45	0,46	0,455	0,445	0,458
P	16,361	16,63	16,476	15,916	16,881	16,803	16,591	16,636	16,428
Ca	0,566	0,561	0,518	1,434	0,772	0,529	0,582	0,533	0,515
Fe	0	0	0	0,136	0	0	0	0	0
Y	0,94	0,92	0,894	0,819	0,706	0,824	0,87	0,844	0,785
La	3,61	3,561	3,607	3,568	3,526	3,519	3,52	3,636	3,767
Ce	7,057	6,951	7,062	7,024	6,841	6,962	7,082	7,096	7,279
Pr	0,631	0,648	0,616	0,607	0,552	0,603	0,594	0,587	0,599
Nd	2,327	2,276	2,351	2,289	2,098	2,203	2,189	2,199	2,191
Sm	0,412	0,407	0,436	0,412	0,409	0,395	0,393	0,409	0,373
Yb	0,011	0,022	0,014	0,026	0,017	0,015	0,007	0,016	0,006
Pb	0,098	0,08	0,09	0,073	0,072	0,09	0,089	0,091	0,079
Th	0,856	0,792	0,796	0,942	0,805	0,794	0,832	0,818	0,79
U	0,064	0,071	0,071	0,049	0,051	0,058	0,057	0,066	0,056
Al	0	0	0	0	0,022	0,002	0	0	0,015
O	66,712	66,814	66,75	66,318	66,857	66,888	66,771	66,823	66,726
<b>total</b>	<b>100,114</b>	<b>100,165</b>	<b>100,116</b>	<b>100,022</b>	<b>100,059</b>	<b>100,145</b>	<b>100,032</b>	<b>100,199</b>	<b>100,067</b>

Annexe II

Sample	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3
Si	0,466	0,432	0,446	0,453	0,474	0,473	0,532	0,443	0,43
P	16,502	16,5	16,542	16,586	16,453	16,755	16,001	16,543	16,516
Ca	0,559	0,531	0,518	0,54	0,499	0,523	0,671	0,46	0,42
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,802	0,856	0,894	0,885	0,787	0,794	0,928	0,803	0,707
La	3,68	3,659	3,587	3,702	3,716	3,585	3,606	3,679	3,803
Ce	7,154	7,079	7,112	7,056	7,315	6,928	7,533	7,159	7,338
Pr	0,581	0,617	0,606	0,604	0,633	0,647	0,612	0,601	0,616
Nd	2,188	2,236	2,235	2,175	2,162	2,231	2,338	2,251	2,332
Sm	0,389	0,416	0,441	0,422	0,363	0,418	0,446	0,433	0,445
Yb	0,01	0,005	0,005	0,003	0,007	0,01	0,002	0	0
Pb	0,09	0,095	0,088	0,096	0,082	0,084	0,1	0,085	0,074
Th	0,846	0,825	0,793	0,814	0,822	0,794	0,809	0,801	0,705
U	0,058	0,064	0,064	0,067	0,059	0,057	0,061	0,043	0,028
Al	0,01	0,033	0,004	0	0,02	0	0	0	0
O	66,765	66,76	66,778	66,799	66,768	66,866	66,557	66,781	66,767
<b>total</b>	<b>100,1</b>	<b>100,108</b>	<b>100,113</b>	<b>100,202</b>	<b>100,16</b>	<b>100,165</b>	<b>100,196</b>	<b>100,082</b>	<b>100,181</b>

Sample	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-3-g3	R1-1-4
Si	0,48	0,5	0,527	0,44	0,445	0,47	0,52	0,585	0,544
P	16,088	16,481	16,311	16,559	16,654	16,425	16,34	16,267	16,391
Ca	0,556	0,588	0,419	0,428	0,591	0,552	0,554	0,332	0,315
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,985	0,916	0,436	0,649	0,863	0,957	0,945	0,209	0,413
La	3,688	3,543	3,713	3,774	3,578	3,589	3,562	3,812	3,811
Ce	7,266	7,058	7,562	7,25	6,935	7,017	7,028	7,633	7,596
Pr	0,639	0,607	0,651	0,655	0,605	0,613	0,632	0,649	0,681
Nd	2,362	2,275	2,404	2,381	2,208	2,337	2,316	2,487	2,585
Sm	0,452	0,429	0,453	0,432	0,423	0,423	0,417	0,453	0,388
Yb	0,004	0,011	0	0,005	0,001	0	0,018	0,011	0,001
Pb	0,099	0,102	0,092	0,058	0,096	0,096	0,1	0,077	0,059
Th	0,875	0,805	0,836	0,719	0,842	0,86	0,872	0,834	0,598
U	0,068	0,074	0,033	0,039	0,061	0,062	0,057	0,014	0,033
Al	0	0	0	0	0,004	0	0,023	0,012	0
O	66,607	66,748	66,725	66,789	66,819	66,747	66,714	66,734	66,746
<b>total</b>	<b>100,169</b>	<b>100,137</b>	<b>100,162</b>	<b>100,178</b>	<b>100,125</b>	<b>100,148</b>	<b>100,098</b>	<b>100,109</b>	<b>100,161</b>

Sample	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4
Si	0,526	0,553	0,563	0,516	0,585	0,585	0,521	0,529	0,505
P	16,374	16,212	16,314	16,247	16,266	16,334	16,425	16,312	16,224
Ca	0,181	0,199	0,184	0,202	0,224	0,211	0,203	0,228	0,206
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,467	0,489	0,475	0,472	0,462	0,466	0,445	0,45	0,485
La	3,816	3,853	3,84	3,785	3,833	3,779	3,763	3,84	3,901
Ce	7,656	7,67	7,642	7,826	7,548	7,538	7,586	7,61	7,64
Pr	0,713	0,724	0,687	0,707	0,711	0,712	0,678	0,705	0,695
Nd	2,624	2,628	2,585	2,604	2,568	2,645	2,628	2,578	2,659
Sm	0,399	0,434	0,412	0,409	0,431	0,428	0,396	0,407	0,431
Yb	0	0,01	0,011	0	0,021	0	0,017	0,024	0,004
Pb	0,069	0,069	0,079	0,048	0,06	0,065	0,065	0,065	0,064
Th	0,597	0,611	0,563	0,608	0,642	0,613	0,602	0,601	0,591
U	0,036	0,034	0,043	0,041	0,045	0,045	0,04	0,038	0,041
Al	0	0	0	0	0,006	0	0	0,014	0
O	66,76	66,701	66,73	66,709	66,731	66,752	66,776	66,725	66,685
<b>total</b>	<b>100,218</b>	<b>100,187</b>	<b>100,128</b>	<b>100,174</b>	<b>100,133</b>	<b>100,173</b>	<b>100,145</b>	<b>100,126</b>	<b>100,131</b>

## Annexe II

Sample	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4
Si	0,584	0,566	0,569	0,559	0,513	0,581	0,598	0,582	0,536
P	16,322	16,326	16,672	16,468	16,268	16,395	16,347	16,32	16,386
Ca	0,206	0,185	0,188	0,176	0,202	0,201	0,196	0,238	0,195
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,48	0,468	0,444	0,472	0,505	0,459	0,455	0,474	0,486
La	3,736	3,764	3,696	3,764	3,864	3,804	3,787	3,868	3,811
Ce	7,579	7,708	7,413	7,556	7,667	7,576	7,633	7,686	7,538
Pr	0,716	0,693	0,677	0,656	0,702	0,69	0,681	0,67	0,707
Nd	2,587	2,575	2,578	2,609	2,627	2,595	2,556	2,546	2,6
Sm	0,389	0,415	0,383	0,412	0,417	0,428	0,437	0,395	0,418
Yb	0	0,002	0	0,008	0	0,012	0,007	0,012	0,021
Pb	0,067	0,06	0,074	0,06	0,068	0,062	0,073	0,059	0,06
Th	0,65	0,605	0,579	0,591	0,545	0,607	0,595	0,558	0,575
U	0,053	0,048	0,038	0,04	0,038	0,043	0,046	0,039	0,033
Al	0,028	0	0	0	0,03	0	0	0	0,01
O	66,761	66,753	66,885	66,81	66,698	66,792	66,76	66,726	66,759
<b>total</b>	<b>100,158</b>	<b>100,168</b>	<b>100,196</b>	<b>100,181</b>	<b>100,144</b>	<b>100,245</b>	<b>100,171</b>	<b>100,173</b>	<b>100,135</b>

Sample	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4
Si	0,535	0,64	0,621	0,576	0,536	0,509	0,487	0,47	0,425
P	16,395	15,98	16,484	16,369	16,427	16,344	16,531	16,561	16,505
Ca	0,204	0,266	0,19	0,222	0,212	0,22	0,214	0,194	0,213
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,453	0,425	0,438	0,462	0,495	0,469	0,383	0,427	0,383
La	3,753	3,794	3,735	3,751	3,741	3,743	4,005	3,975	4,08
Ce	7,631	8,094	7,512	7,607	7,685	7,758	7,7	7,688	7,806
Pr	0,684	0,678	0,683	0,695	0,671	0,721	0,659	0,673	0,681
Nd	2,604	2,52	2,562	2,543	2,51	2,559	2,442	2,416	2,407
Sm	0,431	0,399	0,426	0,408	0,418	0,442	0,369	0,374	0,376
Yb	0,005	0,012	0	0,023	0,004	0,004	0	0,014	0
Pb	0,064	0,059	0,072	0,066	0,05	0,058	0,051	0,045	0,059
Th	0,559	0,625	0,634	0,624	0,579	0,56	0,481	0,497	0,479
U	0,038	0,042	0,041	0,039	0,037	0,034	0,036	0,035	0,041
Al	0,002	0,008	0	0	0	0	0	0	0
O	66,753	66,621	66,829	66,765	66,775	66,73	66,781	66,799	66,77
<b>total</b>	<b>100,111</b>	<b>100,163</b>	<b>100,227</b>	<b>100,15</b>	<b>100,14</b>	<b>100,151</b>	<b>100,139</b>	<b>100,168</b>	<b>100,225</b>

