

La nature des roches volcaniques et le lien avec leur formation

Dominique Rossier, animateur de la Commission de volcanisme de la SAGA.

Introduction

Dans les Entretiens de pétrologie endogène, donnés depuis un an à la Commission de volcanisme de la SAGA, nous cherchons à revisiter les bases du magmatisme et du volcanisme à la lumière des avancées récentes. Nous reprenons en cela la tradition des « Entretiens pédagogiques », initiée il y a des années par notre collègue Alain Guillon. Ils sont aussi le moyen de répondre aux questions qui surgissent à l'occasion des voyages d'étude que nous conduisons, année après année, dans les grandes régions volcaniques de notre pays.

Notre intérêt pour le volcanisme et le magmatisme nous conduit naturellement à nous familiariser avec la classification des roches volcaniques, et avec les notions fondamentales de différenciation et de série magmatique. Chaque série commence par un type particulier de basalte, résultat du refroidissement d'un liquide magmatique.

Par ailleurs, nous connaissons ces roches très particulières que sont les péridotites¹, dont on est maintenant à peu près sûr qu'elles sont représentatives du manteau supérieur. Elles aussi présentent une assez grande variété ; à l'occasion de nos voyages d'étude, nous en avons récoltées et observées².

*Or, nous savons que les **liquides basaltiques** sont issus de la fusion partielle de ces roches du manteau, et qu'il y a bien « production de liquides dans le manteau ».*

¹ Ces silicates de magnésium et de fer, assemblages d'olivine et de pyroxènes, sont caractéristiques des roches du manteau. Dans le manteau supérieur, ils sont complétés par des oxydes de fer, magnésium et aluminium (spinelles), ou des aluminosilicates magnésiens (grenat pyrope) à plus grande profondeur. Quand les hasards de la tectonique les ont propulsés vers la surface de l'écorce terrestre, on les désigne par le terme de *lherzolites*.

² En Aubrac et en Devès en particulier, sous la forme de nodules dans les basaltes.

Une des questions qui se posent à nous est de comprendre dans quelles conditions se forment ces liquides, et quelles sont les transformations qu'ils subissent lors de leur montée vers la surface de la terre, et lors de leur séjour dans les chambres magmatiques. En fin de compte, il s'agira d'approfondir le lien entre d'une part les péridotites avec toutes leurs variantes et leurs associées (lherzolites, pyroxénites...) et, d'autre part, les basaltes avec leurs séries magmatiques différenciées. Mais ce sujet fera l'objet d'un second article.

*Pour ce premier article, c'est des séries **magmatiques différenciées** que nous partirons, pour mener notre enquête, et pour tenter de clarifier le thème énoncé dans le titre. Ceci nous a conduit à introduire les notions encore peu familières de **norme CIPW**, et de **composition normative**, ainsi que celle d'**indice de différenciation**. Elles font maintenant partie du langage international et du mode de raisonnement pratiqués par tous les volcanologues. La présentation des diagrammes tétraédriques de Yoder et Tilley conclut l'article : ces diagrammes apportent une représentation visuelle bien utile pour se repérer dans les phénomènes physico-chimiques de différenciation.*

Un index des mots-clés est donné en clôture.



Figure 1. Nodule de péridotite, Devès.

1. Classification des roches volcaniques.

Composition des basaltes et des séries magmatiques

1.1. Séries magmatiques.

Diagramme TAS, « total alkalis-silica »

Il existe une classification internationale des roches volcaniques : c'est celle du « diagramme TAS » (qui signifie *total alkali vs silica*), où les types de roches volcaniques sont classés en fonction de leur taux d'oxydes d'alcalins Na_2O et K_2O , en regard du taux moléculaire de silice. On distingue classiquement deux grandes familles de « séries », ou « lignées », en partant du constat que les basaltes sont différenciés en arrivant en surface et que cela tient non seulement à la variété initiale des liquides produits en profondeur, mais aussi aux conditions mêmes, de pression et de température, du processus de différenciation. Le premier terme d'une série, à caractère « basique », est presque toujours un basalte.

Ainsi, on distingue (figure 2 et figure 4) :

1. les séries tholéïtiques³, ou encore calco-alkalines.

