

ANALYSE COMPARATIVE DE ROCHES PAR FLUORESCENCE X INDUITE PAR RAYONNEMENT X ET PROTONS DE BASSE ENERGIE

I. BRISSAUD^{*†} ET A. HOUDAYER[†]
G. VIVIER^{**} ET F. KELLER^{**}

Résumé

Une vingtaine d'échantillons (basalte et granite) ont été analysés parallèlement par fluorescence X induite par rayonnements X et protons de basses énergies. Dans cet article, nous distinguons pour chaque type d'analyse les principes physiques, les techniques opératoires, le traitement numérique des données expérimentales et les difficultés rencontrées. Si malgré toutes ces différences, les résultats sont globalement concordants, il convient de noter plutôt la complémentarité des deux techniques.

Abstract

The aim of this work was to furnish a set of comparable analytical results of geological samples. These analyses were obtained by Proton Induced X-ray Emission (PIXE) and by X-ray Fluorescence (XRF). Advantages and disadvantages of these techniques are emphasized ; cross sections, experimental set up, data reduction and computer codes are compared. Results are in fair agreement. The conclusion is the complementarity of the two systems.

* Institut de Physique Nucléaire, BP1, 91406 ORSAY-Cedex, France,

† Laboratoire de Physique Nucléaire, Université de Montréal, (P.Q.) Montréal, Canada,

** Institut Dolomieu, URA69 . CNRS, U.J.F., rue M. Gignoux, 38031 Grenoble, France.

INTRODUCTION

Les matériaux géologiques, mélanges complexes de minéraux, contiennent un grand nombre d'éléments en concentrations variables. La connaissance de leurs compositions chimiques est prépondérante pour les Sciences de la Terre, car elle donne accès à des informations sur l'histoire de ces matériaux: leur formation et leur(s) modifications ultérieure(s). En effet, la variation des teneurs en certains éléments dépend de plusieurs facteurs physico-chimiques (telles la température, pression ...) que l'on peut apprécier, etc...

Pour mener à bien les analyses chimiques des matériaux géologiques, les sciences physiques mettent à la disposition du géologue un large éventail de techniques. Dans cet article, nous présentons deux séries d'analyses de roches (granite et basalte). Elles ont été réalisées d'une part grâce à un spectromètre de fluorescence X (XRF) à l'Institut Dolomieu de Grenoble, et d'autre part par une installation PIXE (MITCHELL et al., 1981) (Proton induced X-ray Emission) auprès d'un accélérateur de particules de l'Université de Montréal. Ces deux méthodes reposent sur la fluorescence des atomes induite par bombardement soit avec un rayonnement X émis par un tube de Crookes, soit avec un faisceau de protons de basse énergie. Dans les deux cas, la réorganisation du cortège électronique s'accompagne de l'émission de raies X spécifiques des atomes bombardés dont on peut calculer les teneurs. Nous nous proposons de souligner ici les similitudes et différences entre les deux méthodes appliquées aux mêmes échantillons et leurs résultats.

I - Techniques d'analyses

1 - Les mécanismes d'ionisation, dans les deux techniques, sont différents et leur importance varie de façon très dissemblable. La figure 1 présente les sections efficaces d'ionisation par des protons de 1 à 3 MeV (MITCHELL et al., 1981) et par des rayonnements X de 25 et 60 KeV (XRF), (VELGELE et al., 1971); en fonction du nombre atomique des atomes bombardés, il est clair que pour les Z supérieurs à 25, la fluorescence X est nettement plus sensible, de plusieurs ordres de grandeur: par exemple, il est évident que les Terres Rares sont beaucoup plus facilement détectées par XRF. Généralement, la plupart des éléments traces étudiés dans les matériaux géologiques, ont en grande majorité un nombre atomique élevé. En conséquence, ils sont étudiés plus facilement par XRF que par PIXE.. Par contre, cette dernière doit être un outil favorable pour les éléments légers.