Sample	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4
Si	0,453	0,465	0,471	0,422	0,492	0,461	0,443	0,515	0,498
P	16,237	16,555	16,44	16,576	16,732	16,57	16,632	16,392	16,495
Ca	0,223	0,213	0,211	0,194	0,18	0,201	0,197	0,173	0,233
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,422	0,386	0,397	0,391	0,376	0,425	0,432	0,428	0,397
La	4,074	3,983	4,024	4,056	3,921	3,986	3,959	4,036	4,061
Ce	7,924	7,777	7,791	7,685	7,642	7,681	7,688	7,799	7,693
Pr	0,655	0,633	0,656	0,661	0,639	0,686	0,66	0,663	0,679
Nd	2,488	2,378	2,488	2,424	2,36	2,415	2,425	2,421	2,379
Sm	0,396	0,389	0,39	0,387	0,352	0,373	0,367	0,4	0,395
Yb	0,015	0,013	0,023	0,013	0,009	0	0,005	0,009	0
Pb	0,05	0,053	0,061	0,052	0,042	0,055	0,057	0,047	0,057
Th	0,497	0,484	0,428	0,468	0,49	0,471	0,463	0,502	0,482
U	0,032	0,031	0,037	0,035	0,036	0,028	0,037	0,036	0,035
Al	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O	66,661	66,787	66,739	66,796	66,875	66,795	66,817	66,75	66,768
<b>total</b>	<b>100,127</b>	<b>100,147</b>	<b>100,156</b>	<b>100,16</b>	<b>100,146</b>	<b>100,147</b>	<b>100,182</b>	<b>100,171</b>	<b>100,172</b>

Annexe II

Sample	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4
Si	0,495	0,518	0,537	0,542	0,58	0,564	0,547	0,55	0,729
P	16,43	16,42	16,49	16,334	16,968	16,555	16,39	16,296	17,888
Ca	0,211	0,232	0,248	0,211	0,235	0,203	0,184	0,204	0,203
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,445	0,418	0,426	0,417	0,448	0,476	0,448	0,482	0,32
La	3,993	3,987	3,962	4,022	3,52	3,732	3,774	3,783	3,143
Ce	7,755	7,829	7,651	7,767	7,151	7,472	7,604	7,773	6,435
Pr	0,678	0,663	0,665	0,667	0,677	0,687	0,688	0,682	0,645
Nd	2,416	2,376	2,404	2,418	2,5	2,492	2,564	2,597	2,336
Sm	0,352	0,383	0,36	0,394	0,386	0,383	0,422	0,389	0,411
Yb	0,026	0,002	0,014	0	0,01	0,003	0,014	0,012	0,015
Pb	0,047	0,053	0,059	0,07	0,077	0,068	0,071	0,054	0,066
Th	0,495	0,522	0,55	0,516	0,541	0,637	0,62	0,581	0,521
U	0,04	0,04	0,039	0,041	0,058	0,047	0,045	0,039	0,051
Al	0,005	0	0	0	0	0	0,017	0	0
O	66,754	66,757	66,798	66,716	66,981	66,843	66,782	66,729	67,39
<b>total</b>	<b>100,142</b>	<b>100,2</b>	<b>100,203</b>	<b>100,115</b>	<b>100,132</b>	<b>100,162</b>	<b>100,17</b>	<b>100,171</b>	<b>100,153</b>

Sample	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4
Si	0,597	0,569	0,57	0,757	0,595	0,586	0,562	0,688	0,577
P	16,574	16,443	16,254	17,822	16,439	16,347	16,442	16,657	16,498
Ca	0,19	0,228	0,203	0,213	0,227	0,201	0,216	0,227	0,189
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,454	0,464	0,474	0,317	0,458	0,473	0,451	0,475	0,456
La	3,709	3,723	3,786	3,22	3,703	3,779	3,729	3,553	3,727
Ce	7,465	7,595	7,689	6,548	7,535	7,641	7,611	7,246	7,588
Pr	0,661	0,662	0,686	0,589	0,705	0,693	0,682	0,673	0,68
Nd	2,535	2,547	2,577	2,259	2,549	2,554	2,547	2,486	2,516
Sm	0,412	0,392	0,407	0,394	0,41	0,428	0,43	0,396	0,404
Yb	0,016	0,016	0	0,004	0,003	0,006	0,013	0,008	0,01
Pb	0,06	0,05	0,068	0,064	0,058	0,084	0,055	0,068	0,056
Th	0,638	0,617	0,609	0,528	0,618	0,599	0,599	0,676	0,607
U	0,043	0,047	0,044	0,048	0,035	0,04	0,036	0,056	0,039
Al	0	0	0,047	0,007	0,005	0	0	0,016	0
O	66,869	66,797	66,717	67,368	66,795	66,757	66,79	66,916	66,817
<b>total</b>	<b>100,223</b>	<b>100,15</b>	<b>100,131</b>	<b>100,138</b>	<b>100,135</b>	<b>100,188</b>	<b>100,163</b>	<b>100,141</b>	<b>100,164</b>

Sample	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4	R1-1-4
Si	0,575	0,596	0,242	0,451	0,542	0,609	0,526	0,528	0,611
P	16,443	16,409	16,634	16,615	16,42	16,559	16,581	16,428	16,299
Ca	0,193	0,214	0,199	0,186	0,228	0,226	0,232	0,201	0,206
Fe	0	0	0,001	0	0	0	0	0	0
Y	0,444	0,447	0	0,41	0,419	0,488	0,408	0,441	0,429
La	3,724	3,735	5,036	3,915	4,025	3,615	3,928	3,96	3,964
Ce	7,675	7,665	8,206	7,777	7,705	7,475	7,6	7,682	7,71
Pr	0,665	0,68	0,685	0,66	0,686	0,681	0,69	0,654	0,689
Nd	2,539	2,488	2,052	2,389	2,454	2,535	2,411	2,488	2,434
Sm	0,4	0,431	0,195	0,415	0,357	0,398	0,374	0,38	0,374
Yb	0,007	0	0	0	0	0,003	0	0,001	0,016
Pb	0,071	0,054	0	0,055	0,066	0,075	0,057	0,055	0,058
Th	0,6	0,595	0,099	0,43	0,496	0,624	0,497	0,52	0,558
U	0,036	0,041	0	0,04	0,037	0,051	0,037	0,035	0,04
Al	0	0	0,015	0	0	0	0	0,005	0
O	66,792	66,779	66,682	66,802	66,751	66,853	66,811	66,765	66,732
<b>total</b>	<b>100,164</b>	<b>100,134</b>	<b>100,046</b>	<b>100,145</b>	<b>100,186</b>	<b>100,192</b>	<b>100,152</b>	<b>100,143</b>	<b>100,12</b>

Annexe II

Sample	R1-1-4	R1-1-4	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2
Si	0,532	0,525	0,744	0,657	0,675	2,03	0,964	0,643	0,593
P	16,7	16,595	16,437	16,444	16,378	15,433	16,89	16,03	16,383
Ca	0,211	0,204	0,633	0,635	0,541	0,535	0,785	1,467	1,127
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,381	0,408	1,128	0,98	0,941	0,3	0,916	0,81	0,705
La	3,892	3,952	3,227	3,395	3,507	3,494	2,91	3,558	3,543
Ce	7,53	7,495	6,499	6,819	7,038	6,963	5,996	6,525	6,876
Pr	0,661	0,674	0,577	0,592	0,584	0,558	0,546	0,594	0,593
Nd	2,419	2,406	2,293	2,261	2,18	2,081	2,232	2,348	2,204
Sm	0,362	0,385	0,519	0,452	0,422	0,385	0,577	0,496	0,477
Yb	0,01	0,023	0,006	0,004	0,002	0,006	0,011	0	0
Pb	0,057	0,06	0,143	0,126	0,117	0,053	0,163	0,15	0,141
Th	0,502	0,535	0,999	0,917	0,862	0,611	1,04	0,92	0,827
U	0,042	0,043	0,136	0,105	0,117	0,041	0,134	0,096	0,078
Al	0	0,005	0	0	0	0,996	0	0,041	0
O	66,872	66,835	66,818	66,786	66,778	66,612	67,018	66,445	66,633
<b>total</b>	<b>100,171</b>	<b>100,145</b>	<b>100,159</b>	<b>100,173</b>	<b>100,142</b>	<b>100,098</b>	<b>100,182</b>	<b>100,123</b>	<b>100,18</b>

