carbonatites et minéralisations

Les carbonatites et les gisements de Niobium qui leur sont associés ont constitué une partie dominante de l'activité contractuelle et scientifique du département Géochimie entre 1992 et 2005. Les cibles concernées ont été successivement

▷ le complexe de Lueshe (Kivu, R.D.Congo)

▷ le complexe de Sokli (péninsule de Kola, Finlande)

▷ les complexes carbonatite - phoscorite – roches alcalines de la péninsule de Kola (Russie).

C'est notre capacité en analyse élémentaire qui est à l'origine de notre implication dans le premier projet, sur le gisement de Lueshe, et en particulier, la possibilité, par l'emploi conjoint de différentes méthodes (XRF et ICP-AES), de développer des méthodes d'analyse pour des roches de composition inhabituelle telles que des minerais et concentrés riches en éléments rares (Nb, Ta, Th, U, Zr, ...).

Il s'agissait en effet d'apporter un appui à l'entreprise exploitant Lueshe (GfE, Nürnberg) pour la compréhension géologique du gisement, la typologie des minerais, et pour le développement de procédés de flottation adaptés aux différents types de minerai.

Ces travaux ont été effectués dans le cadre de projets européens BRITE-EURAM, consacrés à Lueshe puis à Sokli, coordonnés par la GfE. La caractérisation des minerais et des roches associées a été réalisée grâce à une collaboration étroite entre trois équipes chargées des tâches suivantes:

= Chimie du pyrochlore (British Museum, UK),

= Compositions modales par diffraction X quantitatives (UCL, Louvain-la-Neuve, Belgique),

= Géochimie des minerais et des latérites (Géologie, EMSE).

Les connaissances acquises au cours de ces projets nous ont conduits à participer ensuite à un projet de recherche (projet INTAS coordonné par NHM, avec Université de Saint Pétersbourg et l'Académie des Sciences de Russie à Apatity) consacré aux minéralisations en métaux rares de la péninsule de Kola, c'est à dire à plusieurs exemples de complexes alcalins à carbonatites et phoscorites (Sokli, Kovdor, Vuorijärvi, Turyi Mys).

carbonatites et minéralisations du complexe de Lueshe, Zaïre

En parallèle avec le travail analytique effectué sur les échantillons fournis par GfE pour le projet industriel, une étude géologique a été réalisée, basée sur un ensemble différent d'échantillons, récoltés dans les anciennes galeries d'exploration pour phosphates. Cet échantillonnage géologique est différent de l'échantillonage fourni par GfE pour la caractérisation du minerai. Au lieu d'un nombre relativement restreint d'échantillons moyens prélevés à des fins industrielles, nous avons analysé un grand nombre (260) d'échantillons de petite taille (environ 10 cm). Alors que les échantillons industriels peuvent correspondre à des mélanges de différents faciès d'altération, l'échantillonage géologique a pour objectif de définir en détail les transitions entre les différents stades de l'altération (par exemple, des faciès à apatite à ceux à crandallite), et de retracer, par une appproche géochimique, la structure fine du gisement.

Par ailleurs, 100 échantillons de roches fraîches ont été analysés, pour constituer une base de données de la géochimie des protolithes possibles des minerais latéritiques.

La méthodologie mise au point à l'occasion du projet industriel a été appliquée pour analyser les évolutions géochimiques en termes d'assemblage de phases.

