

LES CARBONATITES : ORIGINE, MINÉRALOGIE ET IMPORTANCE ÉCONOMIQUE ACTUELLE LA CONTRIBUTION BELGE ET DE L'UNION EUROPÉENNE

Léopold VAN WAMBEKE ¹

RESUME. Après une courte introduction sur l'origine des carbonatites, cet article rappelle le rôle important des géologues belges et de la Communauté Européenne dans la découverte et l'étude des carbonatites et notamment la mise en évidence du gisement de Bingo, Kivu, Zaïre. Une partie importante des connaissances de base et de la méthodologie concernant les carbonatites a été développée durant la période 1955-1967.

La composition minéralogique des sövites d'origine magmatique et la géochimie des calcites, en général le minéral prédominant dans cette phase sont analysées.

Les venues ultérieures amènent un changement radical de la composition minéralogique et de la géochimie de la carbonatite. Le cas complexe du gisement de Bayan Obo, Chine du nord est passé en revue.

Du point de vue économique, les carbonatites et roches alcalines ont pris dans la production minière mondiale une importance croissante comme source principale de Nb, terres rares et accessoirement de phosphates, mais d'autres perspectives existent. Une analyse des activités belges et de la Communauté Européenne, qui restent peu connues concernant les carbonatites est décrite. Elle contient aussi quelques résultats d'études récentes.

MOTS-CLES: carbonatites, minéraux économiques, Zaïre.

ABSTRACT. Origin, mineralogy and actual economic importance of carbonatites. The contribution from Belgium and the European Union. After a short introduction on the origin of carbonatites, this publication remembers the important role of Belgian geologists and the European Community in the discovery and study of carbonatites with emphasis of the discovery of the Bingo carbonatite deposit, Kivu, Zaïre. The basic knowledge and the methodology concerning carbonatites has been largely developed during the period 1955-1967.

The mineralogical composition of sövites of magmatic origin and the geochemistry of calcites, in general the predominant mineral in this phase, are analyzed. The post-sövite phase causes up a sharp change in the mineralogical and geochemical composition of the carbonatites. The complex case of Bayan Obo, Northern China, is reviewed. From an economical point of view, carbonatites and alkaline rocks have assumed in the world mining production an increasing importance as principal sources of Nb, rare earths and accessorially of phosphates but other perspectives exist. Belgian and European Community activities concerning carbonatites remain poorly known. Results of some recent studies are also presented.

KEYWORDS: carbonatites, economic minerals, Zaïre.

1. ORIGINE

Les carbonatites sont liées à des complexes de roches alcalines et localisées le long de fractures majeures de l'écorce terrestre (rift africain - graben du Rhin et d'Oslo, etc ...). Les études isotopiques basées sur le rapport Sr 87/Sr 86 indiquent que les carbonatites et

roches alcalines associées sont dérivées d'une source très profonde (sous le SIAL et probablement en-dessous de la discontinuité Mohorovicic) dans le manteau supérieur (Tuttle & Gittins, 1966).

Jusqu'en 1950, les carbonatites à l'inverse des roches alcalines en général minéralogiquement et

¹ Avenue des Perdrix 26 - B-1950 Kraainem.

pétrographiquement plus connues, ont fait l'objet de peu d'études. Trois pétrographes et minéralogistes Högbom (1895), Brögger (1921) et Daly (1925) avaient déjà invoqué une origine magmatique pour les carbonatites, sans moyens techniques pour étayer cette hypothèse. En 1960, Wyllie et Tuttle proposent une origine magmatique des carbonatites basée sur des expériences en laboratoire à partir du système CaO - CO₂ - H₂O. Ces auteurs montrent que les carbonatites peuvent se former à une température modérée et qu'il peut exister une phase liquide entre 630° et 640° C pour le système précité, ce pour une vaste échelle de pression (27 à 2000 bars). Déjà en 1962, cette conclusion a pu être confirmée par analyses isotopiques du C et de l'O pour les venues de sövite à calcite prédominante du Kaiserstuhl, RFA (Van Wambeke *et al.*, 1964). De plus, ces mêmes analyses isotopiques ont montré que les dolomites barytifères postérieures remplaçant la sövite appartenaient déjà à une phase hydrothermale. Il faut noter qu'auparavant les carbonatites du Kaiserstuhl étaient considérées dans ce complexe alcalin comme des calcaires métamorphisés (marbres). La découverte de laves carbonatitiques en Afrique Centrale en 1960 et ultérieurement confirme aussi l'origine magmatique des carbonatites du type sövite.

En outre, les observations de terrain dans les carrières de Schelingen au Kaiserstuhl montrent que la mise en place de la sövite s'est effectuée par une montée de matériau plastique à la manière des diapirs sous forme d'une série de dômes accolés. La montée du magma en dômes et aussi le dégagement des gaz a amené la formation de brèches volcaniques au toit (Van Wambeke *et al.*, 1964). Ce fait a été également observé dans d'autres intrusions de carbonatites (Tuttle & Gittins, 1966).