2.- Les protons d'une énergie de quelques MeV ionisent le matériau à étudier le long de leur parcours. Celui-ci est pour une matrice géologique (silicates) de quelques dizaines de μm environ - 10 μm à 1 MeV et 80 μm à 3 MeV - alors qu'un rayonnement X incident peut pénétrer très fortement selon son énergie; par exemple, pour des X de 60 keV, la transmission est de 50, 70, 90 % après un parcours de 30, 16, 9 mm dans ce type de matrice. D'autre part, les raies X secondaires, émises à la suite de l'ionisation, ont une énergie comprise entre 1 keV et quelques dizaines de keV selon le nombre atomique des atomes cibles. Ces raies sont également absorbées. Comme la fluorescence X ionise préférentiellement les atomes de Z élevés dont le rayonnement est le plus énergétique, donc le moins absorbé, on peut estimer que la technique PIXE permet d'étudier uniquement les surfaces, alors que XRF peut analyser un volume beaucoup plus grand. Pour préciser ce point, un calcul simple montre que dans une matrice de Si, 90% des raies X observées après ionisation d'atomes de Ca par des protons de 2 MeV proviennent des 12 premiers μm de la surface, et 70% ne proviennent que des 6 premiers alors que le parcours des protons de cette énergie dans Si est de 55 μm . Cette potentialité d'analyse volumique de la fluorescence X permet d'espérer que cette technique est moins sensible aux hétérogénéités des échantillons géologiques.

3.- Les raies X émises par l'échantillon sont comptées par un détecteur solide silicium (lithium) dont l'efficacité aux basses énergies est très fortement réduite par la fenêtre d'entrée de beryllium qui le protège. Celle-ci absorbe les X mous, particulièrement ceux provenant des noyaux plus légers que Na. De ce fait, les deux techniques, quoique multiélémentaire, ne permettent d'étudier que le rayonnement X détectable par le Si(Li). En particulier, l'oxygène, fort abondant dans les matériaux qui nous occupent ne peut être évalué directement par cette technique. Par contre, pour des énergies X élevées, le détecteur perd son efficacité; dans ce cas la fluorescence X qui permet d'ioniser les atomes de haut Z avec un grand rendement (Fig.1) est un outil préférable si on s'intéresse plus spécialement à ces éléments.

II - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1.1. PIXE. Une description détaillée du dispositif de Montréal a été publiée par ailleurs. (HOUDAYER et al., 1987): le faisceau de protons provenant de l'accélérateur tandem Van de Graaff est amené par une optique électromagnétique sur la cible d'une chambre à réactions sous vide. Pour réduire, les effets géométriques de la détection, le diamètre du faisceau est réduit à 3 mm par une double série de collimateurs. L'incidence des protons est normale à la surface de la cible alors que l'angle d'émergence est de 60° vers l'arrière pour réduire le rayonnement de freinage parasite. Le détecteur Si(Li), refroidi à l'azote, a 4 mm de diamètre, 4 mm d'épaisseur, avec une fenêtre de Be de 12,7 μm ; sa résolution en énergie est de 153 eV à 5,9 keV pour un angle solide de 6 msr. Ce détecteur commande un déflecteur électrostatique situé juste avant l'échantillon afin de limiter le courant de protons (environ 10 nA) et réduire l'empilement des signaux du détecteur en permettant un taux de comptage de 3000 Hz. Les spectres X sont stockés sur ordinateur VAX avant leur traitement. Pour mesurer le courant de protons, une feuille d'or très fine est placée devant l'échantillon et un détecteur solide Si(Li) compte les protons rétrodiffusés. Périodiquement, une cage de Faraday contrôle la calibration après escamotage de la cible, la précision étant de l'ordre de 3%.

1.2. Les fragments de roches étaient réduits en poudre très fine. Puis à partir d'aliquote de cette poudre, quelques dizaines de mg, des pastilles (diamètre 10 mm) étaient fabriquées à l'aide d'une presse hydraulique de 10 tonnes, sans aucun liant chimique pour éviter toute contamination. Comme de telles pastilles sont non conductrices, il faut éviter que dans le vide de la chambre, elles ne soient portées à un potentiel élevé par l'apport de charges du faisceau incident: les claquages éventuels qui en découlent génèrent des rayonnements parasites qui noyeraient le rayonnement étudié. Pour éviter cet effet, un canon à électrons bombarde en permanence la cible et le neutralise. Un porte échantillon à 12 positions permet de faire des séries de mesures sans interruption.