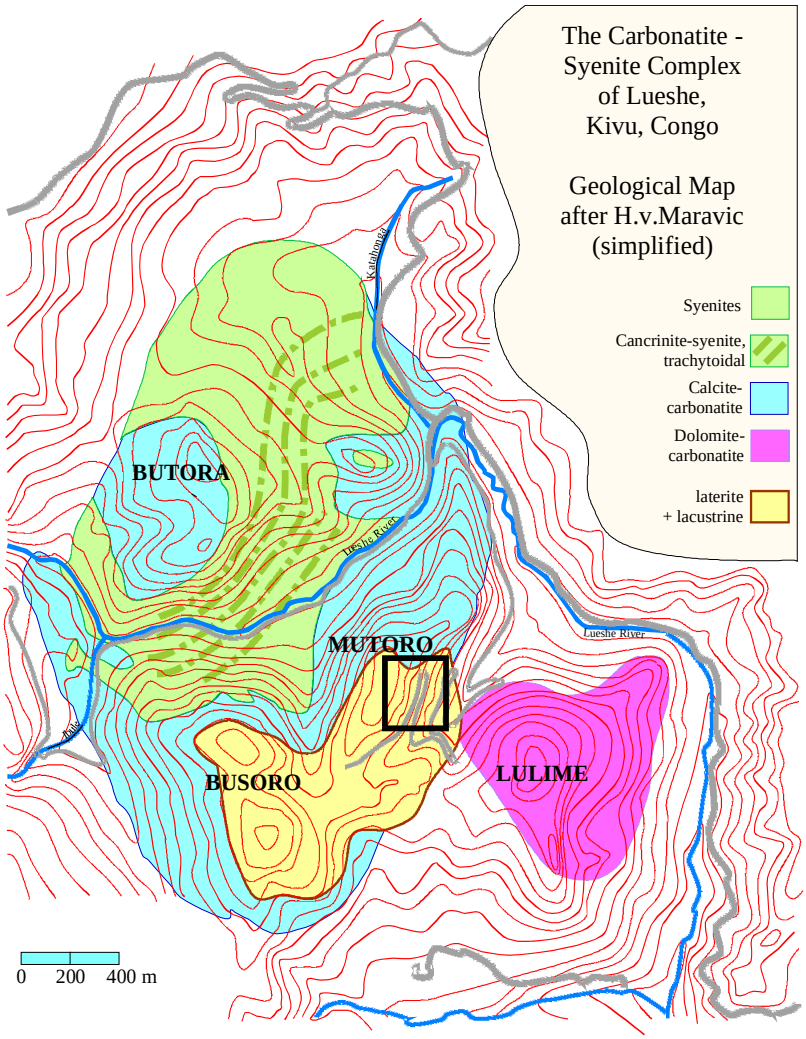
géologie du complexe de Lueshe

Le complexe de Lueshe [H von Maravic (thèse, Berlin, 1983)] comprend deux unités (***fig. 1***):

= un plug composite de cancrinite syénite à cancrinite et de calciocarbonatite à aegyrine.

= un plug de magnesiocarbonatite, sans roches silicatées associées.

La calciocarbonatite contient de nombreux "nodules" feldspathiques dérivées d'inclusions syénitiques. Un premier enrichissement en Niobium est associé à ces «nodules», et aux aegirinites à apatite développées le long des contacts entre syénites et calciocarbonatites.



C'est sur les calciocarbonatites que se développe le gisement de Niobium de Lueshe. L'élimination du carbonate par dissolution est un facteur essentiel de l'enrichissement en pyrochlore, et ce processus précoce est suivi par une évolution complexe des silicates, oxydes, et phosphates, qui contrôle la nature et la distribution des différents de types de minerais, et leur traitement minéralurgique.

géomorphologie

La morphologie de la zone de Lueshe reflète deux grandes étapes d'évolution du relief:

<1. la formation d'une pénéplaine ancienne, qui est représentée par le plateau Bitobitoba, situé au Nord, à 1700 m d'altitude; on peut associer à ce stade des restes de cuirassement ferrugineux et les dépôts limniques / lacustres actuellement observés sur les sommet des collines;

<2. un soulèvement régional récent, probablement associé à l'activité du Rift, qui a conduit à une forte dissection, et à une altération supergène en conditions de fort drainage les long des zones disséquées.

En raison de la dynamique particulière de l'altération de roches riches en carbonate, les plugs de carbonatite, en particulier la magnésio-carbonatite de Lulime, tendent à former des collines entourées par les syénites plus profondément érodées.