La plupart des beforites à dolomite prédominante ont également une origine magmatique (Keith Bell, 1989). Dans la majeure partie des cas, leur mise en place est postérieure à la sövite quand cette dernière est présente dans un complexe alcalin. La majorité des carbonatites à terres rares ont une origine hydrothermale mais il y a des exceptions comme le gisement de Mountain Pass, Californie, U.S.A. considéré comme magmatique (Mariano *in* Keith Bell, 1989).

La mise en place des carbonatites peut produire une fénitisation des roches silicatées encaissantes. Il s'agit d'un processus métasomatique variable en intensité amenant un changement partiel ou même total de la composition des roches silicatées au contact de la carbonatite. La mobilité des éléments chimiques y joue un rôle important. C'est ainsi que localement dans la zone de contact de la carbonatite de la Lueshe, des roches silicatées ont été transformées en vermiculite contenant de la lueshite en cristaux. Par

contre les brèches volcaniques de Schelingen ont subi moins de métasomatose. L'augite a été partiellement substituée par de la biotite et il y a eu une carbonatation partielle de la roche.

Les intrusions de carbonatites se présentent en surface sous diverses formes :

- de massifs elliptiques ou de contour irrégulier qui peuvent parfois atteindre des dimensions importantes (plus de 10 km²) comme les carbonatites de Bingo et d'Araxa ;
- de ring dikes de structure annulaire ou en croissant de largeur variable ;
- de dikes ou de filons d'épaisseur variable.

L'édition canadienne assez récente de Keith Bell (1989) sur les carbonatites fournit un bon nombre de données nouvelles et intéressantes mais parfois contradictoires. Néanmoins, il existe aussi des lacunes concernant les résultats de publications antérieures.

2. MINÉRALOGIE (Kapoustin, 1971)

La composition minéralogique des carbonatites magmatiques du type sövite peut varier assez largement d'un massif à l'autre et aussi dans un même massif. En général, la calcite est le minéral prédominant (plus de 90 % de la roche) à côté de l'apatite, de la magnétite, du pyroxène, de l'olivine, du spinelle, de la phlogopite, de la pérovskite, du pyrochlore et de sulfures. La dolomite est assez rare dans les sövites. Comme exemple de variation de la composition minéralogique d'une carbonatite de type sövite proche de chez nous, nous prendrons le cas du Kaiserstuhl où la roche affleurante apparaît homogène avec quelques variations minérales locales. Un levé magnétique en composante verticale a mis en évidence en 1962 l'existence d'une masse de 12.10⁶ tonnes de magnétite pure (37.10⁶ tonnes comme cubage maximum) au Badberg. Une tranchée à faible profondeur a montré la présence d'une roche riche en magnétite contenant accessoirement apatite, mélilite, calcite (Van Wambeke *et al.*, 1964). Cette masse n'était pas connue auparavant.

De nombreuses sövites montrent des inhomogénéités de composition minéralogique qui peuvent conduire à des zones exploitables (surtout apatite, pyrochlore, magnétite). La calcite des carbonatites, minéral généralement prédominant se caractérise par des teneurs anormales en Sr (0,5 - 0,75 %), en Ba (0,10 à 0,25 %) et en terres rares (0,10 à 0,15 %) ce qui permet de différencier ce type de minéral et son origine des autres calcites (Van Wambeke *et al.*, 1964).

Le tableau I donne la composition minéralogique de quelques sövites où plusieurs phases de cristallisation peuvent se présenter. Le gisement de Palabora en

ARAXA, Minas Gerais, Brésil (Sondages)	FEN, graben d'Oslo Norvège	OKA, Québec Canada	MAGNET COVE Arkansas USA	KAISERSTUHL Baden Württemberg RFA	PALABORA Afrique du Sud - RSA
Calcite Apatite Magnétite Phlogopite Pérovskite Pyrochlore Zircon Barytine* Anatase	Calcite Magnétite Apatite Pyrochlore	Calcite Magnétite Apatite Pyroxène Biotite Forstérite Pyrochlore Niocalite Mélilite Mélanite	Calcite Magnétite Apatite Monticellite Pérovskite Kimzeyite Pyrite	Calcite Apatite Magnétite Magnésioferrite Pyrochlores Pérovskite Latrappite Mossite Phlogopite Sulfures Mélilite	Magnétite Apatite Calcite Dolomite Olivine Vermiculite Hydrobiotite Diopside Sulfures de Cu Baddéleyite

Tableau 1. Composition minéralogique de quelques sövites.

* Barytine d'origine déjà hydrothermale. L'arrivée de solutions riches en Ba amène la formation de bariopyrochlore aux dépens du pyrochlore de la sövite. C'est également le cas à Bingo.