Sample	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2
Si	0,503	0,606	1,176	4,008	1,268	1,074	0,738	0,729	0,608
P	16,764	16,452	16,107	14,126	15,987	16,118	16,3	16,062	16,344
Ca	0,399	0,464	0,491	2,427	0,789	0,772	0,556	0,591	0,668
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,717	0,773	0,628	0,847	1,105	1,157	0,957	1,035	0,868
La	3,643	3,661	3,618	1,898	2,852	2,953	3,326	3,413	3,549
Ce	7,202	7,299	7,115	4,594	5,876	6,133	6,829	7,001	7,029
Pr	0,598	0,588	0,618	0,365	0,536	0,544	0,608	0,606	0,598
Nd	2,23	2,227	2,177	1,479	2,26	2,252	2,313	2,264	2,246
Sm	0,414	0,4	0,41	0,447	0,608	0,571	0,551	0,503	0,464
Yb	0	0,006	0,015	0	0,011	0,02	0,009	0	0,004
Pb	0,069	0,077	0,094	0,14	0,201	0,181	0,125	0,125	0,11
Th	0,66	0,751	0,771	2,824	1,659	1,399	0,995	1,035	0,784
U	0,066	0,074	0,052	0,212	0,151	0,148	0,097	0,117	0,1
Al	0,003	0	0,12	0,09	0	0	0	0	0,045
O	66,888	66,782	66,755	66,546	66,84	66,805	66,78	66,682	66,705
<b>total</b>	<b>100,156</b>	<b>100,16</b>	<b>100,147</b>	<b>100,003</b>	<b>100,143</b>	<b>100,127</b>	<b>100,184</b>	<b>100,163</b>	<b>100,122</b>

Sample	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2
Si	1,248	1,322	1,142	1,013	0,829	0,824	1,913	1,313	1,114
P	16,415	15,928	15,905	16,155	15,982	16,395	15,377	15,839	16,016
Ca	0,956	0,871	0,842	0,784	0,785	0,686	0,894	0,834	0,845
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,585	1,134	1,134	1,17	1,197	1,101	0,733	1,135	1,182
La	2,82	2,847	3,056	3,065	3,198	3,22	2,969	2,865	2,98
Ce	5,812	5,934	6,24	6,153	6,476	6,524	5,809	5,928	6,123
Pr	0,526	0,528	0,534	0,561	0,571	0,541	0,541	0,555	0,559
Nd	2,216	2,239	2,231	2,183	2,218	2,171	2,147	2,287	2,236
Sm	0,649	0,597	0,548	0,58	0,537	0,479	0,551	0,601	0,616
Yb	0,003	0,003	0,006	0,02	0,015	0,004	0	0	0,004
Pb	0,191	0,187	0,161	0,161	0,143	0,14	0,247	0,185	0,152
Th	1,653	1,642	1,494	1,336	1,294	1,096	2,041	1,667	1,4
U	0,089	0,139	0,131	0,134	0,15	0,135	0,163	0,152	0,149
Al	0,001	0	0	0,026	0,046	0	0	0,001	0,002
O	66,959	66,809	66,737	66,797	66,688	66,831	66,775	66,787	66,769
<b>total</b>	<b>100,123</b>	<b>100,18</b>	<b>100,161</b>	<b>100,138</b>	<b>100,129</b>	<b>100,147</b>	<b>100,16</b>	<b>100,149</b>	<b>100,147</b>

## Annexe II

Sample	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2
Si	0,964	0,926	0,832	1,52	1,551	1,438	1,036	0,891	0,838
P	16,273	16,422	16,057	15,63	15,6	15,564	16,222	16,274	15,979
Ca	0,759	0,69	0,734	0,8	0,787	0,787	0,738	0,776	0,696
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	1,156	1,119	1,228	0,686	0,761	0,866	1,149	1,141	1,172
La	3,04	3,117	3,299	3,144	3,128	3,097	3,037	3,119	3,31
Ce	6,193	6,306	6,635	6,173	6,269	6,428	6,211	6,354	6,814
Pr	0,552	0,558	0,558	0,574	0,549	0,546	0,556	0,564	0,579
Nd	2,207	2,121	2,184	2,17	2,155	2,18	2,211	2,231	2,2
Sm	0,527	0,513	0,518	0,537	0,522	0,509	0,557	0,514	0,489
Yb	0	0,011	0,001	0,006	0,017	0,01	0,01	0,014	0,016
Pb	0,167	0,137	0,128	0,194	0,206	0,175	0,185	0,157	0,125
Th	1,361	1,191	1,114	1,769	1,702	1,646	1,272	1,223	1,121
U	0,151	0,133	0,126	0,135	0,14	0,143	0,139	0,144	0,13
Al	0	0	0,002	0,023	0,015	0,021	0	0	0
O	66,848	66,873	66,685	66,763	66,751	66,701	66,819	66,804	66,661
<b>total</b>	<b>100,198</b>	<b>100,117</b>	<b>100,101</b>	<b>100,124</b>	<b>100,153</b>	<b>100,111</b>	<b>100,142</b>	<b>100,206</b>	<b>100,13</b>

Sample	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2
Si	1,496	1,009	0,819	2,871	0,878	0,958	0,93	0,772	0,923
P	15,744	16,498	16,328	15,044	16,198	16,029	16,097	16,415	16,037
Ca	0,849	0,573	0,586	0,444	0,629	0,788	0,677	0,616	1,112
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,694	0,714	1,021	0,724	0,8	0,81	0,804	1,132	0,752
La	3,551	3,387	3,404	3,425	3,525	3,476	3,628	3,276	3,373
Ce	6,85	6,703	6,838	6,863	6,871	6,703	6,347	6,575	6,554
Pr	0,574	0,548	0,577	0,572	0,561	0,561	0,629	0,581	0,571
Nd	2,046	2,006	2,113	2,158	2,092	2,081	2,258	2,212	2,078
Sm	0,428	0,401	0,418	0,394	0,424	0,454	0,441	0,486	0,408
Yb	0,004	0,024	0,018	0,012	0,003	0,012	0	0,019	0,019
Pb	0,116	0,12	0,131	0,086	0,145	0,16	0,17	0,143	0,173
Th	1,025	1,099	0,931	0,732	1,13	1,284	1,262	1,039	1,317
U	0,083	0,108	0,121	0,047	0,111	0,122	0,124	0,132	0,116
Al	0,008	0	0,04	0,056	0	0	0,004	0	0,02
O	66,65	66,927	66,789	66,658	66,771	66,722	66,752	66,836	66,65
<b>total</b>	<b>100,118</b>	<b>100,117</b>	<b>100,134</b>	<b>100,086</b>	<b>100,138</b>	<b>100,16</b>	<b>100,123</b>	<b>100,234</b>	<b>100,103</b>

Sample	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2
Si	1,033	1,12	1,113	0,99	0,819	1,003	0,904	1,585	2,041
P	16,022	15,919	14,858	16,498	16,501	16,156	15,976	15,673	14,109
Ca	0,687	0,75	1,341	0,57	0,6	0,617	0,736	1,009	2,114
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,83	0,892	1,077	0,678	0,987	0,794	0,796	1,017	0,677
La	3,376	3,335	3,438	3,517	3,411	3,447	3,754	2,747	3,049
Ce	6,668	6,541	6,373	6,811	6,659	6,793	6,21	5,667	5,8
Pr	0,508	0,561	0,59	0,551	0,576	0,557	0,669	0,525	0,486
Nd	2,12	2,174	2,478	2,012	2,142	2,049	2,37	2,172	2,006
Sm	0,436	0,424	0,517	0,374	0,413	0,427	0,48	0,555	0,52
Yb	0	0	0,004	0,004	0,01	0,005	0,004	0,016	0,018
Pb	0,156	0,179	0,257	0,126	0,12	0,142	0,143	0,211	0,219
Th	1,388	1,419	1,682	1,07	0,894	1,219	1,286	2,023	2,795
U	0,13	0,14	0,156	0,097	0,117	0,114	0,124	0,149	0,121
Al	0	0	0	0	0,037	0	0	0	0
O	66,77	66,745	66,234	66,924	66,849	66,801	66,705	66,801	66,197
<b>total</b>	<b>100,124</b>	<b>100,199</b>	<b>100,118</b>	<b>100,222</b>	<b>100,135</b>	<b>100,124</b>	<b>100,157</b>	<b>100,15</b>	<b>100,152</b>

Annexe II

Sample	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R1-3-2	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1
Si	1,177	1,34	1,119	0,776	0,684	0,526	0,645	0,628	0,714
P	16,217	15,805	15,915	16,442	16,642	16,365	16,362	16,258	16,247
Ca	0,795	0,908	0,732	0,603	0,265	0,205	0,271	0,231	0,259
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,971	1,022	0,911	1,073	0,292	0,354	0,322	0,386	0,389
La	2,867	2,935	3,253	3,31	4,06	4,237	4,071	4,043	4,042
Ce	5,919	5,983	6,547	6,697	7,5	7,846	7,625	7,7	7,677
Pr	0,547	0,529	0,562	0,583	0,618	0,647	0,649	0,644	0,636
Nd	2,245	2,262	2,135	2,227	2,19	2,253	2,224	2,272	2,237
Sm	0,588	0,589	0,522	0,485	0,285	0,338	0,303	0,327	0,298
Yb	0,012	0,001	0,014	0,005	0,011	0,006	0,001	0,004	0,004
Pb	0,211	0,187	0,184	0,129	0,063	0,052	0,072	0,085	0,088
Th	1,522	1,698	1,336	0,947	0,562	0,504	0,728	0,752	0,733
U	0,15	0,143	0,141	0,123	0,037	0,037	0,03	0,05	0,049
Al	0,008	0	0,016	0	0,033	0,024	0,033	0	0
O	66,877	66,766	66,725	66,826	66,87	66,733	66,78	66,752	66,753
<b>total</b>	<b>100,106</b>	<b>100,168</b>	<b>100,112</b>	<b>100,226</b>	<b>100,112</b>	<b>100,127</b>	<b>100,116</b>	<b>100,132</b>	<b>100,126</b>