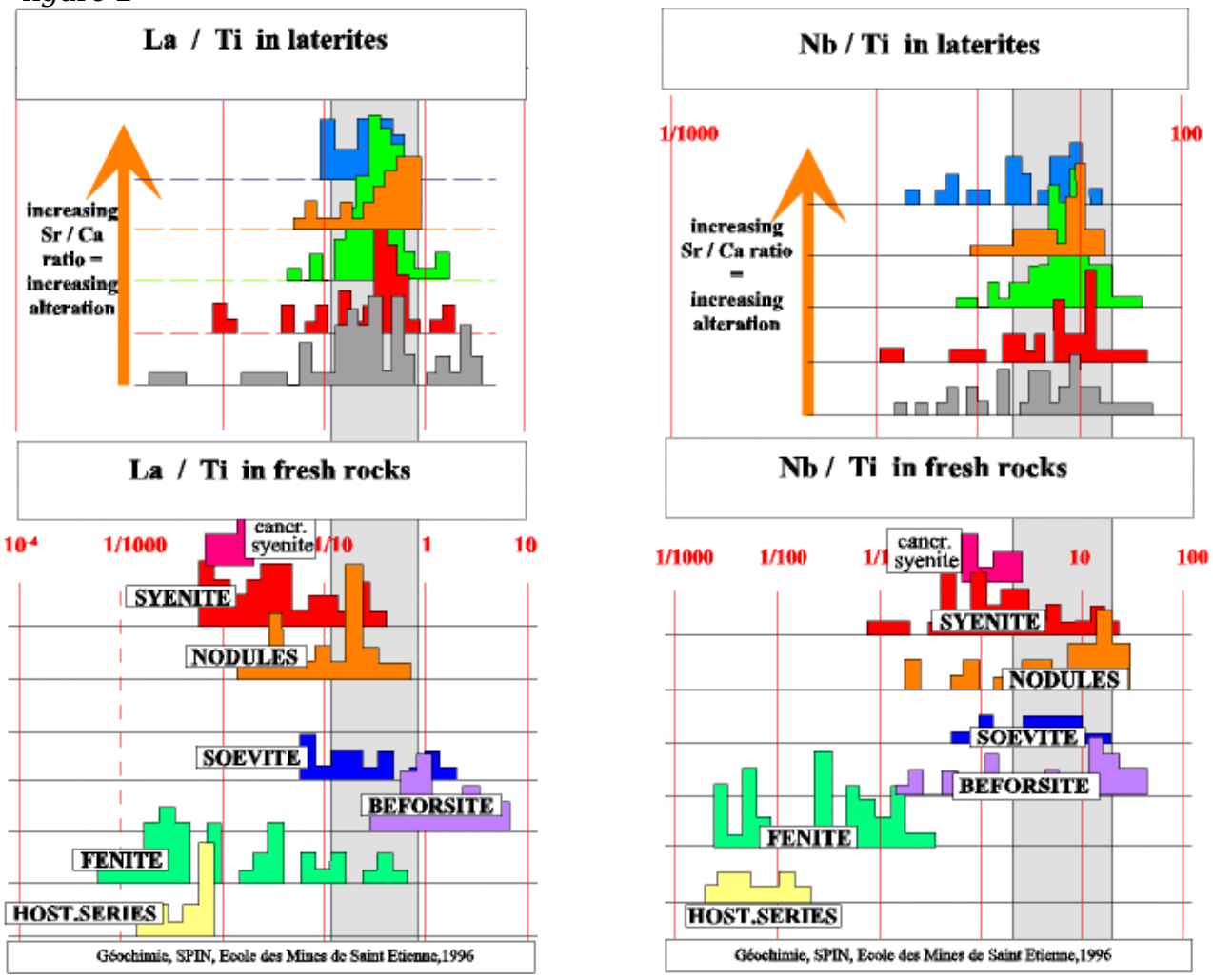
les protolithes des latérites du gisement

Les latérites développées sur roches silicatées comprennent souvent une zone assez épaisse à texture préservée qui permet de reconnaître le protolithe, mais cette zone est pratiquement absente dans celles issues de roches riches en carbonate, dont

l'ossature est largement dissoute, ce qui se traduit par des structures d'effondrement et des remaniements importants. D'après les observations de terrain, les latérites minéralisées de Mutoro se développent sur des calciocarbonatites, mais celles-ci peuvent avoir été fortement hétérogènes, du fait d'une densité variables d'enclaves de syénites et pyroxénites. De plus, la présence d'altérites allochtones dans la partie supérieure du gisement (par exemple les formations fluvio-lacustres), il est possible que des latérites transportés soient impliquées dans les protolithes.

Une comparaison géochimique entre latérites et roches fraîches, basée sur des ratios entre éléments, peut être utilisée pour évaluer les protolithes possibles, mais la variabilité géochimique éventuellement élevée conduit une approche statistique à l'aide d'histogrammes (fig. 2), au lieu des diagrammes binaires classiques.

- figure 2 -



Les rapports inter-éléments entre Ti, Nb, Zr, La illustrés par ces diagrammes (fig. 2) donnent des signatures assez contrastées pour les différents protolithes possibles, et une signature géochimique définie pour la population de latérites du gisement: les latérites prélevés à Mutoro résultent essentiellement de l'altération in situ de calciocarbonatite et des nodules associés, sans apport significatif de latérites allochtones développées sur le socle.

géochimie des latérites et évolution supergène de l'assemblage de phases

Le profil d'altération se caractérise par une évolution conjointe des minéraux phosphatés (apatite → crandallite → wavellite), et des silicates (feldspath →

kaolinite).