KAISERSTUHL RFA	KANGANKUNDE, MALAWI		EX-URSS	MOUNTAIN PASS, CALIFORNIE		KARONGE BURUNDI
Dolomites	Carb. à ankérite	Type à silice	Plusieurs gisements	Types peu silicifiés	Très silicifiés	
Dolomite Ankérite (Calcite)	Ankérite	(Carbonate, peu)	Dolomite Ankérite (Calcite)	Dolomite Ankérite Calcite (Sidérite)	(Calcite)	
Barytine	Strontianite Barytine	Barytine	(Strontianite) Barytine (Célestine)	Barytine	Barytine	Barytine
(La-Bastnaesite)	(Bastnaesite) (Parisite) (Synchisite)	Bastnaesite (Parisite)	Bastnaesite (Parisite) (Synchisite)	Bastnaesite (Parisite) (Sahamalite) (Monazite)	Bastnaesite	Bastnaesite
(La-Monazite)	Monazite (Florencite)	Monazite (Florencite)	Monazite	(Monazite)	(Monazite)	Monazite (Rhabdophanes)
(Quartz) Hématite Goethite (Mn-Ba-Phlogopite)	(Quartz) Oxydes de Fe (Sulfures)	Quartz Goethite (Sulfures)	Quartz Hématite Goethite (Phlogopite) (Sulfures)	Quartz Hématite Goethite (Phlogopite) (Sulfures)	Quartz Hématite Goethite (Sulfures)	Quartz Goethite (Phlogopite) (Sulfures)

Tableau 2. Composition minéralogique de quelques carbonatites à terres rares. Entre parenthèses, minéraux accessoires. La fluorine est parfois présente.

Afrique du Sud exploité surtout pour le Cu et l'apatite montre une composition minéralogique particulière. Les venues postérieures à la sövite quand elles sont présentes, amènent un changement radical de la composition géochimique et aussi de ce fait de la minéralogie. Ces venues sont enrichies en Mg, Fe, Mn, Ba, Sr, terres rares (surtout Ce et La) avec silicification fréquente. Quand la phase magmatique sövite est présente, il peut exister un remplacement partiel de la calcite primaire principalement par de la dolomite, de l'ankérite ou de la sidérose et le pyrochlore peut subir une lixiviation des cations Na - Ca avec formation de bariopyrochlore (cas de Bingo et d'Araxa), de strontiopyrochlore ou même de

cériopyrochlore. La pérovskite peut être transformée en anatase.

Le tableau II donne la composition minéralogique de quelques carbonatites à terres rares (stade surtout hydrothermal). Le gisement de Karonge, Burundi est l'un des rares gisements de terres rares sans carbonates communs.

L'important gisement de terres rares et de fer de Bayan Obo, N. Chine situé dans une zone de rift particulièrement active depuis la fin du Protérozoïque continue à faire l'objet de controverse mais pourrait bien correspondre surtout à des venues hydrothermales d'origine carbonatitique, mises en

place dans des dolomites métamorphisées (en marbre) d'origine sédimentaire d'âge Protérozoïque (1.400 à 1.800 Ma). Les principales phases de minéralisation (Chao *et al.*, 1989) consistent en :

1. Minéralisation en magnétite et surtout en hématite suivie d'un dépôt de bastnaesite et monazite l'ensemble formant le minerai principal exploité à grain très fin rubanné dans la dolomite ;

2. Minéralisation plus tardive en grain plus grossier de bastnaesite - monazite - (aegyrine) - (aeschnite) d'âge Calédonien (430 Ma) ;

Ces deux phases à l'époque hercynienne ont subi un métamorphisme, des plissements et des intrusions granitiques importantes dans la région ;

3. Minéralisation posthercynienne d'oxydes de fer et de terres rares associée à des sulfures, des feldspaths et des dépôts de silice.

Il est certain que les deux premières phases de minéralisation sont d'origine carbonatitique, tandis que la minéralisation posthercynienne correspond à notre avis à une remobilisation des minéralisations antérieures de fer et de terres rares avec apport principalement d'origine hercynienne. Bayan Obo est un exemple complexe d'interprétation géologique d'une minéralisation importante du point de vue économique.

3. IMPORTANCE ECONOMIQUE DES CARBONATITES ET ROCHES ALCALINES

(Mariano, 1990)

Depuis 1960, les carbonatites et roches alcalines ont pris dans le monde de la production minérale une place de plus en plus importante qui se poursuit. Avant cette date, la carbonatite de Fen, Norvège a produit du minerai de fer principalement à partir d'hématite et les roches alcalines de la péninsule de Kola, Russie de l'apatite où la production se poursuit. Il faut aussi rappeler que dans certaines régions du globe dépourvues de formations calcaires, la calcite des carbonatites est utilisée pour la fabrication de ciment et que la sodalite (roches alcalines) peut servir de pierre ornementale.

Les carbonatites constituent actuellement la source principale de terres rares, niobium et de vermiculite et une source importante pour le phosphate et aussi dans une mesure nettement moindre pour le minerai de fer (magnétite, hématite). En outre, les perspectives de certaines carbonatites sont intéressantes pour le titane, métal en expansion, pour la fluorite et parfois la barytine (Mariano, 1990). Il convient aussi de mentionner l'intérêt croissant pour l'eudialyte des

roches alcalines comme source de zirconium (Groenland, Kola).

3.1. TERRES RARES

Anciennement la monazite associée au zircon et aux minerais titanés des placers littoraux fournissait la majeure partie des terres rares mais avait un grand désavantage celui de contenir en quantité notable du Th, un métal peu utilisé et causant de ce fait des problèmes d'élimination dans l'environnement. Les carbonatites n'ont pas ce problème en général mais il subsiste néanmoins un problème de sélectivité dans le marché des terres rares qui dépend du développement technologique.