La caractéristique principale de ces roches est la présence de silice libre, sous forme de quartz. Pour cette raison, elles sont dites « sursaturées »⁴. L'olivine est absente, car elle est incompatible avec le quartz. Le basalte tholéïtique, premier terme de la série, est plus ou moins alumineux. Ces séries tholéïtiques sont typiques des dorsales (ou rides) médio-océaniques et de la croûte océanique.

Ainsi, elles se retrouvent comme termes supérieurs des complexes ophiolitiques. Mais on les trouve aussi dans les « trapps »⁵, qui sont de grandes nappes de laves sur des aires continentales stables (Parana au Brésil, Deccan en Inde), issues d'un volcanisme fissural. Elles constituent aussi une faible fraction initiale des « volcans boucliers »⁶, comme dans les îles Hawaii. Les termes différenciés de la série calco-alkaline sont les « andésites », les « dacites » et, *in fine*, les « rhyolites ».

³ De Tholey, en Allemagne.

⁴ *Roches sursaturées* : ce sont les roches magmatiques où le quartz est présent à l'état libre, et où les feldspathoïdes sont exclus. Quand ni le quartz ni les feldspathoïdes ne sont présents, on les dit *saturées*. Le quartz est complètement absent dans les roches *sous-saturées*, qui peuvent donc contenir des feldspathoïdes.

⁵ *Trapp* (de *trappar* en suédois, escalier). Empilement de coulées de laves régulières et horizontales (coulées stratoïdes), épaisses de 5 à 15 m, sur des surfaces couvrant plusieurs milliers de km².

⁶ Accumulation de laves basaltiques très fluides édifiant des cônes à faible pente (4° à 6°), sur des surfaces de plusieurs centaines de km².

Une présentation un peu plus élaborée de la classification TAS est donnée sur la figure 4. Elle distingue la « série andésitique », proche et juste au-dessus de la série tholéïtique. Entre les deux séries, il n'y a pas de différences de types de roches, mais seulement de taux d'alcalins.

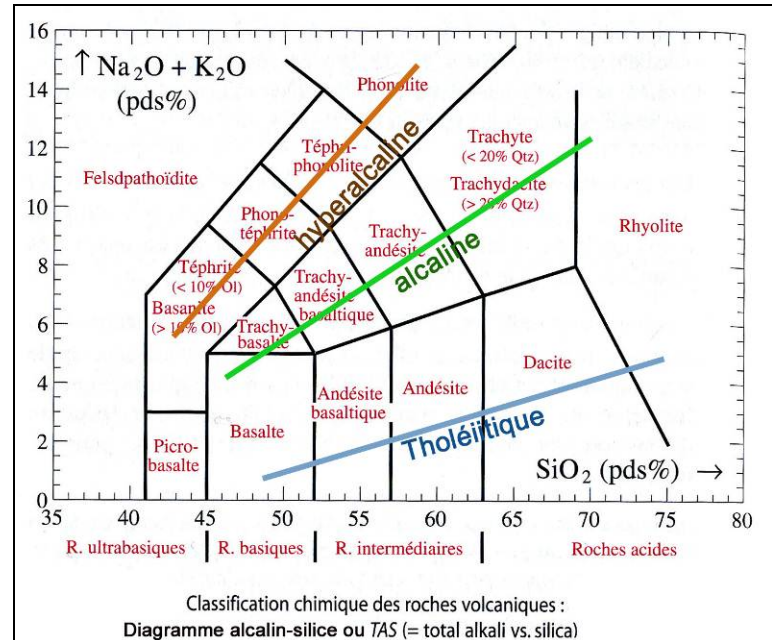


Figure 2. Le « pavage » du schéma aide à visualiser les deux familles de séries magmatiques : celle des laves tholéïtiques, et celle, dite alcaline, qui peut être dédoublée pour faire apparaître la série hyperalkaline, plus riche en feldspathoïdes. (D'après : Géologie, roches et géochimie (2011). A. Provost et C. Langlois. Dunod éd.).

[Attention : les analyses sont toujours présentées en pourcentages pondéraux d'oxydes].