Une analyse se déroule en deux étapes: une première irradiation à faible intensité par des protons de 1 MeV donne un spectre X de basse énergie mettant en évidence les éléments dont le nombre atomique est compris entre 11 et 26. Puis une irradiation à forte intensité (400 nA) avec des protons de 3 MeV permet de mesurer les émissions X des atomes de Z élevé. Dans ce cas, un écran d'aluminium de 204 mg cm⁻² réduit très fortement les raies de basse énergie (éléments de Z < 26) pour rendre acceptables les taux de comptage; les raies K du fer donnent la normalisation des mesures aux deux énergies. La figure 2 présente deux spectres typiques, à 1 et 3 MeV.

2.1 Fluorescence X. Le spectromètre de fluorescence X à dispersion d'énergie utilisé est un modèle XR 500 de LINK Analytical. La source d'excitation est un tube à anode de Rh dont le rayonnement peut être collimaté et filtré selon les éléments qui sont analysés. Les angles d'incidence et d'émergence sont de 45°. Le détecteur Si(Li), refroidi à l'azote liquide, a une surface active de 30 mm² et 3 mm d'épaisseur; la

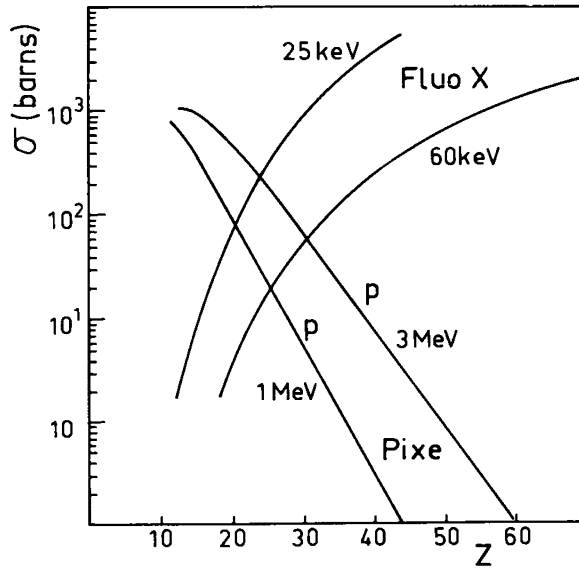
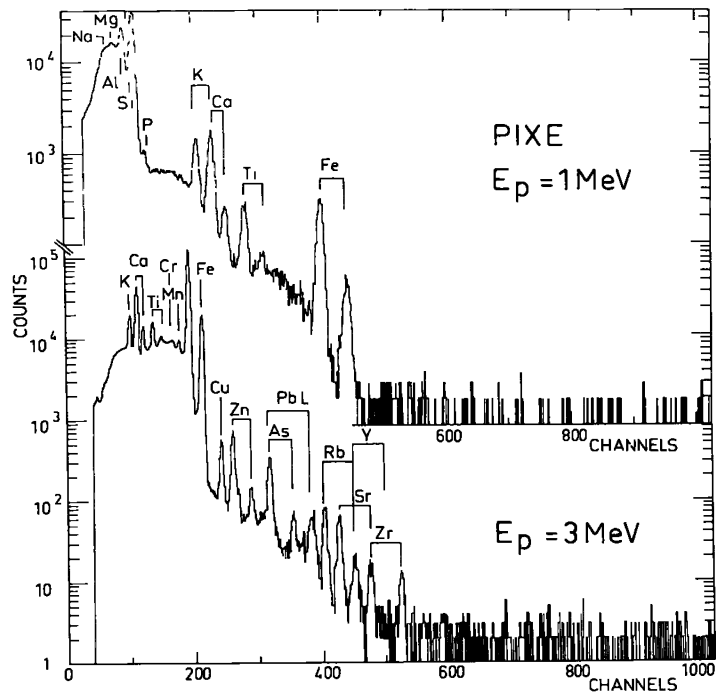