Mountain Pass, Californie a été la première carbonatite à fournir des terres rares. Actuellement le marché des terres rares est dominé par la Chine où il existe plusieurs gisements de différents types. La Chine a en quelque sorte un monopole dans ce domaine. D'importantes réserves en terres rares existent également dans certaines carbonatites altérées en milieu tropical. Par exemple, hors de la zone exploitée pour le pyrochlore à Araxa, Brésil, il existe 800.000 tonnes métriques de minerai de terres rares contenant 13,5 % d'oxydes de terres rares (surtout monazite et gorceixite/goyazite). Certaines latérites sont aussi enrichies en Y (xénotime, churchite) et en terres rares de nombre atomique moyen qui sont intéressantes pour la technologie nouvelle mais leur extraction demande des innovations techniques très difficiles à réaliser. Il convient de rappeler que l'altération supergène des carbonatites produit une remobilisation des terres rares contenues dans les carbonates simples et parfois aussi en provenance d'autres minéraux riches en terres rares qui forment souvent les minéraux prédominants de la carbonatite. La majeure partie de la production des terres rares restera basée longtemps sur des carbonatites peu altérées où des processus d'extraction existent.

3.2. NIOBIUM

Les carbonatites du type sovitte et surtout leurs produits d'altération supergène en milieu tropical (Araxa, Bingo, Lueshe) constituent de loin la principale source de niobium. Le Brésil détient le monopole de la production minière de pyrochlore (surtout bariopyrochlore) avec plus de 80 % de la production mondiale en provenance essentiellement du gisement d'Araxa qui contient des réserves considérables où la teneur moyenne des latérites est de 3 % de Nb₂O₅ qui est comparable à celle de Bingo. A titre indicatif, la teneur en Nb₂O₅ à Lueshe est de

l'ordre de 2,5 % (kalipyrochlore principalement). Il faut également ajouter que le Brésil produit du métal, des alliages et autres composés à base de Nb. Le taux de récupération des pyrochlores altérés et autres minéraux assez résistants à l'altération supergène dépend en partie de la composition des sövites et parfois des dolomites sous-jacentes où la teneur en Nb_2O_5 dépasse rarement 0,4 %. La profondeur d'altération supergène des carbonatites est variable mais peut atteindre plus de 50 m et aller jusqu'à plus de 100 m. Il en résulte que dans certains cas rares on peut trouver des gisements de latérites fossiles riches en Nb en dehors de la zone tropicale actuelle (Canada, ex-URSS, etc...).

L'exploitation d'un gisement de Nb en roche pose un problème à cause du monopole du Brésil dans ce domaine et d'autres raisons (par ex : main d'oeuvre). Par contre, le taux de récupération du pyrochlore est élevé et d'autres minéraux accessoires peuvent être récupérés éventuellement (apatite par ex).

Le gisement d'Oka, Québec exploite une sövite à pyrochlore (et continue peut-être à le faire) avec une teneur moyenne de 0,44 % de Nb_2O_5 . Il existe aussi à St Honoré, Québec une autre carbonatite à pyrochlore où la teneur est plus élevée (0,66 % de Nb_2O_5).

3.3. LES PHOSPHATES

La péninsule de Kola, Russie a été le premier grand gisement à fournir à partir de roches alcalines de l'apatite magmatique pour les besoins agricoles et industriels. En fait, la majorité des engrais phosphatés sont fabriqués à partir de phosphates sédimentaires qui contiennent quelques oligoéléments nocifs (Cd, U, As) à l'inverse des apatites magmatiques d'origine de carbonatites, de roches alcalines ou autres. En 1980, les pays scandinaves ont été très sensibles à l'augmentation de la teneur en Cd des sols due à diverses sources dont les engrais. Il en résulta que l'importation des phosphates sédimentaires pour la fabrication d'engrais fut réduite. Il faut néanmoins remarquer qu'une partie de l'approvisionnement en phosphates provenait aussi de Kola. Au début des années 80, l'ex-URSS avait réduit ses exportations d'apatite de Kola et l'intérêt pour les carbonatites et roches alcalines comme source d'apatite magmatique s'est fortement accru avec la mise en exploitation de la carbonatite de Jacupiranga, Sao Paulo, Brésil et de l'apatite de Palabora, Afrique du Sud mine qui produisait déjà du cuivre. Il faut aussi mentionner que l'élimination du Cd lors du traitement des phosphates sédimentaires n'est pas techniquement possible à l'inverse de l'U. La réduction des exportations d'apatite de Kola a amené les pays scandinaves à rechercher et à exploiter de l'apatite magmatique chez

eux. C'est ainsi que les stériles des mines de fer de Kiruna, Suède ont été retraités pour en extraire l'apatite. D'autres sources ont été aussi mises en exploitation en Finlande et Norvège.