2. les séries alcalines et hyperalkalines.

Elles sont « saturées » à « sous-saturées » (absence de silice libre, voir note 4), et peuvent donc contenir de l'olivine. Elles contiennent bien plus de Na_2O et de K_2O que les séries tholéïtiques. Les premiers termes peuvent s'exprimer, les premiers termes portent les noms de « basanites » (plus de 5 % de *néphéline*) et de « néphélinites » (plus de 10 % de *néphéline*), puis viennent les « hawaiiites ». Dans l'ancienne dénomination, ces premiers termes étaient suivis dans l'échelle de différenciation par les « trachy-andésites », puis les « trachytes », et les « phonolites ».

Ces séries alcalines sont caractéristiques du volcanisme continental, de celui des « arcs insulaires »⁸

⁷ En général, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$. Si $\text{K}_2\text{O} = \text{ou} > \text{Na}_2\text{O}$, ces basaltes sont dénommés *shoshonites*.

⁸ Arc insulaire : chapelets d'îles associés à une zone de subduction, correspondant aux portions émergées d'un bourrelet bordant certaines fosses océaniques, du côté opposé à l'océan.

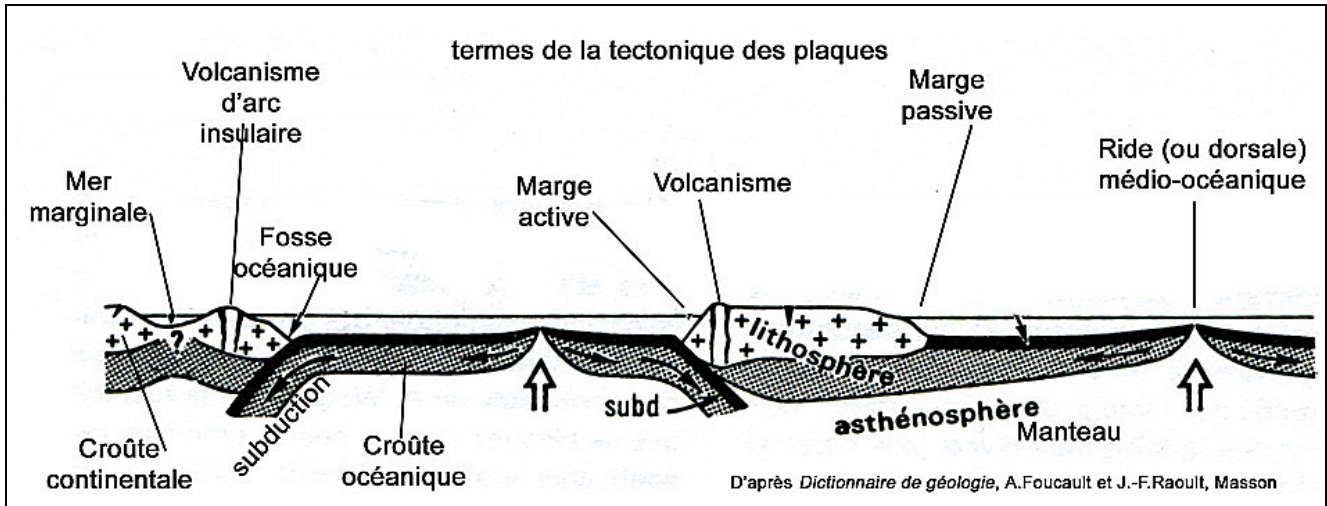


Figure 3. Terminologie de la tectonique des plaques.

évolués et des « marges continentales actives », c'est-à-dire au voisinage des zones de subduction.

La terminologie, propre à la tectonique des plaques, utilisée ici, est illustrée sur la **figure 3**.

Dans sa version la plus récente, la classification TAS a introduit dans les séries alcalines et fortement alcalines, au-dessus du terme « trachy-andésites », les dénominations « mugéarite » et « benmoréite », dont on verra plus loin des exemples importants dans les roches volcaniques de la chaîne des Puys,

et celle des monts Dore que nous avons visités au mois de septembre 2012.