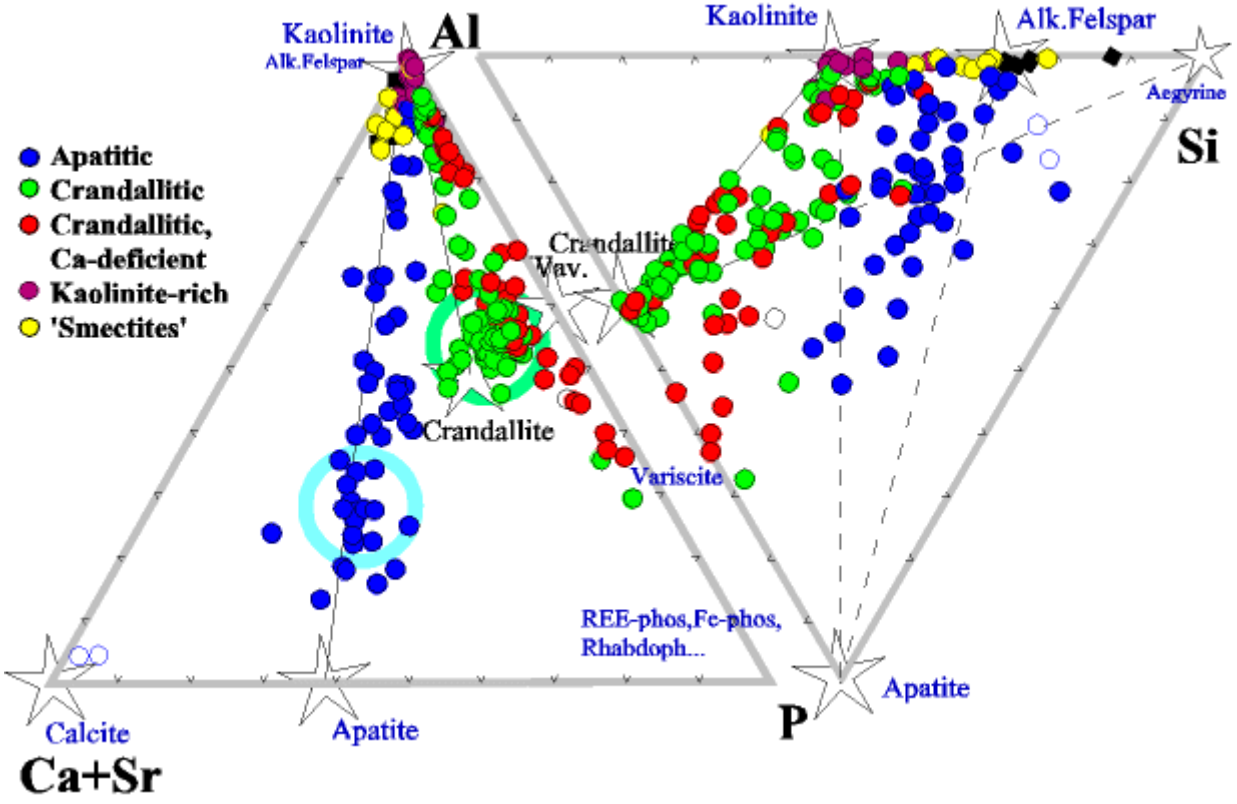
Cette évolution peut se lire directement sur des projections en nombres d'atomes (diagrammes (Ca+Sr):P:Al, Si:Al:P, Si:Al:(Na+K), fig. 3 et 5), où les compositions des latérites tendent à se distribuer suivant des lignes de contrôle représentant les paragénèses spécifiques des différentes zones.

Le lessivage du calcium apparaît comme un trait esentiel de l'évolution géochimique, procédant par étapes. Sr est également lessivé, mais moins rapidement que Ca, ce qui se traduit par une augmentation de Sr/Ca, vers le haut du profil, dans les faciès à phosphates secondaires. Alors que les latérites à apatite présentent un rapport Ca/Sr homogène (fig. 4), similaire au rapport CA/Sr de l'apatite des protolithes, le rapport Ca/Sr varie largement dans les faciès à phosphates d'Al, allant jusqu'à 50% en goyazite normative.