Les autres pays industriels n'ont pas adopté la même ligne de conduite que les pays scandinaves pour diverses raisons dont la principale est que certains gisements de phosphates sédimentaires sont exploités par des sociétés européennes, américaines ou autres. Araxa, Brésil produit aussi actuellement de l'apatite magmatique en dehors de la zone exploitée pour le pyrochlore où l'apatite a été complètement décomposée par latérisation intense qui a produit une lixiviation du Ca. Les ressources en apatite magmatique sont importantes en dehors du Brésil et notamment au Canada où il existe des concentrations karstiques d'apatite dite éluviale au moins dans deux gisements associés à des carbonatites. La teneur moyenne dépasse dans ces deux gisements 20 % de P_2O_5 et les réserves sont importantes (Mariano, 1990).

Il convient aussi de rappeler que les apatites primaires liées aux carbonatites et aux roches alcalines contiennent aussi des terres rares à prédominance cérique qui pourraient être récupérées lors du traitement des apatites. La teneur moyenne en oxydes de terres rares dépasse rarement 2%.

3.4. LE TITANE

Des réserves considérables de titane ont été découvertes notamment dans la zone tropicale du Brésil (les états de Minas Gérais et Goias) dans des complexes alcalins associés ou non à des carbonatites. La roche primaire est constituée surtout par des pyroxénites à pérovskite ($CaTiO_3$). En milieu tropical où l'altération supergène peut atteindre jusqu'à 120 m, la pérovskite se transforme en anatase (TiO_2) par lixiviation du Ca comme dans le cas des pyrochlores (lixiviation de Na et Ca avec parfois substitution par K, Ba, Sr ou terres rares). Ces anatases maintiennent dans leur structure les oligoéléments originels les moins mobiles de la pérovskite (Nb, terres rares cériques et Th). Bien qu'il existe des gisements latéritiques à haute teneur en Ti (20 % et plus en TiO_2) où l'anatase est facilement récupérable, l'inconvénient majeur des concentrés est celui de contenir du Th en faible quantité (< à 0,1 % de Th) ce qui pose un problème d'élimination du Th pour l'industrie.

Une solution possible est le traitement sur place de l'anatase pour la fabrication d'oxyde de Ti permettant une élimination du Th et de ses produits de désintégration radioactifs sous une forme insoluble pour l'environnement. Cela ferait une plus value commerciale pour le Brésil.

4. LA CONTRIBUTION BELGE ET DE LA COMMUNAUTE EUROPEENNE A L'ETUDE DES CARBONATITES ET ROCHES ALCALINES

D'une manière générale dans le monde, il y a eu deux périodes d'études assez intensives des carbonatites et roches alcalines associées dont la dernière date d'environ un décennie.

L'étude minéralogique et géochimique des carbonatites et aussi leur prospection a connu une première période de grand développement principalement entre 1955 et 1967 (Tuttle & Gittins, 1966) période qui fut aussi marquée par des progrès techniques et méthodologiques importants : analyses géochimiques, isotopiques et minéralogiques, développement de nouveaux instruments de recherche et de prospection comme le scintillomètre. Ces études ont fourni les bases scientifiques nécessaires à la connaissance des carbonatites et à leur mise en valeur. La participation belge d'une part et de la communauté européenne d'autre part a été assez importante mais reste peu connue.

C'est à cette époque que furent découverts au Kivu, Zaïre les gisements de carbonatites à Nb de la Lueshe (1956) (Meyer & de Bethune, 1958) et de Bingo (1958) (Van Wambeke, 1960). La mise en évidence de ce dernier gisement localisé en pleine forêt équatoriale et en absence d'affleurements fut réalisée d'abord par une prospection scintillométrique autoportée. Cette prospection a montré l'existence d'une anomalie radiométrique importante sur près de 5 Km le long de la route traversant la zone (radioactivité 4 à 5 fois le background des régions granitiques). Ensuite les échantillons de sols latéritiques prélevés ont été analysés en fluorescence X et comparés aux sols du gisement de Nb d'Araxa, Brésil qui était encore à cette époque dans une phase d'exploration et d'étude préliminaire (Guimaraes, 1957). Cette analyse semi-quantitative a montré une très grande similitude géochimique : anomalies géochimiques importantes en Nb, Sr, Ba et terres rares et rapport Nb/Ta très élevé pour Araxa et Bingo. Cette association géochimique se retrouvait aussi dans les sols de la carbonatite de la Lueshe mais avec des teneurs moindres pour les terres rares et surtout le Ba. Bingo était donc bien une carbonatite. Il était aussi nécessaire de rappeler ici avec un peu plus de détails la découverte du gisement de Bingo et surtout la méthodologie de prospection utilisée dans un environnement géologique particulièrement difficile. En outre, le coût des investigations préliminaires a été très faible et de courte durée pour mettre en évidence l'existence d'une carbonatite à Bingo.