Sample	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1
Si	0,794	0,748	0,515	0,494	0,628	0,588	0,758	0,703	0,49
P	16,029	16,002	16,485	16,49	15,984	15,881	16,551	16,126	16,302
Ca	0,273	0,369	0,21	0,23	0,267	0,294	0,282	0,331	0,225
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,391	0,36	0,295	0,314	0,367	0,378	0,314	0,335	0,284
La	4,087	4,026	4,221	4,204	4,175	4,26	3,876	4,019	4,351
Ce	7,664	7,749	7,848	7,914	8,007	8,007	7,306	7,655	7,976
Pr	0,63	0,627	0,636	0,631	0,667	0,649	0,627	0,652	0,678
Nd	2,257	2,203	2,254	2,245	2,267	2,327	2,182	2,231	2,237
Sm	0,295	0,272	0,296	0,313	0,289	0,322	0,297	0,291	0,287
Yb	0	0	0,002	0,002	0	0	0,01	0	0,01
Pb	0,082	0,098	0,054	0,057	0,078	0,089	0,082	0,082	0,047
Th	0,847	0,891	0,484	0,461	0,704	0,718	0,729	0,857	0,432
U	0,054	0,056	0,036	0,032	0,054	0,045	0,05	0,083	0,034
Al	0,001	0,014	0,032	0	0,004	0	0,17	0,038	0,095
O	66,699	66,661	66,777	66,762	66,623	66,568	66,878	66,719	66,684
<b>total</b>	<b>100,103</b>	<b>100,076</b>	<b>100,145</b>	<b>100,149</b>	<b>100,114</b>	<b>100,126</b>	<b>100,112</b>	<b>100,122</b>	<b>100,132</b>

Sample	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1
Si	0,46	0,626	0,686	0,77	0,735	0,712	0,395	0,475	0,589
P	15,998	16,093	16,154	16,407	16,031	16,171	16,343	16,311	16,142
Ca	0,213	0,305	0,281	0,29	0,285	0,282	0,188	0,169	0,262
Fe	0	0	0	0	0	0,269	0	0	0
Y	0,302	0,366	0,353	0,317	0,402	0,361	0,269	0,295	0,367
La	4,183	4,133	4,127	3,899	3,999	3,941	4,316	4,316	4,076
Ce	7,8	7,877	7,747	7,546	7,753	7,538	8,137	8,023	7,86
Pr	0,635	0,62	0,622	0,621	0,646	0,601	0,652	0,63	0,628
Nd	2,241	2,261	2,198	2,21	2,253	2,222	2,236	2,28	2,26
Sm	0,27	0,303	0,292	0,306	0,322	0,296	0,296	0,3	0,327
Yb	0	0	0,019	0,004	0	0,003	0,022	0	0,011
Pb	0,046	0,089	0,082	0,087	0,09	0,08	0,037	0,059	0,096
Th	0,513	0,753	0,75	0,757	0,868	0,8	0,427	0,509	0,725
U	0,036	0,053	0,046	0,058	0,058	0,034	0,027	0,038	0,054
Al	0,839	0	0,062	0,018	0	0,038	0,128	0,026	0,003
O	66,566	66,671	66,712	66,828	66,695	66,651	66,697	66,705	66,673
<b>total</b>	<b>100,102</b>	<b>100,15</b>	<b>100,131</b>	<b>100,118</b>	<b>100,137</b>	<b>99,999</b>	<b>100,17</b>	<b>100,136</b>	<b>100,073</b>

## Annexe II

Sample	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1
Si	0,816	0,773	0,535	0,407	0,431	0,489	0,601	0,719	0,738
P	15,871	16,126	16,41	16,376	16,456	16,288	16,088	16,119	16,028
Ca	0,29	0,279	0,193	0,124	0,189	0,227	0,285	0,277	0,324
Fe	0,148	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,345	0,336	0,395	0,245	0,268	0,339	0,333	0,393	0,374
La	4,027	4,058	4,073	4,374	4,201	4,232	4,082	4,106	4,008
Ce	7,755	7,541	7,659	7,915	8,083	7,98	7,951	7,771	7,631
Pr	0,635	0,601	0,622	0,639	0,608	0,627	0,651	0,615	0,625
Nd	2,223	2,216	2,335	2,388	2,278	2,322	2,301	2,222	2,244
Sm	0,289	0,307	0,326	0,333	0,287	0,319	0,287	0,333	0,328
Yb	0,005	0,011	0,02	0	0,019	0,005	0,001	0	0,013
Pb	0,067	0,09	0,051	0,046	0,039	0,075	0,068	0,087	0,095
Th	0,731	0,844	0,61	0,502	0,434	0,521	0,752	0,745	0,87
U	0,052	0,052	0,016	0,01	0,032	0,044	0,052	0,048	0,05
Al	0,176	0,144	0,064	0,048	0,033	0	0,011	0,001	0,117
O	66,567	66,732	66,762	66,727	66,735	66,696	66,673	66,705	66,685
<b>total</b>	<b>99,997</b>	<b>100,11</b>	<b>100,071</b>	<b>100,134</b>	<b>100,093</b>	<b>100,164</b>	<b>100,136</b>	<b>100,141</b>	<b>100,13</b>

Sample	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1
Si	0,718	0,826	0,373	0,527	0,654	0,678	0,778	0,763	0,558
P	16,004	15,79	16,23	16,201	16,024	15,973	16,021	15,89	15,992
Ca	0,302	0,154	0,278	0,237	0,248	0,325	0,318	0,344	0,273
Fe	0,003	0,082	0	0	0	0	0	0	0,139
Y	0,382	0,346	0,272	0,344	0,357	0,382	0,365	0,379	0,315
La	4,067	4,159	4,309	4,213	4,169	4,069	4,004	4,043	4,239
Ce	7,674	7,795	8,151	7,98	7,792	7,783	7,704	7,814	7,854
Pr	0,611	0,664	0,674	0,656	0,654	0,645	0,635	0,636	0,643
Nd	2,272	2,396	2,285	2,288	2,278	2,311	2,221	2,233	2,376
Sm	0,347	0,33	0,298	0,329	0,322	0,319	0,288	0,317	0,356
Yb	0,01	0,003	0	0,005	0,025	0,024	0	0,009	0,014
Pb	0,084	0,069	0,046	0,068	0,065	0,082	0,091	0,089	0,052
Th	0,813	0,771	0,404	0,582	0,777	0,795	0,896	0,863	0,604
U	0,043	0,02	0,031	0,044	0,063	0,054	0,063	0,064	0,011
Al	0,032	0,015	0,166	0	0,027	0,065	0,053	0	0,034
O	66,639	66,579	66,615	66,675	66,671	66,642	66,702	66,62	66,538
<b>total</b>	<b>100,001</b>	<b>99,999</b>	<b>100,132</b>	<b>100,149</b>	<b>100,126</b>	<b>100,147</b>	<b>100,139</b>	<b>100,064</b>	<b>99,998</b>

Sample	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1
Si	0,32	0,718	0,766	0,374	0,642	0,759	1,925	0,746	0,82
P	16,488	16,311	15,957	16,275	15,975	15,839	15,604	15,94	15,458
Ca	0,203	0,239	0,4	0,358	0,422	0,315	0,888	0,327	0,236
Fe	0	0	0,065	0,007	0,221	0	1,68	0	0
Y	0,349	0,315	0,375	0,56	0,336	0,388	0,184	0,366	0,369
La	4,183	3,929	4,011	4,049	4,088	4,1	2,973	4,091	4,249
Ce	8,133	7,537	7,626	7,875	7,683	7,793	5,959	7,738	8,089
Pr	0,641	0,592	0,619	0,626	0,604	0,63	0,567	0,665	0,671
Nd	2,315	2,148	2,235	2,287	2,222	2,291	2,082	2,296	2,365
Sm	0,322	0,322	0,305	0,338	0,31	0,295	0,283	0,314	0,318
Yb	0	0,027	0	0,004	0	0,006	0	0	0
Pb	0,042	0,081	0,098	0,042	0,074	0,103	0,046	0,106	0,071
Th	0,404	0,734	0,879	0,507	0,743	0,88	0,467	0,792	0,822
U	0,028	0,055	0,059	0,041	0,056	0,063	0,038	0,062	0,017
Al	0	0,334	0	0,046	0,092	0,033	1,098	0,04	0,118
O	66,724	66,788	66,611	66,613	66,535	66,614	66,205	66,632	66,467
<b>total</b>	<b>100,152</b>	<b>100,13</b>	<b>100,006</b>	<b>100,002</b>	<b>100,003</b>	<b>100,109</b>	<b>99,999</b>	<b>100,115</b>	<b>100,07</b>



Annexe II

Sample	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1	R6-1-1
Si	0,758	0,788	0,86	0,84	0,725	0,695	0,709	0,671	0,666
P	15,864	15,977	16,027	15,957	15,984	16,407	16,098	16,39	16,393
Ca	0,372	0,346	0,354	0,35	0,316	0,247	0,275	0,243	0,312
Fe	0,031	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,378	0,372	0,376	0,383	0,364	0,325	0,358	0,298	0,33
La	3,997	4,033	4,057	4,032	4,051	3,986	4,138	4,122	4,071
Ce	7,827	7,712	7,63	7,662	7,822	7,718	7,841	7,679	7,737
Pr	0,609	0,599	0,62	0,647	0,65	0,594	0,618	0,606	0,595
Nd	2,209	2,22	2,198	2,196	2,229	2,144	2,226	2,234	2,148
Sm	0,296	0,31	0,287	0,324	0,324	0,298	0,299	0,304	0,32
Yb	0,001	0,008	0	0,003	0,002	0	0	0	0,005
Pb	0,082	0,078	0,085	0,084	0,077	0,073	0,073	0,068	0,062
Th	0,854	0,858	0,878	0,855	0,787	0,734	0,725	0,7	0,558
U	0,06	0,053	0,061	0,053	0,056	0,042	0,05	0,05	0,043
Al	0,078	0,041	0	0,03	0,061	0,035	0,005	0	0,082
O	66,583	66,656	66,707	66,661	66,647	66,815	66,686	66,803	66,751
<b>total</b>	<b>99,999</b>	<b>100,051</b>	<b>100,14</b>	<b>100,077</b>	<b>100,095</b>	<b>100,113</b>	<b>100,101</b>	<b>100,168</b>	<b>100,073</b>