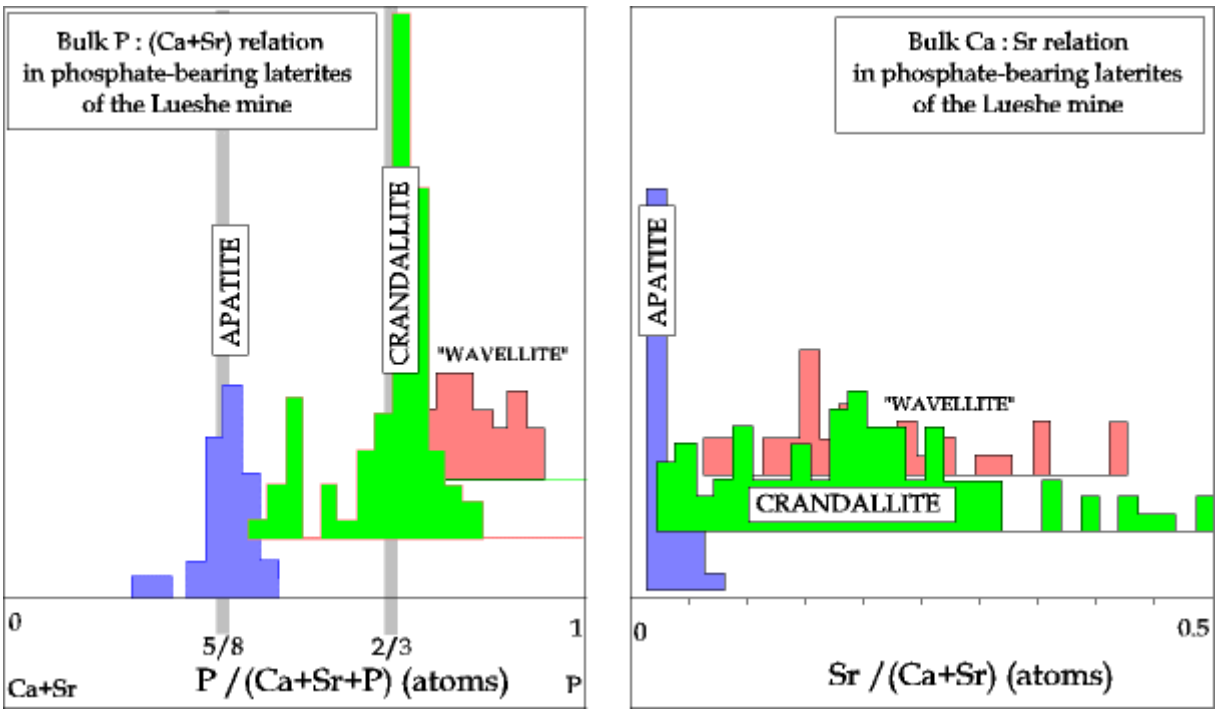
La kaolinite est le silicate supergène dominant. Elle se forme essentiellement à la suite de la destruction des feldpaths, qui par ailleurs rend disponible l'aluminium pour la formation des phosphates secondaires. Cette corrélation paraît clairement sur les diagrammes triangulaires (joints feldspath-apatite et kaolinite-crandallite).

Une particularité du profil d'altération de Lueshe, par rapport à d'autres gisements supergènes sur carbonatites (Mabounié, Sokli), est l'absence d'apatite secondaire de type francolite (carbonate-apatite). Cet absence d'enrichissement absolu en phosphore en bas de profil peut s'expliquer par la position topographique du gisement, qui est telle que l'altération s'est effectuée en conditions de fort drainage, en grande partie en zone non saturée.