Les termes ultimes de différenciation entre les deux séries alcaline et fortement alcaline (ou encore hyperalcaline) ne sont pas les mêmes. En effet, les flèches sur la **figure 4** indiquent des « rebroussements » opposés, respectivement vers les « rhyolites » pour la série moyennement alcaline et vers les « phonolites » pour la série fortement alcaline.

1.2. Limite de Miyashiro.

Un minéral important mais insaisissable : la néphéline⁹ !

Il existe une frontière entre les séries moyennement et fortement alcalines, d'une part, et les séries subalcalines, tholéiitiques et andésitiques, d'autre part. Elle a été établie et déterminée quantitativement par Miyashiro (1978) (**figure 5**).

C'est une frontière importante, car bien définie en termes de ratio alcalins/silice. Quelles en sont les conséquences pour les basaltes correspondants ?

- Premièrement, **à teneurs en silice égales**, les basaltes alcalins ont toujours une teneur en alcalins plus élevée que celle du basalte subalcalin correspondant. C'est au-dessus de la frontière de Miyashiro que les feldspathoïdes comme la *néphéline* peuvent apparaître.

- Deuxièmement, *néphéline* et *quartz libre* sont absolument exclusifs l'un de l'autre.

Un basalte alcalin ne contient pas de quartz libre, il est dit « sous-saturé » (voir note 4) ; il contient « virtuellement » de la néphéline, et parfois celle-ci s'exprime. Exemple : une « basanite est un basalte qui contient plus de 5 % de néphéline.

⁹ Du grec *nephelê*, nuage.

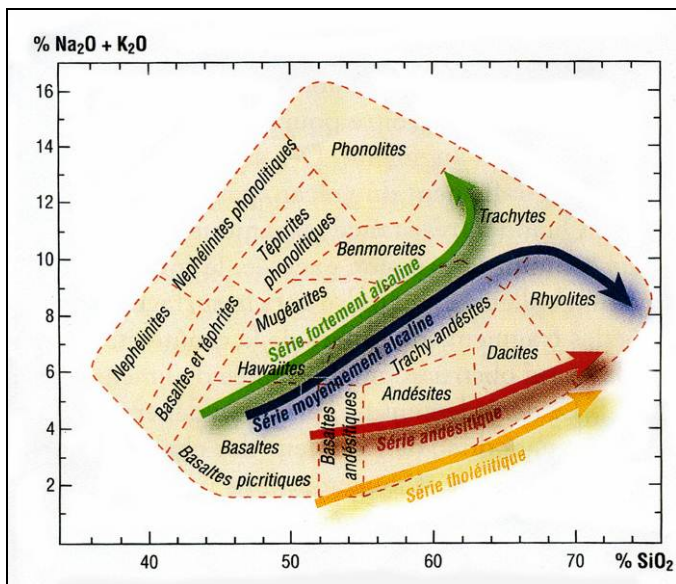


Figure 4. Diagramme TAS faisant apparaître quatre séries. Elles sont matérialisées par les quatre flèches de couleur. Noter, pour les deux séries alcalines, les rebroussements en sens inverse des extrémités des flèches, vers des termes des deux séries bien distincts : rhyolites d'une part et phonolites de l'autre.

(Tiré du Guide des volcans de France. Pascal Richet (2003). Éd. BRGM-Belin). [Attention : les pourcentages sont en poids].

Si elle n'est pas observable à l'état de phénocristaux, la néphéline est présente virtuellement dans la « mésostase ». C'est ce que nous verrons quand nous introduirons la notion de « norme » (dans la seconde partie), et nous donnerons à ce minéral toute son importance.