Sample	R6-1-1	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2
Si	0,692	0,718	0,659	0,658	0,616	0,613	0,603	3,439	0,642
P	16,353	16,631	16,329	16,348	16,337	16,316	16,356	11,336	16,349
Ca	0,271	0,425	0,428	0,4	0,424	0,387	0,414	0,614	0,43
Fe	0	0	0	0	0	0	0	5,846	0
Y	0,365	0,355	0,396	0,412	0,429	0,382	0,374	1,462	0,403
La	4,088	3,699	3,915	3,963	3,922	3,901	3,965	2,669	3,897
Ce	7,773	7,143	7,223	7,298	7,378	7,485	7,456	5,123	7,323
Pr	0,604	0,575	0,611	0,62	0,626	0,618	0,629	0,432	0,594
Nd	2,163	2,161	2,218	2,247	2,261	2,238	2,208	1,555	2,221
Sm	0,296	0,357	0,384	0,334	0,369	0,359	0,357	0,27	0,393
Yb	0	0,002	0,003	0	0,016	0,007	0,01	0,03	0,016
Pb	0,064	0,082	0,101	0,108	0,108	0,094	0,094	0,07	0,09
Th	0,594	0,8	0,875	0,834	0,842	0,853	0,868	2,355	0,911
U	0,039	0,068	0,058	0,076	0,069	0,073	0,064	0,178	0,066
Al	0,043	0,18	0,06	0	0	0,032	0	0,198	0
O	66,757	66,884	66,746	66,76	66,758	66,762	66,775	64,423	66,783
<b>total</b>	<b>100,102</b>	<b>100,08</b>	<b>100,006</b>	<b>100,058</b>	<b>100,155</b>	<b>100,12</b>	<b>100,173</b>	<b>100</b>	<b>100,118</b>

Sample	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2
Si	0,662	0,651	0,636	0,673	0,702	0,683	0,661	0,68	0,63
P	16,309	16,361	16,249	16,292	16,271	16,17	16,23	16,242	16,206
Ca	0,46	0,4	0,402	0,398	0,429	0,373	0,41	0,426	0,376
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,371	0,396	0,398	0,413	0,413	0,401	0,387	0,382	0,409
La	3,93	3,877	3,859	3,896	3,936	3,93	3,956	3,898	3,875
Ce	7,427	7,408	7,53	7,436	7,438	7,375	7,467	7,518	7,519
Pr	0,599	0,627	0,611	0,629	0,592	0,63	0,624	0,586	0,597
Nd	2,217	2,275	2,249	2,256	2,203	2,24	2,225	2,2	2,277
Sm	0,338	0,376	0,356	0,356	0,376	0,378	0,353	0,372	0,359
Yb	0,01	0	0,015	0	0,009	0	0,002	0,006	0
Pb	0,089	0,108	0,102	0,115	0,101	0,1	0,098	0,103	0,105
Th	0,847	0,84	0,865	0,833	0,894	0,924	0,9	0,926	0,908
U	0,072	0,061	0,059	0,067	0,064	0,066	0,06	0,06	0,064
Al	0,008	0	0,026	0,011	0	0,117	0	0	0,077
O	66,747	66,778	66,728	66,753	66,773	66,73	66,734	66,746	66,733
<b>total</b>	<b>100,086</b>	<b>100,158</b>	<b>100,085</b>	<b>100,128</b>	<b>100,201</b>	<b>100,117</b>	<b>100,107</b>	<b>100,145</b>	<b>100,135</b>

## Annexe II

Sample	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2
Si	0,646	0,658	0,641	0,669	0,661	0,7	0,678	0,603	0,619
P	16,372	16,266	16,352	16,334	16,391	16,232	16,199	16,438	16,38
Ca	0,412	0,429	0,403	0,446	0,379	0,433	0,455	0,468	0,491
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,404	0,382	0,377	0,393	0,388	0,442	0,375	0,466	0,498
La	3,844	3,919	3,857	3,893	3,899	3,932	3,953	3,861	3,793
Ce	7,383	7,377	7,442	7,345	7,249	7,336	7,407	7,277	7,327
Pr	0,61	0,599	0,595	0,614	0,611	0,614	0,618	0,605	0,602
Nd	2,246	2,233	2,233	2,231	2,272	2,266	2,268	2,261	2,251
Sm	0,378	0,382	0,347	0,365	0,372	0,379	0,378	0,387	0,369
Yb	0,012	0	0	0,015	0,022	0,008	0	0,011	0
Pb	0,095	0,106	0,093	0,096	0,086	0,098	0,102	0,098	0,097
Th	0,877	0,916	0,898	0,887	0,909	0,908	0,944	0,838	0,852
U	0,056	0,07	0,062	0,066	0,068	0,065	0,067	0,062	0,061
Al	0,014	0,044	0	0	0,01	0	0	0	0,005
O	66,791	66,754	66,775	66,771	66,818	66,747	66,729	66,788	66,762
<b>total</b>	<b>100,14</b>	<b>100,135</b>	<b>100,075</b>	<b>100,125</b>	<b>100,135</b>	<b>100,16</b>	<b>100,173</b>	<b>100,163</b>	<b>100,107</b>

Sample	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2
Si	0,619	0,762	0,747	0,746	1,795	0,625	0,624	0,655	0,673
P	16,261	16,155	16,28	16,517	14,873	16,343	16,467	16,217	16,247
Ca	0,529	0,443	0,372	0,437	1,494	0,479	0,454	0,495	0,454
Fe	0	0	0	0	0,938	0	0	0	0
Y	0,516	0,395	0,425	0,38	0,402	0,504	0,5	0,496	0,5
La	3,841	3,818	3,865	3,782	3,499	3,854	3,794	3,791	3,774
Ce	7,391	7,293	7,345	7,204	6,701	7,191	7,226	7,25	7,285
Pr	0,59	0,604	0,6	0,601	0,561	0,603	0,583	0,602	0,61
Nd	2,248	2,263	2,22	2,168	1,988	2,263	2,225	2,239	2,271
Sm	0,386	0,39	0,369	0,361	0,335	0,353	0,404	0,432	0,377
Yb	0,016	0	0,01	0	0,021	0,011	0,001	0,006	0,021
Pb	0,082	0,111	0,101	0,085	0,023	0,11	0,096	0,103	0,092
Th	0,855	1,037	0,97	0,913	0,795	0,851	0,916	0,962	0,971
U	0,069	0,07	0,071	0,07	0,031	0,073	0,064	0,075	0,073
Al	0,03	0,059	0	0	0,563	0,086	0	0,08	0,007
O	66,722	66,753	66,804	66,871	65,982	66,748	66,824	66,733	66,754
<b>total</b>	<b>100,155</b>	<b>100,153</b>	<b>100,179</b>	<b>100,135</b>	<b>100,001</b>	<b>100,094</b>	<b>100,178</b>	<b>100,136</b>	<b>100,109</b>

Sample	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2
Si	0,83	0,734	0,849	0,892	0,885	0,837	0,904	0,95	0,971
P	16,174	15,785	15,747	15,95	15,999	15,972	15,971	16,011	15,965
Ca	0,473	0,476	0,502	0,595	0,544	0,528	0,559	0,507	0,527
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,446	0,463	0,469	0,452	0,481	0,484	0,484	0,492	0,478
La	3,788	4,024	3,887	3,794	3,79	3,775	3,788	3,641	3,737
Ce	7,23	7,624	7,518	7,315	7,172	7,231	7,217	7,224	7,03
Pr	0,624	0,635	0,61	0,594	0,627	0,601	0,584	0,611	0,604
Nd	2,26	2,299	2,286	2,205	2,207	2,255	2,241	2,243	2,26
Sm	0,365	0,362	0,374	0,4	0,378	0,401	0,359	0,375	0,348
Yb	0	0,008	0	0,001	0	0	0,006	0	0,01
Pb	0,104	0,11	0,093	0,114	0,119	0,129	0,106	0,113	0,14
Th	1,023	0,977	1,067	1,037	1,092	1,122	1,124	1,156	1,169
U	0,071	0,068	0,075	0,088	0,086	0,09	0,094	0,095	0,093
Al	0	0	0,021	0	0,06	0	0	0	0,055
O	66,761	66,578	66,596	66,662	66,709	66,688	66,709	66,749	66,721
<b>total</b>	<b>100,149</b>	<b>100,143</b>	<b>100,094</b>	<b>100,099</b>	<b>100,149</b>	<b>100,113</b>	<b>100,146</b>	<b>100,167</b>	<b>100,108</b>