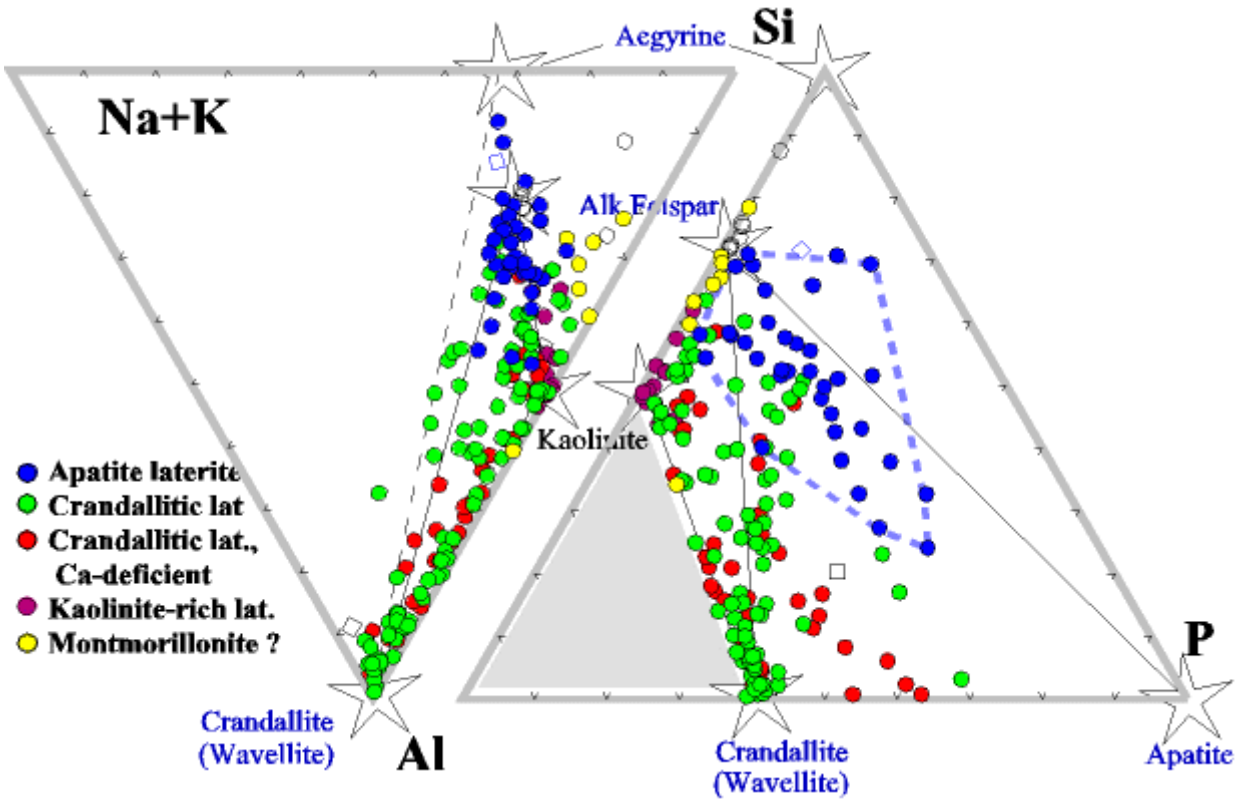
- figure 3 -



- figure 4 -



- figure 5 -



calcul normatif

L'approche normative développée pour interpréter les compositions chimiques en termes de minéralogie s'appuie sur deux paramètres essentiels de l'évolution supergène des latérites: d'une part le rapport Ca/P de l'assemblage phosphaté, d'autre part le rapport Si/Al de l'assemblage silicaté.

Les principales étapes du calcul sont:

<> convertir les données en nombres d'atomes pour 1 kg de roche; Fe + Mn + Ti

sont supposés former des oxydes; ils ne sont pas pris en compte dans la suite des calculs