Figure 1 : Sections efficaces de fluorescence X induite par rayonnement X primaire de 25 et 60 KeV (Velgele et al, 1971) et par protons de 1 et 3 MeV (Mitchell et al, 1981) en fonction du nombre atomique Z des éléments étudiés.
X-ray production cross sections for 1 and 3 MeV proton (PIXE) and for 25 and 60 KeV X-ray beam (XRF).

Figure 2 : Spectres typiques obtenues par PIXE avec des protons de 1 et 3 MeV.
Typical spectrum of 1 and 2 MeV proton analysis (PIXE).



fenêtre de Be est épaisse de $7,5 \mu\text{m}$; la résolution est de 154 eV à 5.9 keV. Un dispositif d'acquisition en "mode pulsé" permet par coupure du courant du tube de réduire l'empilement des signaux du détecteur avec un taux de comptage constant. Le calibrage systématique de la chaîne d'amplification est réalisé avec un générateur d'impulsion pour l'énergie zéro et une pastille de cuivre (8.04 keV). Les spectres sont instantanément corrigés en fonction de ces paramètres avant d'être stockés sur disquette "floppy 8".

2.2. Les échantillons broyés, quartés, sont pulvérisés à une taille inférieure à $40 \mu\text{m}$. Pour l'analyse des éléments majeurs, on réalise une perle au borax en fondant 1g de poudre, préalablement chauffée à 1000°C , dans 5g de fondant (Flux 100 B de Johnson MATTHEY) composé de tétraborate et de métraborate de Lithium. Le mélange chauffé à 1100°C , puis broyé, est coulé automatiquement dans une coupelle en OPR3 (système PERL'X de Philips Industries). L'état de surface obtenu permet une utilisation directe de la perle.

Pour l'analyse des éléments traces pour lesquels la dilution est préjudiciable et les effets de matrice un peu moins sensibles, on réalise une pastille de diamètre 31 mm à l'aide d'une presse hydraulique de 10 tonnes. Le liant utilisé est l'alcool de polyvinyle en solution aqueuse à 5% (1 goutte/gramme). Le mélange est pressé dans une coupelle en aluminium qui donne à la pastille une résistance mécanique acceptable, puis séchée à l'étuve à 50°C . La très faible dilution ainsi obtenue peut être considérée comme négligeable.

L'analyse se déroule en trois temps:

- 1/ L'analyse des éléments majeurs est réalisée à partir des perles irradiées sous vide pendant 400 s avec une tension de 11 kV et un courant de 0,12 mA. Sont ainsi analysés Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn et Fe.
- 2/ Pour Na et P, on réalise le même type d'irradiation sur les pastilles afin de compenser la forte absorption et le manque d'efficacité du détecteur pour Na et la dilution pour les deux éléments
- 3/ Pour les éléments en trace, le dosage est réalisé sur pastille avec une tension de 45 kV et un courant de 0,25 mA. Un filtre de Rh épais de 125 μm est interposé entre le tube et l'échantillon. L'acquisition est faite avec un comptage constant au niveau du rayonnement Compton de la raie K du Rh. Ceci constitue une correction des coefficients d'absorption massique différents pour chaque échantillon. Ce procédé est inclus dans la procédure d'analyse automatique du XR 500. Ce type de correction n'est valable que pour les éléments traces compris entre la raie Compton et l'élément majeur Fe, pour ce qui nous concerne.

III - TRAITEMENT NUMERIQUE DES DONNEES

Si les deux méthodes consistent à obtenir les spectres en énergie des raies X caractéristiques, puis à traiter numériquement ceux-ci pour en déduire les concentrations élémentaires, les procédures et les programmes adoptés sont différents et présentés ci-après.