Annexe II

Sample	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2
Si	0,871	0,948	1,019	0,935	1,023	1,015	1,011	1,011	1,028
P	16,12	16,085	15,951	15,968	15,882	15,982	16,051	16,054	16,078
Ca	0,551	0,523	0,552	0,494	0,568	0,554	0,515	0,478	0,549
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,513	0,472	0,478	0,499	0,503	0,508	0,494	0,486	0,471
La	3,725	3,671	3,652	3,671	3,7	3,591	3,662	3,61	3,581
Ce	7,115	7,039	7,034	7,093	7,086	7,002	6,941	7,087	6,983
Pr	0,568	0,564	0,606	0,594	0,577	0,571	0,582	0,583	0,584
Nd	2,213	2,234	2,211	2,232	2,271	2,211	2,2	2,207	2,172
Sm	0,39	0,398	0,409	0,394	0,394	0,382	0,371	0,402	0,389
Yb	0	0,002	0	0,009	0	0,01	0,011	0	0,006
Pb	0,141	0,134	0,143	0,152	0,134	0,148	0,128	0,141	0,144
Th	1,1	1,167	1,2	1,257	1,215	1,269	1,234	1,215	1,233
U	0,094	0,101	0,104	0,104	0,101	0,089	0,099	0,094	0,101
Al	0	0,043	0,054	0	0	0,039	0,056	0	0,026
O	66,748	66,777	66,734	66,74	66,71	66,752	66,789	66,791	66,792
<b>total</b>	<b>100,149</b>	<b>100,158</b>	<b>100,147</b>	<b>100,142</b>	<b>100,164</b>	<b>100,123</b>	<b>100,144</b>	<b>100,159</b>	<b>100,137</b>

Sample	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2
Si	0,982	1,102	1,089	1,002	0,955	0,834	0,804	0,799	0,8
P	16,203	16,304	16,065	15,938	15,975	15,942	16,047	16,14	15,978
Ca	0,597	0,636	0,541	0,515	0,525	0,547	0,542	0,516	0,518
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,493	0,418	0,481	0,505	0,499	0,509	0,508	0,516	0,545
La	3,553	3,444	3,544	3,645	3,718	3,777	3,773	3,708	3,784
Ce	6,823	6,635	6,896	7,078	7,12	7,201	7,203	7,194	7,267
Pr	0,583	0,559	0,582	0,581	0,601	0,594	0,601	0,584	0,589
Nd	2,15	2,165	2,206	2,247	2,29	2,339	2,257	2,31	2,322
Sm	0,401	0,412	0,39	0,384	0,395	0,434	0,41	0,423	0,381
Yb	0	0,009	0,004	0	0	0,01	0,022	0	0
Pb	0,136	0,134	0,152	0,142	0,143	0,121	0,109	0,119	0,123
Th	1,238	1,19	1,213	1,183	1,102	1,022	1,014	0,978	1,065
U	0,098	0,102	0,087	0,097	0,08	0,075	0,073	0,074	0,071
Al	0,062	0,137	0,089	0,081	0,024	0,073	0,064	0,069	0,011
O	66,825	66,87	66,791	66,723	66,711	66,656	66,69	66,728	66,673
<b>total</b>	<b>100,144</b>	<b>100,117</b>	<b>100,13</b>	<b>100,121</b>	<b>100,138</b>	<b>100,134</b>	<b>100,117</b>	<b>100,158</b>	<b>100,127</b>

Sample	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-2	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8
Si	0,746	0,737	0,832	0,806	0,516	0,534	0,521	0,505	0,391
P	15,965	15,964	15,989	15,978	16,654	16,6	16,535	16,604	16,712
Ca	0,564	0,532	0,529	0,803	0,38	0,424	0,466	0,451	0,451
Fe	0	0	0	0,521	0	0	0	0	0
Y	0,531	0,526	0,526	0,491	0,217	0,22	0,218	0,25	0,253
La	3,827	3,8	3,779	3,575	3,868	3,872	3,849	3,838	3,889
Ce	7,274	7,225	7,232	6,911	7,456	7,391	7,499	7,447	7,478
Pr	0,582	0,573	0,563	0,581	0,604	0,625	0,608	0,595	0,597
Nd	2,283	2,326	2,328	2,226	2,334	2,348	2,341	2,351	2,421
Sm	0,409	0,426	0,414	0,4	0,338	0,376	0,357	0,356	0,376
Yb	0,028	0,008	0	0,013	0,019	0,016	0,001	0,024	0,011
Pb	0,109	0,126	0,123	0,099	0,077	0,079	0,101	0,082	0,074
Th	1,036	0,979	1,004	1,008	0,717	0,76	0,757	0,728	0,619
U	0,08	0,065	0,069	0,067	0,067	0,066	0,076	0,074	0,074
Al	0,01	0,167	0,014	0,04	0	0	0	0	0
O	66,641	66,626	66,657	66,482	66,849	66,833	66,794	66,816	66,823
<b>total</b>	<b>100,085</b>	<b>100,08</b>	<b>100,059</b>	<b>100,001</b>	<b>100,096</b>	<b>100,144</b>	<b>100,123</b>	<b>100,121</b>	<b>100,169</b>

## Annexe II

Sample	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8
Si	0,428	0,412	0,448	0,476	0,45	0,469	0,506	0,412
P	16,805	16,609	16,665	16,73	16,746	16,612	16,505	16,699
Ca	0,426	0,378	0,369	0,385	0,37	0,418	0,399	0,348
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,244	0,211	0,204	0,172	0,197	0,197	0,184	0,235
La	3,95	4,039	3,991	3,904	3,866	3,869	3,933	3,932
Ce	7,278	7,63	7,516	7,43	7,41	7,509	7,452	7,513
Pr	0,616	0,625	0,642	0,641	0,607	0,621	0,652	0,655
Nd	2,396	2,377	2,384	2,362	2,408	2,401	2,43	2,433
Sm	0,384	0,367	0,354	0,362	0,368	0,351	0,374	0,358
Yb	0,011	0,007	0,019	0	0,023	0,013	0	0
Pb	0,074	0,062	0,079	0,075	0,084	0,08	0,083	0,079
Th	0,612	0,579	0,599	0,651	0,702	0,7	0,712	0,628
U	0,062	0,059	0,051	0,058	0,063	0,063	0,068	0,058
Al	0	0	0	0	0	0,03	0,015	0
O	66,868	66,793	66,822	66,855	66,877	66,823	66,781	66,836
<b>total</b>	<b>100,154</b>	<b>100,148</b>	<b>100,143</b>	<b>100,101</b>	<b>100,171</b>	<b>100,156</b>	<b>100,094</b>	<b>100,186</b>

Sample	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8
Si	0,415	0,427	0,449	0,53	0,543	0,518	0,551	0,558
P	16,758	16,584	16,553	16,646	16,51	16,501	16,552	16,408
Ca	0,377	0,402	0,436	0,448	0,423	0,407	0,463	0,404
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,22	0,189	0,212	0,192	0,222	0,214	0,204	0,185
La	3,911	3,976	3,92	3,838	3,936	3,865	3,828	3,925
Ce	7,502	7,557	7,547	7,45	7,431	7,433	7,384	7,474
Pr	0,681	0,616	0,652	0,615	0,617	0,647	0,655	0,641
Nd	2,396	2,441	2,404	2,386	2,404	2,475	2,423	2,413
Sm	0,349	0,363	0,364	0,362	0,328	0,361	0,367	0,365
Yb	0	0	0,009	0,003	0,006	0,019	0	0,007
Pb	0,073	0,071	0,066	0,082	0,085	0,074	0,079	0,085
Th	0,585	0,629	0,66	0,73	0,739	0,74	0,746	0,81
U	0,063	0,057	0,056	0,06	0,058	0,064	0,064	0,067
Al	0	0,032	0,03	0	0,023	0,02	0	0
O	66,855	66,788	66,781	66,841	66,793	66,795	66,807	66,774
<b>total</b>	<b>100,185</b>	<b>100,132</b>	<b>100,139</b>	<b>100,183</b>	<b>100,118</b>	<b>100,133</b>	<b>100,123</b>	<b>100,116</b>

Sample	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8
Si	0,623	0,459	0,474	0,486	0,488	0,52	0,479	0,477
P	16,851	16,631	16,566	16,625	16,523	16,525	16,597	16,107
Ca	0,416	0,38	0,381	0,402	0,439	0,399	0,343	0,426
Fe	0	0	0	0	0,028	0	0	0
Y	0,191	0,21	0,233	0,164	0,206	0,165	0,211	0,24
La	3,682	3,925	3,916	3,873	3,84	3,915	3,935	4,02
Ce	7,169	7,571	7,508	7,497	7,501	7,552	7,428	7,758
Pr	0,636	0,65	0,64	0,625	0,635	0,616	0,632	0,679
Nd	2,345	2,422	2,443	2,386	2,404	2,458	2,424	2,477
Sm	0,365	0,376	0,379	0,365	0,382	0,367	0,349	0,361
Yb	0	0	0,003	0,002	0	0	0	0,013
Pb	0,087	0,068	0,074	0,085	0,08	0,083	0,072	0,086
Th	0,748	0,644	0,651	0,727	0,676	0,711	0,714	0,774
U	0,06	0,057	0,06	0,069	0,052	0,055	0,061	0,061
Al	0,013	0	0,005	0,009	0,019	0	0,039	0,021
O	66,95	66,826	66,798	66,84	66,743	66,792	66,828	66,629
<b>total</b>	<b>100,136</b>	<b>100,219</b>	<b>100,131</b>	<b>100,155</b>	<b>100,016</b>	<b>100,158</b>	<b>100,112</b>	<b>100,129</b>