<Phosphates>

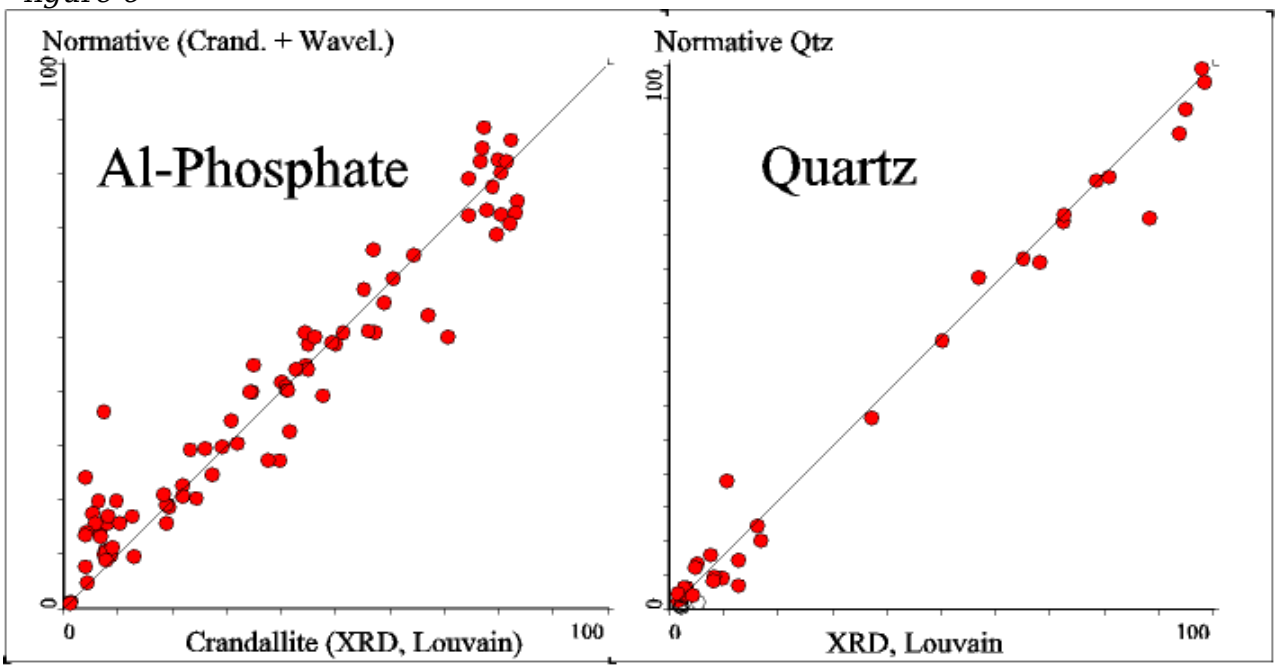
```
Ca:=Ca+Sr
IF (Ca > 5/3 P) THEN
  (Calcite + Apatite)
ELSE
  IF (Ca > 1/2 P) THEN
    (Apatite + Crandallite)
  ELSE
    (Crandallite + Wavellite)
Al:= Al - (Al in Phosphate)
```

<Silicates>

```
admettant que Na,K sont dans les feldspaths alcalins,
Si:= Si – 3.(Na+K)
Al:= Al - (Na+K)
redistribuer Si,Al en kaolinite + quartz
ou en  kaolinite + montmorillonite
```

Ce schéma a été validé sur les échantillons du projet industriel, pour lesquels on dispose à la fois des données modales par DRX quantitative (U. C. Louvain) et des données de roche totale. Les diagrammes suivants (fig. 6) illustrent les corrélations obtenues sur les phosphates d'aluminium et sur le quartz (les échantillons riches en quartz proviennent de la partie supérieure de la mine).