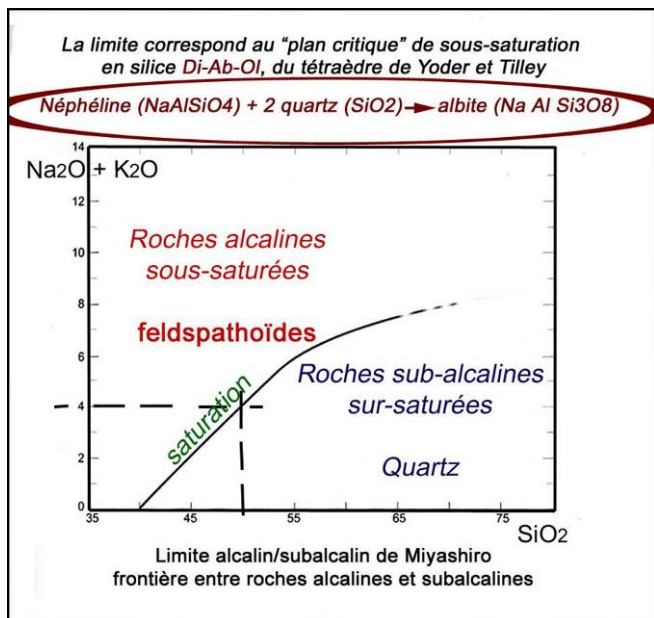


Figure 5. Diagramme de Miyashiro.
[Attention : les pourcentages sont en poids].

Retenons cependant que la néphéline, bien que normalement abondante dans une roche sodique à déficit de silice, est difficile à déceler dans les basaltes, même sur lame mince ! En général, elle se présente en plages xénomorphes (voir Index des mots-clés), incolores à troubles, moulant les autres cristaux, et très faiblement biréfringentes. Mais elle peut aussi apparaître en petits cristaux de forme hexagonale ou carrée (figure 7). C'est dans les phonolites, terme final de la différenciation des séries hyperalcalines, qu'il est le plus facile de les observer, à l'œil nu, sans ambiguïté.

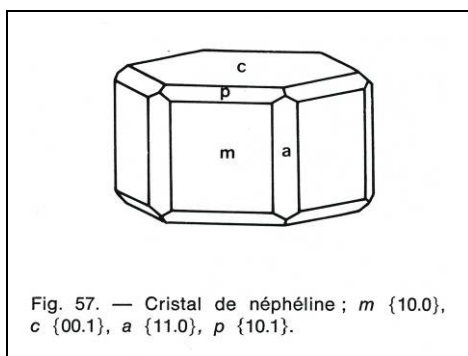


Figure 7. Tiré de Les minéraux (1977), Bariand et al., éditions BRGM.

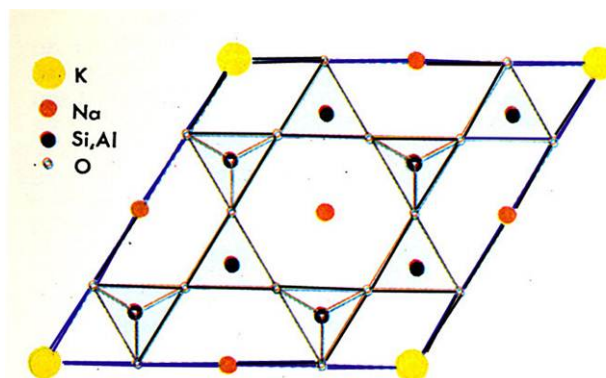
Feldspathoïdes, néphéline...

On regroupe, sous le nom de feldspathoïdes, des tectosilicates (silicates en charpente, à tétraèdres polymérisés en réseau tridimensionnel) moins riches en silice que les feldspaths de composition comparable. Le taux de substitution de Si par Al est plus important : ils ont un caractère plus alumineux, et aussi plus alcalin. Ils sont aussi plus riches en éléments de symétrie.

L'impossibilité de la coexistence entre quartz et feldspathoïdes s'explique par l'existence de composés feldspathiques intermédiaires.

(Voir la réaction décrite figure 5).

- Exemple : la néphéline, Na₃KAl₄Si₄O₁₆, où un tétraèdre sur deux est substitué, est à comparer à l'anorthose (Na,K)AlSi₃O₈, qui peut se réécrire (Na,K)2Al₂Si₆O₁₆. La structure est hexagonale (figure 6).



STRUCTURE IDÉALE DE LA NÉPHÉLINE
(montrant la relation avec la tridymite)

Figure 6. Dans cette structure hexagonale de la néphéline, les ions Al⁺⁺⁺ occupent la moitié des sites tétraédriques, comme dans la tridymite (phase haute pression de la silice).