## Annexe II

Sample	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8
Si	0,498	0,489	0,442	0,475	0,435	0,46	0,445	0,46
P	16,605	16,539	16,649	16,479	16,655	16,617	16,545	16,655
Ca	0,41	0,365	0,421	0,488	0,366	0,35	0,364	0,377
Fe	0	0	0	0,087	0	0	0	0
Y	0,228	0,178	0,202	0,191	0,191	0,184	0,216	0,216
La	3,938	3,962	3,919	3,906	3,932	3,927	3,911	3,914
Ce	7,386	7,537	7,491	7,527	7,521	7,611	7,668	7,545
Pr	0,644	0,638	0,663	0,664	0,645	0,632	0,653	0,667
Nd	2,43	2,394	2,43	2,363	2,412	2,388	2,42	2,399
Sm	0,356	0,374	0,363	0,376	0,361	0,362	0,354	0,335
Yb	0,007	0,001	0	0	0	0,012	0	0
Pb	0,079	0,075	0,07	0,06	0,075	0,07	0,077	0,066
Th	0,696	0,726	0,624	0,642	0,619	0,638	0,646	0,632
U	0,054	0,05	0,061	0,049	0,062	0,049	0,058	0,055
Al	0	0	0	0	0	0,031	0,008	0
O	66,817	66,804	66,813	66,698	66,813	66,823	66,79	66,826
<b>total</b>	<b>100,148</b>	<b>100,132</b>	<b>100,148</b>	<b>100,005</b>	<b>100,087</b>	<b>100,154</b>	<b>100,155</b>	<b>100,147</b>

Sample	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8
Si	0,488	0,477	0,537	0,449	0,472	0,433	0,408	0,461
P	16,607	16,52	16,547	16,428	16,648	16,662	16,588	16,496
Ca	0,35	0,356	0,362	0,359	0,336	0,34	0,339	0,305
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,16	0,204	0,177	0,19	0,204	0,228	0,209	0,187
La	3,966	3,915	3,916	3,907	3,93	3,891	3,993	3,94
Ce	7,51	7,635	7,592	7,727	7,503	7,568	7,618	7,773
Pr	0,632	0,637	0,657	0,688	0,651	0,627	0,679	0,65
Nd	2,427	2,438	2,439	2,49	2,418	2,483	2,43	2,446
Sm	0,348	0,343	0,362	0,366	0,371	0,363	0,36	0,36
Yb	0,016	0,022	0,007	0,006	0,012	0	0,007	0,008
Pb	0,064	0,079	0,075	0,065	0,066	0,058	0,075	0,062
Th	0,653	0,676	0,654	0,631	0,575	0,615	0,607	0,63
U	0,046	0,052	0,052	0,047	0,06	0,059	0,055	0,055
Al	0,051	0,012	0	0,046	0,04	0	0	0
O	66,827	66,794	66,81	66,739	66,822	66,833	66,797	66,78
<b>total</b>	<b>100,145</b>	<b>100,16</b>	<b>100,187</b>	<b>100,138</b>	<b>100,108</b>	<b>100,16</b>	<b>100,165</b>	<b>100,153</b>

Sample	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8	R6-1-8
Si	0,449	0,398	0,459	0,397	0,397	0,383	0,36	0,381
P	16,628	16,569	16,616	16,579	16,785	16,733	16,76	16,597
Ca	0,352	0,373	0,351	0,295	0,349	0,287	0,332	0,363
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,186	0,21	0,201	0,21	0,223	0,183	0,196	0,217
La	3,941	4,025	3,923	3,967	3,922	3,962	3,96	4,028
Ce	7,518	7,661	7,592	7,764	7,544	7,625	7,603	7,677
Pr	0,658	0,628	0,672	0,647	0,646	0,631	0,656	0,641
Nd	2,47	2,467	2,44	2,422	2,42	2,43	2,387	2,448
Sm	0,322	0,346	0,366	0,342	0,362	0,372	0,375	0,388
Yb	0	0	0,018	0,012	0,006	0,023	0,027	0
Pb	0,08	0,062	0,066	0,067	0,068	0,064	0,058	0,059
Th	0,618	0,582	0,588	0,549	0,507	0,578	0,54	0,573
U	0,056	0,042	0,061	0,048	0,051	0,049	0,049	0,054
Al	0,013	0	0	0,027	0	0	0	0
O	66,808	66,766	66,812	66,78	66,846	66,857	66,838	66,784
<b>total</b>	<b>100,099</b>	<b>100,129</b>	<b>100,165</b>	<b>100,106</b>	<b>100,126</b>	<b>100,177</b>	<b>100,141</b>	<b>100,21</b>

## Annexe II

<b>Sample</b>	<b>R6-1-8</b>	<b>R6-1-8</b>	<b>R6-1-8</b>	<b>R6-1-8</b>	<b>R6-1-8</b>	<b>R6-1-8</b>	<b>R6-1-8</b>	<b>R6-1-8</b>	<b>R6-1-8</b>
Si	0,361	0,469	0,829	0,436	0,446	0,35	0,37	0,341	0,466
P	16,702	16,482	15,184	16,096	17,132	16,78	16,599	16,755	16,435
Ca	0,299	0,43	0,375	0,372	0,323	0,319	0,342	0,291	0,455
Fe	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y	0,212	0,215	0,277	0,244	0,162	0,198	0,219	0,2	0,256
La	3,995	3,92	4,232	3,994	3,723	4,001	3,994	3,932	3,978
Ce	7,598	7,745	8,128	8,026	7,254	7,584	7,721	7,702	7,728
Pr	0,648	0,666	0,722	0,704	0,635	0,628	0,656	0,648	0,698
Nd	2,395	2,494	2,704	2,567	2,397	2,461	2,448	2,438	2,473
Sm	0,374	0,395	0,404	0,383	0,373	0,365	0,375	0,372	0,384
Yb	0,006	0,014	0	0,001	0,019	0,003	0	0,014	0
Pb	0,064	0,058	0,091	0,067	0,058	0,064	0,053	0,049	0,063
Th	0,565	0,525	0,593	0,553	0,442	0,539	0,516	0,515	0,53
U	0,053	0,054	0,061	0,046	0,055	0,046	0,052	0,053	0,053
Al	0,004	0	0,23	0,045	0,121	0	0,014	0	0
O	66,824	66,734	66,301	66,581	66,992	66,85	66,773	66,84	66,712
<b>total</b>	<b>100,1</b>	<b>100,201</b>	<b>100,131</b>	<b>100,115</b>	<b>100,132</b>	<b>100,188</b>	<b>100,132</b>	<b>100,15</b>	<b>100,231</b>

## Annexe II

Sample	272,50m-1	272,50m-1	249,00m-1	249,00m-1	249,00m-2	249,00m-2	249,00m-3	249,00m-3	249,00m-4
	C	B	C	B	C	B	C	B	C
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,03	0,00	0,32	0,08	0,00	0,05	0,22	0,07
MgO	0,09	0,12	0,20	0,13	0,06	0,04	0,08	0,08	0,19
K <sub>2</sub> O	0,02	0,04	0,00	0,06	0,01	0,06	0,01	0,10	0,00
TiO <sub>2</sub>	37,81	35,69	36,28	35,71	35,75	31,77	32,54	34,95	31,90
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,01	0,05	0,00	0,00	0,05	0,02	0,01	0,03
MnO	0,15	0,02	0,02	0,00	0,08	0,03	0,12	0,12	0,20
FeO	0,71	0,55	1,24	0,40	1,06	1,10	2,02	0,79	1,68
CaO	28,44	28,32	28,78	29,17	28,65	27,63	28,28	26,83	28,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,96	1,70	1,22	2,41	1,75	3,65	2,45	2,22	3,15
SiO <sub>2</sub>	26,21	26,13	26,66	26,92	26,84	26,22	25,67	25,29	25,25
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,07	0,10	0,03	0,10	0,53	0,11	0,10	0,13
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39	0,10	0,23	0,15	0,18	0,39	0,34	0,25	0,12
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,31	0,00	0,17	0,00	0,21	0,83	0,21	0,00	0,10
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,00	0,01	0,06	0,08	0,59	0,00	0,02	0,04
Total	95,20	92,76	94,96	95,36	94,85	92,89	91,89	90,97	91,23

Sample	249,00m-4	249,00m-4	236,50m-1	236,50m-1	304,30m-1	304,30m-1	304,30m-2	304,30m-2	304,30m-3
	B	B	C	B	C	B	C	B	C
Na <sub>2</sub> O	0,27	0,03	0,00	0,39	0,00	0,12	0,00	0,16	0,00
MgO	0,35	0,16	0,17	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,02	0,05	0,00	0,03	0,01	0,05	0,00
TiO <sub>2</sub>	33,39	33,41	34,65	32,85	34,39	34,43	37,78	34,58	37,42
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,02	0,00	0,03	0,00	0,08	0,04	0,03	0,02
MnO	0,20	0,03	0,13	0,00	0,11	0,06	0,11	0,00	0,11
FeO	1,09	0,96	0,86	0,49	1,70	0,51	0,84	0,49	0,99
CaO	25,64	27,79	26,56	27,04	26,66	28,07	28,80	27,38	28,72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,92	2,32	0,94	2,55	1,78	3,00	1,04	2,70	1,16
SiO <sub>2</sub>	26,59	25,15	28,41	28,30	28,94	29,46	29,34	29,25	29,16
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	0,19	0,08	0,12	0,71	0,15	0,09	0,30	0,02
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,53	0,29	0,21	0,07	0,79	0,15	0,08	0,11	0,02
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	0,38	0,14	0,09	1,00	0,10	0,00	0,02	0,04
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,09	0,01	0,14	0,14	0,00		0,17	0,07
Total	91,34	90,82	92,17	92,12	96,24	96,16	98,25	95,20	97,74