1. PIXE. Le programme de Guelph (CAMPBELL et al. , 1986) a été utilisé. Il permet dans une première étape de retrancher du spectre le fond continu par convolution avec un filtre "top-hat". Chaque pic étant décrit par une gaussienne, la décomposition est réalisée simultanément par lissage non linéaire avec test des moindres carrés. Les corrections des pics d'échappement, raies Auger et empilements éventuels sont effectués automatiquement, ainsi que par l'évaluation des absorptions dans les fenêtres inactives du détecteur (absorbant d'aluminium, beryllium, contact

d'or et zone morte de silicium). Les intensités relatives des raies (en particulier K_{α}/K_{β}) modifiées par l'absorption dans l'échantillon sont évaluées dans une première étape pour une matrice hypothétique; pour celle-ci nous avons choisi la composition classique de Clarke.

Connaissant la surface des pics, il faut remonter aux concentrations élémentaires. Ceci est réalisable en utilisant divers ingrédients: les sections efficaces de production, les coefficients d'atténuation des X et le ralentissement des protons dans la matière.

Comme cela a été précisé auparavant, il est impossible par PIXE de déterminer les teneurs en oxygène. Aussi nous avons fait l'hypothèse que les éléments majeurs et mineurs sont présents sous forme d'oxydes: Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , K_2O , CaO , TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , MnO . La somme des concentrations de ces oxydes doit être égale à 100%. Nous avons rajouté ces deux contraintes dans le programme original de **CAMPBELL**.

Ce traitement des données expérimentales entraîne trois conclusions:

- a) la mesure toujours délicate de l'intensité de protons incidents sur la cible est inutile ;
- b) les analyses PIXE sont effectuées sans normalisation sur un étalon contrairement à d'autres techniques telles l'activation neutronique par exemple (**PERLMAN et al.**, 1981);
- c) le calcul des concentrations nécessite la connaissance de quelques ingrédients (**CAMPBELL et al.**, 1986) (section efficace, atténuation des raies X, ralentissement des protons, intensités relatives des raies K et L). La comparaison dans la littérature des différents jeux de valeurs de ces paramètres suffit à constater des écarts parfois notables. C'est l'origine d'une grande partie des incertitudes attachées aux résultats finaux. Une étude systématique de ces effets a été faite par **CAMPBELL et al.**(1986).

2. Fluorescence. L'analyse des spectres est comparative tant pour la déconvolution que pour l'établissement des teneurs. Après éliminations des pics "échappés", le spectre établi lors de l'analyse est comparé avec des profils obtenus pour des éléments purs avec le même appareillage, dans les mêmes conditions d'excitation. Un filtre digital à sommet plat est utilisé pour tenir compte, à partir des profils de référence, de la structure des pics, de leur distorsion, des raies d'absorption et du bruit de fond. Tous les pics du spectre sont filtrés de la même manière. Une régression linéaire par les moindres carrés détermine la contribution de chaque profil individuel dans le spectre inconnu. Un "fit index" indique la qualité de la déconvolution et permet, grâce à la mise en évidence de la résiduelle de tenir compte de l'intervention d'un élément non prévu dans la déconvolution.

Les effets de la matrice inter-éléments sont calculés en partant du principe que l'absorption du rayonnement de fluorescence émis est primordial et celle du rayonnement incident négligeable, ce qui est une bonne approximation sauf pour de fortes concentrations d'éléments lourds. Les coefficients d'absorption massiques sont calculés selon les équations de **SPRINGER** et **NOLAN** qui dérivent des tables de **HEINRICH** en (1966).

N-B : Des coefficients α de correction par la méthode Lachance et Trail peuvent être utilisés, mais nous ne les utilisons pas pour les échantillons géologiques dans lesquels trop d'éléments interviennent et pour lesquels les écarts de teneur pour les standards sont trop étroits pour que les coefficients alpha soient établis avec une précision suffisante.