En ce qui concerne le gisement de carbonatite de la Lueshe, découvert par A. Meyer, les conditions

géologiques étaient plus simples vu les affleurements existants et par la présence de pyrochlore dans les alluvions (Meyer & de Bethune, 1958). Ce gisement a été repris par la Minière des Grands Lacs (M.G.L.) et étudié postérieurement du point de vue minéralogique (Safiannikoff, 1959 ; Van Wambeke, 1964, 1978). Outre la lueshite, a été mis en évidence la présence de kalipyrochlore, le principal minerai de Nb dans la zone d'altération du gisement et plus rarement de colombite (souvent pseudomorphe du pyrochlore) et de fersmite. Le problème des déficiences cationiques dans les pyrochlores de la zone d'altération avait déjà été décrit et discuté à cette époque (Van Wambeke, 1970).

Il convient aussi de rappeler la découverte à la même époque des filons à bastnaesite - monazite de Karonge au Burundi (Thoreau *et al.*, 1958) qui ont été exploités pour la production de terres rares en particulier pour l'Eu destiné notamment à la TV en couleur. En absence de roches alcalines au voisinage immédiat du gisement de Karonge, l'origine de cette minéralisation a été quelque peu controversée mais ces filons de bastnaesite - monazite - barytine dépourvus de carbonates simples (calcite, dolomite, ankérite, sidérose) appartiennent aussi à une phase finale hydrothermale de différenciation carbonatitique (Van Wambeke, 1977).

Dans le cadre d'Euratom, la première équipe multinationale et pluridisciplinaire européenne dont trois scientifiques belges a entamé dès 1961 une étude du complexe alcalin et des carbonatites du Kaiserstuhl (Van Wambeke *et al.*, 1964). Ces études ont fourni non seulement des données nouvelles et fondamentales concernant l'évolution minéralogico-géochimique de ces roches mais aussi la méthodologie de prospection des carbonatites. Quelques résultats ont été déjà mentionnés dans cette communication.

A l'échelle mondiale, cette première période d'investigation des carbonatites et accessoirement des roches alcalines a alimenté une grande partie des bases méthodologiques nécessaires à l'étude et à la prospection des carbonatites.

Après une assez longue période de calme relatif sauf dans le domaine du traitement et de la valorisation des minéraux des carbonatites et parfois des roches alcalines, on assiste à un regain d'intérêt de R & D pour ces types de roches étant donné leur potentiel économique. En plus de 20 ans, 130 nouvelles occurrences de carbonatites ont été découvertes (Keith Bell, 1989) mais il faut dire qu'un nombre très restreint de carbonatites pourrait présenter un intérêt économique (par ex. peut-être Mabounié au Gabon). Dans le cadre du programme matières premières de la

Commission des Communautés Européennes qui a évolué depuis 1986 vers des actions multinationales, plusieurs projets relatifs aux carbonatites ont été sélectionnés.

- un projet de télédétection utilisant les images Landsat dans le S.W. du Groenland a mis en évidence des anomalies spectrales (rust zones) notamment dans le complexe alcalin du Motzfeldt (Conradsen *et al.*, 1986) où existait uniquement une carte pétrographique. Ces anomalies ont fait l'objet d'un levé au sol et d'une étude détaillée (Tukiainen, 1988). La minéralisation formée surtout par un pyrochlore riche en terres rares et en Ta essentiellement localisée en bordure et au toit du complexe est caractérisée par une hématitisation intense des syénites hyperalcalines. Un traitement statistique de l'ensemble des données (Landsat y compris les linéaments, photos aériennes, géochimiques et géophysiques) réduit une dimension de pixel de 50 m x 50 m a permis de localiser les zones minéralisées les plus favorables où la teneur moyenne atteint 0,4 % de Nb₂O₅, 0,04 % de Ta, 0,04 % de terres rares et 1 à 2 % de ZrO₂. La teneur en Ta est largement supérieure à celle des carbonatites en général comme à Meponda, Mozambique qui a une minéralisation assez similaire. Malheureusement, compte tenu ici de l'altitude (> 1000 m) et de l'accessibilité, toute exploitation est pratiquement impossible. Néanmoins la méthodologie de prospection existe. Un court résumé en est donné dans deux publications de la C.E. (Tukiainen, 1988 ; Van Wambeke, 1984).

Plusieurs autres carbonatites de l'ouest du Groenland ont été étudiées. La plus intéressante est la carbonatite de Qaqarssuk minéralisée en apatite, Nb et terres rares. L'expérience en Afrique (cas de Bingo) et dans le cadre des Communautés Européennes me permet de dresser des lignes directrices (guidelines) pour la prospection préliminaire de minéralisations liées aux carbonatites et roches alcalines quand certaines données existent.

- Recensement des données existantes dans une région;
- Utilisation de la télédétection (images Landsat, Thematic Mapper, Spot préalablement traitées) et aussi des photos aériennes et parfois radar pour la reconnaissance éventuelle de carbonatites ou de complexes alcalins (analyses linéamentaires et anomalies spectrales). Ces anomalies spectrales sont surtout applicables en régions où la végétation est absente ou peu développée ;
- Résultats des levés radiométriques gamma (aériens ou autoportés) surtout en région tropicale où les minéraux radioactifs se concentrent dans les latérites par dissolution des carbonates (cas de Araxa, Lueshe, Bingo). Résultats d'une prospection aéromagnétique. Cela aurait pu être le cas de Bingo où la magnétite est

présente mais absente dans beaucoup d'autres occurrences ;

- Prospection alluviale préliminaire caractérisée par un rapport Nb/Ta élevé et par la présence d'autres oligoéléments indicateurs (Ba, Sr, terres rares).
- Analyses des sols et des roches permettant une reconnaissance quasi certaine de teneurs anormales en oligoéléments associés aux carbonatites et aux roches alcalines (cas d'Araxa, Bingo, Lueshe).