Sample	304,30m-3	304,30m-3	324,80m-1	324,80m-1	324,80m-2	324,80m-2	324,80m-3	324,80m-3
	B	B	C	B	C	B	C	B
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	0,01	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01
K <sub>2</sub> O	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
TiO <sub>2</sub>	34,43	32,83	37,71	34,69	35,40	34,86	36,48	36,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,02	0,06	0,03	0,05	0,04	0,03	0,06
MnO	0,00	0,06	0,07	0,02	0,14	0,13	0,11	0,07
FeO	0,57	0,83	0,78	0,35	1,37	1,46	1,41	0,32
CaO	27,65	27,43	27,74	28,28	27,96	27,57	28,63	29,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,81	3,08	1,23	2,73	1,82	1,75	1,31	2,46
SiO <sub>2</sub>	28,57	28,30	29,18	29,24	29,74	29,15	29,21	29,15
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,36	0,40	0,26	0,11	0,19	0,16	0,00	0,02
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,30	0,38	0,02	0,64	0,57	0,18	0,03
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,23	0,26	0,52	0,00	0,19	0,46	0,16	0,09
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,19	0,08	0,00	0,07	0,00	0,00	0,02
Total	94,87	93,74	98,04	95,48	97,58	96,20	97,52	97,23

## Annexe II

Sample	329,30m-1	329,30m-1	424,25m-1	424,25m-1	424,25m-2	424,25m-2	424,25m-3	424,25m-3
	C	B	C	B	C	B	C	B
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,09	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,05
MgO	0,02	0,03	0,05	0,00	0,05	0,03	0,03	0,00
K <sub>2</sub> O	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,05
TiO <sub>2</sub>	36,77	33,47	32,04	38,07	33,18	33,51	37,78	34,92
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
MnO	0,09	0,00	0,17	0,02	0,23	0,11	0,00	0,05
FeO	0,95	0,88	1,86	0,32	1,78	1,89	0,51	0,64
CaO	28,07	27,72	28,33	28,67	28,05	27,98	28,91	28,39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,03	2,76	3,72	1,40	2,64	2,58	1,36	2,78
SiO <sub>2</sub>	26,62	26,46	29,19	29,18	29,08	29,44	29,67	29,39
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,27	0,43	0,13	0,00	0,30	0,25	0,01	0,38
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,47	0,21	0,42	0,07	0,27	0,37	0,08	0,10
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,34	0,23	0,10	0,00	0,40	0,56	0,00	0,00
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,02	0,09	0,00	0,08	0,01	0,00	0,16
Total	94,65	92,30	96,09	97,76	96,05	96,73	98,36	96,91

Sample	424,25m-4	424,25m-4	576,60m-1	576,60m-1	479,20m-1	479,20m-1	479,20m-2	479,20m-2
	C	B	C	B	C	B	C	B
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,16	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	0,00	0,02	0,13	0,08	0,05	0,00	0,04	0,00
K <sub>2</sub> O	0,02	0,05	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00
TiO <sub>2</sub>	33,17	35,29	36,87	33,25	35,41	35,37	31,46	34,39
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
MnO	0,02	0,58	0,07	0,98	0,13	0,00	0,13	0,06
FeO	0,37	0,32	0,93	0,81	2,01	0,45	1,77	0,48
CaO	28,27	26,90	28,37	25,78	28,09	28,97	27,66	28,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,74	2,47	1,00	2,23	1,77	3,16	3,56	2,96
SiO <sub>2</sub>	29,29	28,50	26,08	25,77	29,63	29,78	29,07	29,49
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,45	0,10	0,10	0,27	0,11	0,20	0,91	0,24
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35	0,05	0,18	0,31	0,84	0,12	0,30	0,16
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	0,04	0,12	0,22	0,48	0,12	0,36	0,15
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15	0,06	0,08	0,00	0,13	0,01	0,15	0,03
Total	96,06	94,66	93,94	90,17	98,73	98,17	95,40	96,08

Sample	479,20m-2	479,20m-3	479,20m-3	479,20m-4	479,20m-4	479,20m-4	479,20m-5	479,20m-5
	B	C	B	C	B	B	C	B
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
MgO	0,02	0,00	0,00	0,13	0,17	0,07	0,65	0,02
K <sub>2</sub> O	0,02	0,00	0,06	0,00	0,04	0,07	0,02	0,02
TiO <sub>2</sub>	33,74	37,43	34,36	0,05	32,95	34,68	33,93	32,38
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,10	0,00	0,00	0,13	0,12	0,07	0,10	0,05
FeO	0,33	0,81	0,36	10,81	0,96	0,80	2,22	0,78
CaO	28,98	28,11	28,72	23,76	27,88	28,03	27,59	27,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,80	1,05	3,33	19,01	2,83	2,37	1,40	3,19
SiO <sub>2</sub>	28,89	29,01	29,51	32,84	25,87	26,20	25,30	26,11
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,06	0,12	0,00	0,08	0,01	0,00	0,41
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,15	0,03	0,00	0,05	0,04	0,82	0,07
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,13	0,00	0,00	0,93	0,06	0,51	0,52
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,11	0,00	0,00	0,27	0,17	0,00	0,20
Total	96,09	96,87	96,49	86,73	92,16	92,57	92,75	91,75



---

*ANNEXE III*

Inclusions Fluides (IF)

Microthermométrie & Microspectrométrie Raman

---



## Le bassin de Cariewerloo

Location	Microthermometry				
	IF type	Te	Tmice	Th	Mode
ASD (791,6 m)- 4 2 1	Lw	-42,4	-13,6	329,9	L
ASD (791,6 m)- 4 2 2	Lw	-42,2	-15,7	207,8	L
ASD (791,6 m)- 4 1 1	Lw	-42,2	-8,5	193,9	L
ASD (791,6 m)- 4 1 2	Lw	-23,3	-9	208,9	L
ASD (791,6 m)- 4 1 3	Lw	-34,5	-8,5	204,8	L
CSD1 (646,1 m)- 1 1	Lw	-27,6	-6,5	144,2	L
CSD1 (646,1 m)- 2 1	Lw	-52,7	-10,9	190,5	L
CSD1 (646,1 m)- 2 4	Lw	-54,2	-8,5	163,5	L
CSD1 (646,1 m)- 2 5	Lw	-42,7	-9,1	158,5	L
CSD1 (646,1 m)- 3 4	Lw	-42,4	-9,8	338,4	L
CSD1 (646,1 m)- 3 5	Lw	-51,1	-7,9	192,4	L

Le calcul de pression-température :

Salinité  
Tm ice -8 °C  
11,7wt %  
Th 160 °C

T °C	P (Mpa)
160	0,5
208	93
256	186
304	278
352	371
400	464

Salinité  
Tm ice -8 °C  
11,7wt %  
Th 200 °C

T °C	P (Mpa)
200	1,2
240	70
280	138
320	207
360	276
400	344

Salinité  
Tm ice -8 °C  
11,7wt %  
Th 340 °C

T °C	P (Mpa)
340	14
352	26
364	38
376	49
388	61
400	73

Salinité  
Tm ice -15 °C  
18,6wt % NaCl  
Th = 200 °C

T °C	P (Mpa)
200	1,2
240	72
280	144
320	215
360	287
400	358



## Le bassin de Satakunta

'Le calcule de pression-température :

Inclusion N°	Temprature (C°)	Pressure (Mpa)						
		274,6-2	274,6-4	274,6-8	329,3-2-1	329,3-2-3	329,3-2-6	329,3-2-8
275,4							101,96	
300							114	
311,2			170,89				133,31	
346,8			212,00		28,24	13,09	164,48	15,27
350			212		23	4	166	1,4
356,6			223,31		35,42	18,46	173,06	22,41
365,4		192,00	233,47	142,03	41,87	23,27	180,77	28,83
400		231	276	161	65	37	217	46
450		285	337	187	105	68	264	88
500		334	395	211	143	98	305	129
550		380	448	232	179	127	342	167
600		422	496	250	212	153	376	202

## Le bassin de Satakunta

'Le calcule de pression-température :

329,30 m-2-2 7 wt%

T	P (Mpa)
290	7
293,9	11,39141
301	20
312	33
323	45
334	58
345	71
356	84
367	97
378	110
389	123
400	136

329,30 m-1-1 2,4 wt%

T	P
264,5	3,84975
265	4,6
278	21
292	38
305	55
319	72
332	89
346	106
360	123
373	140
386	157
400	174

424,25 m-3-1 2 wt%

T	P
237,7	-0,46965
240	3
256	25
272	47
288	70
304	92
320	114
336	137
352	159
368	181
384	204
400	226

274,60 m-1-10 2,4 wt%

T	P(Mpa)
300	8,1
301,1	7,73513
320	25,1
340	50,1
360	71,1
380	92,2
400	113,2

274,60 m-1-115 wt%

T	P(Mpa)
335	13,1
<b>335,8</b>	13,77718
348	24,7
361	36,3
374	47,5
387	59,6
400	71,1

274,60 m-1-12 5 wt%

T	P(Mpa)
246,6	-1,14994
250	3,5
280	44,6
310	85,7
340	126,7
370	167,8
400	208,9

Monsieur **IBRAHIM Ahlam**

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY 1  
en GEOSCIENCES

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER n° 1453

Nancy, le 26 novembre 2007

Le Président de l'Université



J.P. FINANCE