Les teneurs des éléments étant rentrées sous forme d'oxydes, ces coefficients sont convertis. Pour les échantillons inconnus, on calcule une composition approchée à partir des comptages bruts ce qui amène à calculer un coefficient d'absorption massique approché. A chaque boucle itérative, les concentrations sont normalisées à 100% pour permettre la convergence qui est arrêtée avec un écart à 0,05% relatif. A partir des surfaces de pics ainsi obtenues on remonte à la composition chimique en comparant les valeurs obtenues avec des relations préalablement établies à partir d'une série d'échantillons de référence géologique. La comparaison est possible grâce à un standard commun et constant qui est passé avec chaque série d'étalons ou d'échantillons.

IV - RESULTATS

Les compositions des deux familles de roches déterminées par XRF et PIXE sont données en annexes.

1. PIXE. Le nombre maximum de teneurs mesurées en PIXE est de 28 pour une précision approximative de 8% pour les éléments majeurs, de 15% pour les éléments mineurs et de 30-40% pour les éléments traces. Ces incertitudes varient d'un matériau à l'autre. Il y a un certain nombre d'éléments pour lesquels les résultats sont entachés d'une erreur systématique: Na, Mg: l'énergie des raies X spécifiques de ces atomes correspond à des efficacités du détecteur très faibles et médiocrement évaluées.

S, Cl, P: l'ajustement du spectre est généralement peu satisfaisant pour ces éléments (λ_2 médiocre). Ceci s'explique par la présence d'une "queue" basses énergies auprès des raies X, effet non pris en compte par le programme de **CAMPBELL et al.** Ces traines sont importantes pour les éléments majeurs K et Ca et viennent se superposer aux raies de S, Cl et P. En plus, le phosphore est difficile à distinguer du silicium qui est beaucoup plus abondant.

Mn: sa détermination est gênée par la queue des pics de Fe beaucoup plus abondant.

V: la forte contribution des raies $K\beta$ du Ti gêne la définition de la raie $K\alpha$ du V.

Cr: les teneurs en chrome sont toujours sous-estimées. Cet effet peut s'expliquer par deux raisons: la présence difficile à évaluer de la raie d'échappement liée à la raie $K\beta$ de Fe et la contamination du spectre par les raies L du Ba, La et Nd.

Il faut donc envisager une incertitude supérieure pour ces éléments et en particulier pour Cr qui semble difficile à prendre en compte.

Cependant, il y a une vingtaine d'éléments dont la mesure est fiable, donc utilisable pour l'étude d'un problème géologique.

Quant à la limite de détection, le déroulement des calculs et les résultats montrent qu'elle n'est pas inférieure à 10 ppm; mais du fait de la complexité des spectres étudiés ici, cette limite est dépendante des éléments, selon les difficultés de l'analyse numérique.

2. FLUORESCENCE X. Les dix éléments majeurs sont analysés sur perles et pastilles (Na et P). Les 5 éléments en traces habituellement dosés le sont à partir des pastilles. Pour les autres éléments en traces, en particulier les éléments de

transition, des interférences spectrales peuvent limiter le dosage à des échantillons présentant des teneurs relativement plus importantes.

Les erreurs relatives obtenues par rapport aux valeurs des échantillons de référence utilisés sont les suivantes (σ): SiO_2 : 0,5%; Al_2O_3 et CaO : 1,5 %; K_2O et TiO_2 : 2%; Fe_2O_3 et MgO : 3,5%; P_2O_5 : 5%; Na_2O : 7%, MnO : 10%.

Pour les éléments compris entre Na et Fe, S et Cl ne sont pas analysés, car ils sont superposés aux Compton et aux raies L du spectre du rhodium utilisé pour l'excitation.

Pour les éléments en trace, la limite de détection est généralement de 5 ppm, mais celle du dosage s.s est estimée à 10 ppm. L'erreur (σ) est inférieure à 10%. Pour les éléments de transition, le chrome est souvent irrégulier et le vanadium, superposé à la raie K du Ti et ne peut être dosé avec précision.