Il y a donc un choix dans les méthodes de prospection préliminaire à faire qui est variable suivant l'environnement en général. Une analyse des données existantes est une étape importante pour orienter les recherches et la méthodologie à appliquer. Elle peut réduire le coût de cette première phase de prospection. En 1989, le programme matières premières des Communautés Européennes évoluait non seulement vers des projets multinationaux mais exigeait, chose nouvelle, une participation industrielle.

Un des projets retenu avec participation de trois laboratoires (B, F, U.K.) dont celui de géologie et de minéralogie de l'U.C.L. et aussi de l'U.L.B. pour la géochimie isotopique avec comme partenaire industriel la Gesellschaft für Electrometallurgie (GfE) a concerné les deux gisements de carbonatites de la Lueshe et de Bingo (Van Wambeke, 1989).

Le but principal du projet était d'acquérir une connaissance plus approfondie de la distribution et de la chimie du pyrochlore et des minéraux associés dans les différents types de minerais latéritiques en vue d'améliorer la récupération du pyrochlore et de pouvoir orienter l'exploitation minière. Les résultats de ce projet ont été fructueux.

En résumé pour la Lueshe, ce projet a montré que :

- les minerais latéritiques apatitiques et crandallitiques (Al et Fe) étaient les plus riches en Nb, le kalipyrochlore étant de loin le principal minéral de Nb à côté d'autres espèces de pyrochlore. Tous ces pyrochlores présentent de larges déficiences en cations qui augmentent la teneur en Nb du minéral. Cela avait déjà été mis en évidence antérieurement (Van Wambeke, 1964) ;
- l'interprétation de la variabilité géochimique et minéralogique a d'importantes implications sur la géométrie des zones minéralisées et sur la gestion des réserves de Nb ;
- la teneur maximale en Nb se retrouve dans les latérites les plus altérées et est aussi en relation avec la teneur de la roche-mère.

Les observations de terrain effectuées par des belges durant ce contrat (Albers *et al.*, 1994 ; Van Overbeke *et al.*, 1995) ont montré la séquence suivante de mise en place : syénite à cancrinite → beforsite → sövite avec augmentation de la teneur en Nb de ces

intrusions où la beforsite est nettement d'origine magmatique.

Une étude de la concentration et des réserves de phosphates a été aussi effectuée.

En ce qui concerne la carbonatite de Bingo (6 x 4 km) peu connue mais qui présente un potentiel économique considérable mais est couverte par un épais manteau de latérites et caractérisée par très peu d'affleurements (1 de carbonatite !) des progrès déjà sensibles ont pu être réalisés dans le cadre de ce projet de la C.E.

- Une première carte géologique de ce massif alcalin et des carbonatites a pu être réalisée malgré la rareté des affleurements ainsi qu'une séquence probable des intrusions ;

- Une première étude pétrographique et minéralogique de ce complexe ;

- Le principal minéral de Nb, le bariopyrochlore dans une carbonatite fraîche de Bingo a été étudié. Il est très différent selon les auteurs par sa composition des pyrochlores frais de la Lueshe (faible teneur en Nb₂O₅, haute teneur en SiO₂, pas de teneur mentionnée en P₂O₅) (Van Overbeke *et al.*, 1995).

Hors une analyse exécutée en 1971 (Van Wambeke, 1971) sur le bariopyrochlore de Bingo (pandaïte à cette époque) au moyen de la microsonde de Castaing et aussi en diffraction a montré l'existence fréquente de filonnets de quartz et de crandallite contenant un peu de Ba, Sr, et terres rares) dans ce minéral. Ceci explique clairement à la fois la faible teneur en Nb et la haute teneur en SiO₂ mentionnée plus haut par les auteurs dans les conclusions du rapport des C.E.

Malheureusement, malgré les bons résultats obtenus par ce projet communautaire pour les deux carbonatites où la flottation du pyrochlore avait obtenu des résultats appréciables (> de 60 % de récupération) l'étude de ces deux gisements a dû être arrêtée à cause de l'instabilité politique de l'Afrique Centrale depuis mi-1994.

Actuellement, en partie dans le cadre de l'I.N.T.A.S. (U.E.) destiné aux pays de l'ex-U.R.S.S., deux projets belges sont en cours dans la péninsule de Kola, l'un du laboratoire de géologie appliquée de l'U.Lg. concernant les apatites des roches alcalines, l'autre du laboratoire de pétrographie de l'U.L.B. sur une carbonatite découverte récemment. D'autre part, la GfE (D) et l'U.C.L. comptent étudier la carbonatite de Sokli dans le même environnement que celui de Kola et peut-être Mabounié au Gabon.