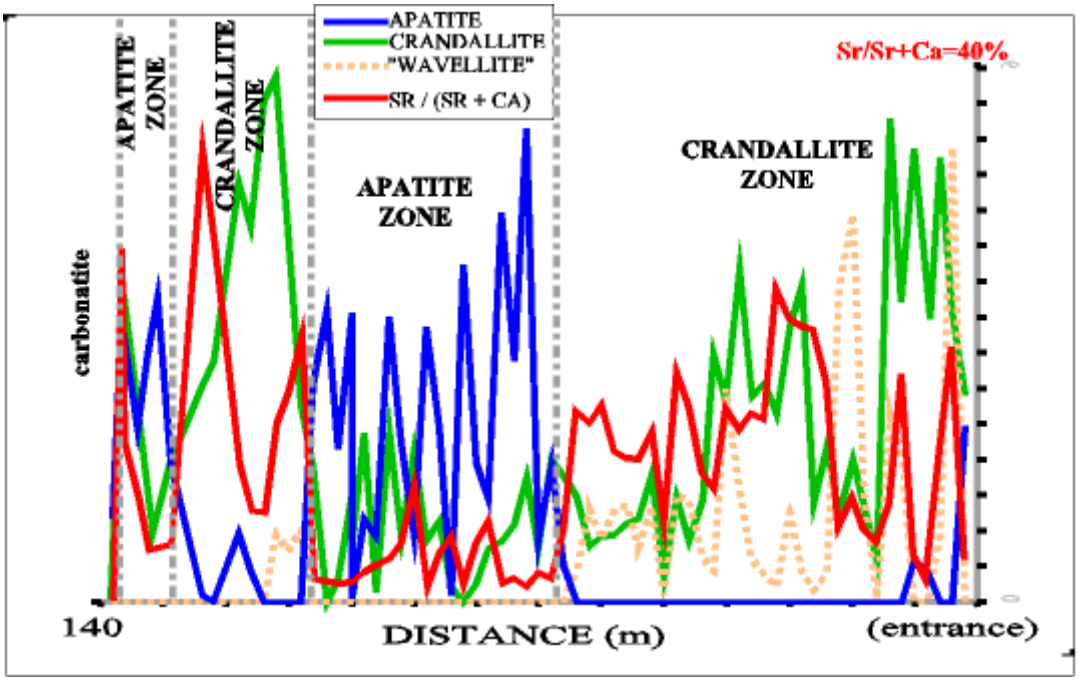
- figure 6 -



fine-scale and 3D structure of the deposit

La galerie 8 (foncée en 1960 pour l'exploration des phosphates), qui traverse le gisement à l'altitude 1500 m sur une longueur de 140 mètres, a permis une étude détaillée des différents faciès, de la carbonatite fraîche aux faciès à crandallite (fig. 7). On notera que des faciès à crandallite se développent en partie à proximité de la carbonatite fraîche, tandis que la partie centrale comprend des latérites à apatite.

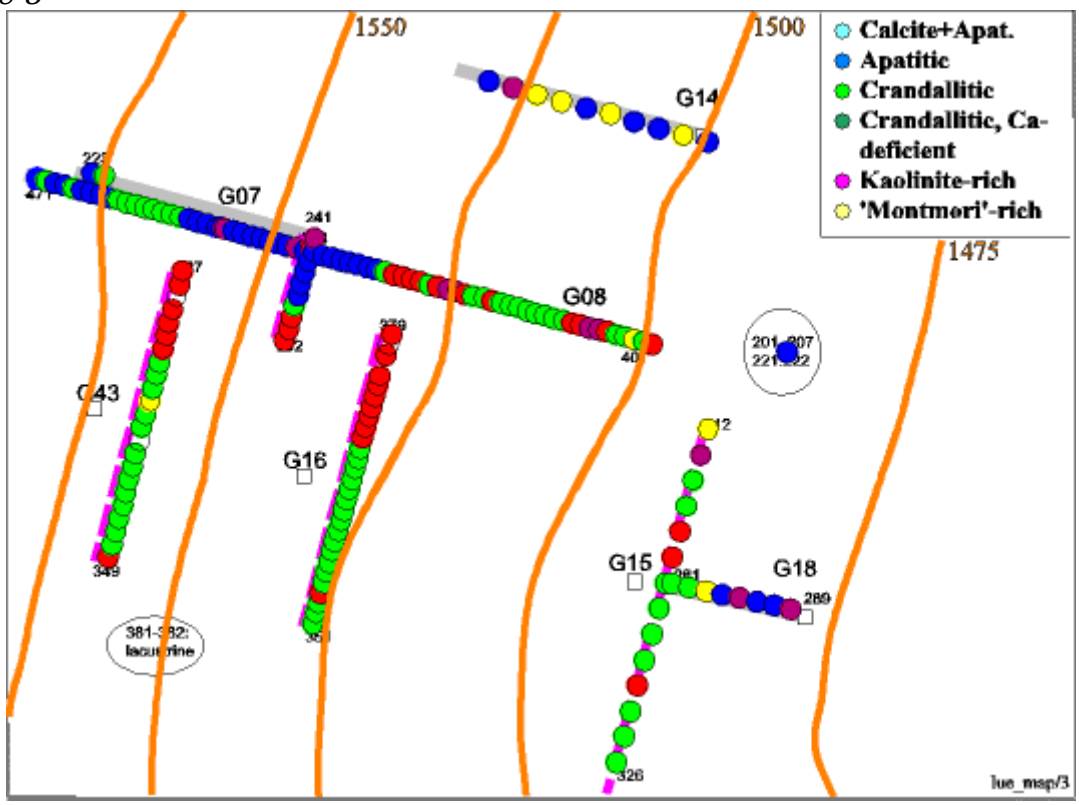
- figure 7 -



carte géochimique

Cette carte (fig. 8) illustre la distribution des différents faciès normatifs de latérites. La densité d'échantillonage élevée (2 m) permet de tracer précisément les limites entre les différentes zones. Au Nord (galerie G14), la présence d'échantillons à "montmorillonite" normative peut s'expliquer par des conditions de drainage faible dans des altérites dérivées de roches silicatées (syénites formées par fénitisation des paragneiss).

- figure 8 -



conclusions

Ainsi, une fois que la liste des paragénèses possibles a été établies à partir d'échantillons représentatifs des différentes zones du système d'altération supergène, la géochimie globale devient un outil efficace pour une analyse systématique des paragénèses. La productivité élevée des méthodes analytiques de routine (XRF, ICP-AES) rend possible une analyse systématique à forte densité d'échantillonage.