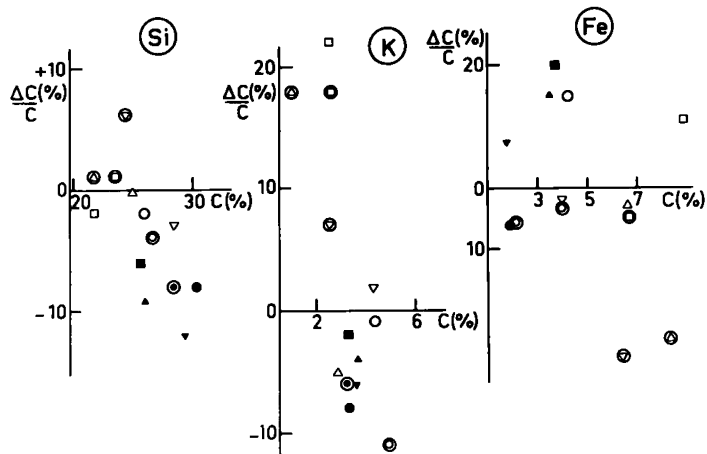
Non pris en compte ici, Cu, Ni et Zn sont dosables avec des limites d'analyse voisines de 10 ppm. Toutes les valeurs citées ici correspondent à des mesures effectuées "en routine" avec la préparation standard décrite plus haut et pourraient être améliorées en changeant le processus analytique, ou le traitement en fonction des matrices, des éléments que l'on veut favoriser.

3 GEOSTANDARDS. Dans une première étape, nous avons analysé deux échantillons de références (GOVINDARAJU, 1984): une biotite Mica-Fer et une anorthosite AN-G de composition assez différente, mais bien connue. Le tableau 1 donne les teneurs admises et les résultats obtenus par XRF et PIXE selon les protocoles précisés plus haut. On constate que l'accord est généralement bon entre les trois valeurs, à moins de 10%.

	Biotite - Mica - Fer			Anorthosite AN-G		
	GST	XRF	PIXE	GST	XRF	PIXE
Al %	10,32	9,71	11,60	15,76	14,79	15,9
Si %	14,90	15,86	14,10	20,05	21,42	19,3
P %	0,200	0,125	0,300	0,004	0,012	
K %	7,26	7,33	7,70	0,108	0,166	0,20
Ca %	0,307	0,282		11,35	11,25	14,1
Ti %	1,500	1,558	1,600	0,132	0,126	0,140
Mn	0,271	0,247	0,240	0,31	0,025	
Fe %	17,96	18,11	17,60	2,35	2,14	2,70
Rb	2200	2243	2590	1	< 5	4
Sr	5	13		76	52	102
Zr	800	815	810	15	10	21
Nb	270	249	310	2	< 5	3
Th	140	140	-	2	<10	-
				-	<10	-

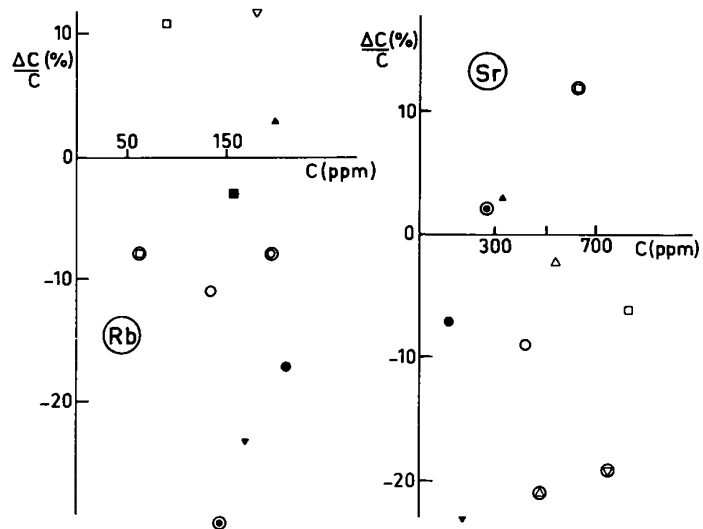
Tableau 1 : Analyses de deux standards géologiques par les techniques XRF et PIXE. GST donne les valeurs admises (Govindaraju, 1983).