5. BIBLIOGRAPHIE

ALBERS, K., ALEGRIA, B., MEIXNER, K.I., SCHUURMANN, B., PHILIPPO, S., NAUD, J.,

VERKAEREN, J., NASSOURI, M., BILAL, E., GARCIA, D., GRUFFAT, J.J., GUY, B., MOUTTE, J., WALL, F., WILLIAMS, C.T. & WOOLLEY, A.R., 1994. Applied Mineralogy of Pyrochlore and Related Minerals in the Weathering Zone of the Niobium Deposits of the Lueshe and Bingo Carbonatites, Zaïre E.C. Contract, 138 p (unpublished).

CHAO, E.T.C., MINKIN, J.A. *et al.*, 1989. The H8 Dolomite Host Rock of the Bayan Obo Iron - Niobium - Rare earth Element Ore Deposit of Inner Mongolia, China. Origin, Episodic Mineralization and Implications. USGS Circular 1025 - Summary.

CONRADSEN, K., THYRSTED, T., NIELSEN, B.K. & NILLSON, G., 1986. The Use of Remote Sensing in Mapping of Oxidized Zones and Lineaments in Greenland. Summary of E.C. contracts in the First European Workshop on Remote Sensing in Mineral Exploration, 112-125.

GUIMARAES, D., 1957. Relatorio sobre a jazida de pirochlore de Barreiro, Araxa, Minas Gerais. *Dep. Mac. Prod. Min. Bull.*, 103.

KAPOUSTIN, Y.L., 1971. Minéralogie des carbonatites (en russe). Science Moscou (Ed.), 286 p.

KEITH BELL, 1989 : Carbonatites, Genesis and Evolution. Unwin-Hyman (Ed.), London, 618 p.

MARIANO, A.N., 1990. Nature of Economic Mineralization in Carbonatites and Related Rocks. Special Report, 64 p.

MEYER, A. & de BETHUNE, P., 1958. La carbonatite de Lueshe, Kivu, Congo Belge. *Serv. Geol. Congo belge Bull.*, 8/5.

SAFIANNIKOFF, A., 1959. Un nouveau minéral de niobium. *Acad. Sc. Outre-Mer*, 6: 1251-1255.

THOREAU, J., ADERCA, B.M. & VAN WAMBEKE, L., 1958. Le gisement de terres rares de la Karonge, Urundi. *Académie Royale des Sciences d'Outremer, Classe Sc. Nat. & Médicales*, N.S. 4: 684-715.

TUKIAINEN, T., 1988. Niobium-Tantalum Mineralisation in the Motzfeldt Centre of the Igaliko Nepheline Syenite Complex, South Greenland. *In: Mineral Deposits within the European Community*, 230-246.

TUTTLE, D.F. & GITTINS, J., 1966. Carbonatites. Interscience Publishers, 591 p.

VAN OVERBEKE, A.C., DEMAIFFE, D. & VERKAEREN, J., 1995. Le complexe à carbonatite et syénite de la Lueshe (N.E. Zaïre). *Géochimie et chronologie Rb/Sr* 2 p (à publier).

VAN WAMBEKE, L., 1960. Geochemical Prospecting and Appraisal of Niobium - Bearing Carbonatites by X-ray Methods. *Econ. Geol.*, 55/4: 732-758.

VAN WAMBEKE, L., 1964. A Study of some Niobium-Bearing Minerals of the Lueshe Carbonatite Deposit. *Rep. EUR 2110*, e, 31 p.

VAN WAMBEKE, L., 1970. The Alteration Processes of the Complex Titano-Niobo-Tantalates and their

consequences. *N. Jb. Miner. Abh.*, B112: 117-144.

VAN WAMBEKE, L., 1971. Pandaïte, Baddeleyite and Associated Minerals from the Bingo Niobium Deposit, Kivu, Democratic Republic of Congo. *Min. Deposita*, 8: 153-155.

VAN WAMBEKE, L., 1977. The Karonge Rare Earth Deposits, Rep. of Burundi : New Mineralogical - Geochemical Data and Origin of the Mineralization. *Miner. Deposita*, 12: 373-380.

VAN WAMBEKE, L., 1978. Kalipyrochlore a New Mineral. *Am. Min.*, 63: 328-330.

VAN WAMBEKE, L., 1984. La Télédétection appliquée à la recherche minière. *Bull. Soc. belge Géol.*, 94/3: 187-196.

VAN WAMBEKE, L., 1989. The Role of the European Commission in Exploration and

Perspectives of the European Community for the Supply of Raw materials. MIRO Symposium, London, 18 p.

VAN WAMBEKE, L., HUBAUX, A., TONGIORGI, E., VERFAILLIE, G., WEBER K., WIMMENAUER W. *et al.*, 1964. Les roches alcalines et carbonatites du Kaiserstuhl. Rapport EURATOM 1827 d., f., e., 250 p.

WYLLIE, P.J. & TUTTLE, D.F., 1960. The System CaO - CO₂ - H₂O and the Origin of Carbonatites. *J. Petrology*, 1: 1-46.

Manuscrit reçu le 28.08.1995 et accepté pour publication le 06.06.1996.