Table 1 : Analyses of two geostandards by XRF and PIXE.



Figures 3.1 : et 3.2 :

Représentation pour certains éléments de l'écart entre les concentrations obtenues par fluorescence X et par PIXE : $(C^{XRF} - C^{PIXE}) / C_{moyen}$ en fonction de la concentration C . Les divers signes de reconnaissance sont reportés sur les tableaux en annexe.



Relative difference of concentration between XRF and PIXE analysis of geological samples.

Aucune déviation systématique n'apparaît, sauf pour l'ensemble Al et Si. Comme nous l'avons déjà noté dans un travail précédent (**BRISAUD et al.**, 1987), la déconvolution de ces deux raies, très proches, est délicate: par PIXE la teneur en Al est plus grande que celle admise et la teneur en Si bien moindre. L'effet inverse est observé dans le cas de XRF. Le potassium semble systématiquement supérieur pour les deux techniques, mais pour le calcium la situation est peu claire.

4. COMPARAISON des résultats XRF et PIXE. Les figures 3.1 et 3.2 donnent pour 5 éléments (Si, K, Fe, Rb et Sr) les écarts relatifs $(C_{PIXE} - C_{XRF}) / C$. Une conclusion générale apparaît difficile: on observe un accord satisfaisant surtout pour les éléments majeurs. Comme pour les échantillons de référence, les teneurs en silicium sont plus faibles en PIXE qu'en XRF, alors que cet effet est inversé pour l'aluminium (voir annexe). Pour les roches basaltiques, malgré une certaine dispersion, la moyenne des écarts semble proche de 0, alors qu'une évolution semble marquée pour les granites. Pour les éléments traces l'accord XRF-PIXE est plus moyen.

Globalement, les écarts entre les deux techniques varient de façon indépendante de concentrations, mais pour un même élément ils semblent varier dans le même sens, surtout pour les granites. Ceci suggère qu'une normalisation des deux méthodes doit être possible si cela apparaît nécessaire.

CONCLUSION

En comparant le déroulement des analyses et les résultats obtenus, on peut conclure que les deux techniques donnent des résultats concordants. Cependant, l'étude des échantillons de référence montre que la fluorescence X est plus précise, ce qui doit être lié en partie au volume supérieur analysé, et plus sensible pour les éléments lourds. Un spectromètre XRF est un équipement relativement léger et moins coûteux qu'une installation PIXE avec son accélérateur, qui, par contre, sert à étudier un plus grand nombre d'éléments. Aussi la justification d'un tel accélérateur se trouve dans ses très larges possibilités autre que PIXE: beaucoup d'informations peuvent ainsi être obtenues par réactions nucléaires, Rutherford-Backscattering, activation protonique, etc.. Mais l'intérêt d'un accélérateur est plus précisément la possibilité d'une microsonde nucléaire (**BOSH et al.**, 1980) qui permet d'analyser un matériau géologique sur une surface de quelques micromètres carrés pour l'étude globale, mais aussi des inclusions dans ce matériau.

BIBLIOGRAPHIE

- F. BOSH, A. EL GORESY, W. HERTH, B. MARTIN, R. NOBLING, B. POVH, H.D. REISS and K. TRAXEL** (1980).- The Heidelberg microprobe, Nuclear Science Applications, A1, 33.
- I. BRISAUD, A. HOUDAYER, P. HINRICHSEN** (1987).- Pixe analysis of geostandards at the University of Montreal. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters 117, 99.
- J.L. CAMPBELL, W. MAENHAUT, E. BOMBELKA, E. CLAYTON, K. MALMQUIST, J.A. MAXWELL, J. PALLON and J. VANDENHAUTE** (1986).- An intercomparison of special data processing techniques in PIXE., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B.14, 204.
- K. GOVINDARAJU** (1984).- Geostandards Newsletters 8, 173.
- K.F.J. HEINRICH** (1966).- The Electron Micropole. J. WILEY and son N.Y.