Les ions alcalins Na et K (en rouge et en jaune) occupent les espaces libres de la charpente.
(Tiré de Roches et minéraux, Sorell Sandström, éd. Broquet).

- Autre exemple : la leucite KAlSi₂O₆, où un tétraèdre sur trois de silice est substitué en alumine, est à comparer à l'orthose KAlSi₃O₈.

Les feldspathoïdes sont souvent enrichis d'ions sulfates : noséane, haiüyne...

Les feldspathoïdes sont assez rapidement déstabilisés quand la pression augmente, et en présence d'eau.

Un exemple de détection de la néphéline dans une basanite d'Aubrac, sous-saturée et hyperalcaline, est donné dans le diaporama des « Entretien de pétrologie endogène ».

1.3. Exemples de séries magmatiques. Où les trouver ?

1.3.1. Série tholéiitique

Les basaltes tholéiitiques sont typiquement les roches de la croûte océanique, mais aussi des grands épanchements continentaux que sont les trapps. Un exemple de différenciation est donné par les « islandites », andésites fréquentes en Islande.

1.3.2. Série andésitique

Un exemple a été donné dans le numéro « Spécial anniversaire » de *Saga Information* n° 290, octobre 2009. Il s'agit du paléovolcan de l'Ossau (*figure 8*).

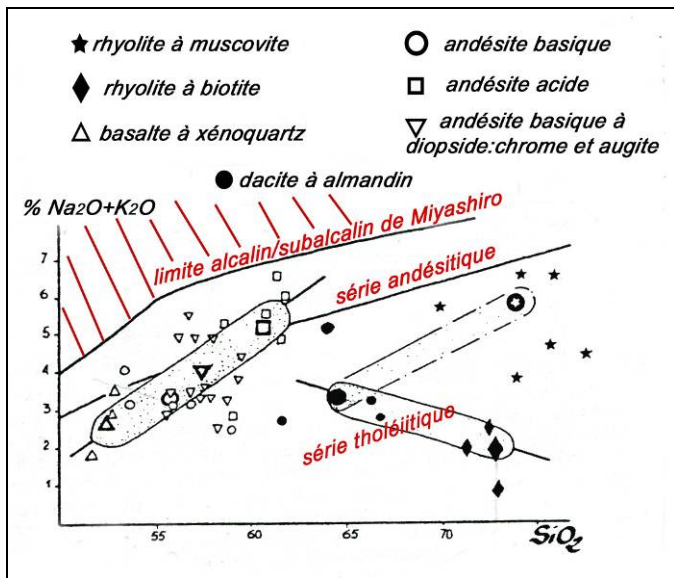


Figure 8. Ce diagramme rassemble tous les types de roches volcaniques à compositions différenciées rencontrées dans la région de la caldera de l'Ossau. Pour F. Bixel, auteur de l'article cité ci-dessous, dont est extrait le diagramme, la majorité des roches présentent la tendance homogène de la série andésitique : ce sont celles qui sont signalées par un symbole blanc (carré, triangle ou cercle). Toutefois, le tout premier épisode d'émission du système volcanique a produit des laves et des cendres de composition plus proche de la série tholéiitique : symboles noirs. Leurs compositions chimiques et minéralogiques laissent supposer une origine crustale, par fusion du toit de la chambre magmatique par le magma ascendant. (D'après : Structure du complexe volcanique de l'Ossau (Pyrénées-Atlantiques). F. Bixel, bulletin du BRGM, section 1, n° 3, 1973).

1.3.3. Série alcaline

Un exemple classique est donné par les laves de la chaîne des Puys (*figure 9*).

Il s'agit d'un ensemble homogène, où la tendance moyennement alcaline est cohérente entre les différents prélèvements. La série est sous-saturée jusqu'aux trachytes ; seul le terme ultime des rhyolites contient du quartz libre.

La terminologie, pour désigner les termes successifs de différenciation dans la série, a évolué, comme nous l'avons signalé dans le § 1.1 : les « trachy-basaltes » sont désignés par le terme *hawaïite*, les « trachy-andésites basaltiques » par le terme *mugéarite*, et les « trachy-andésites » par le terme *benmoréite*.

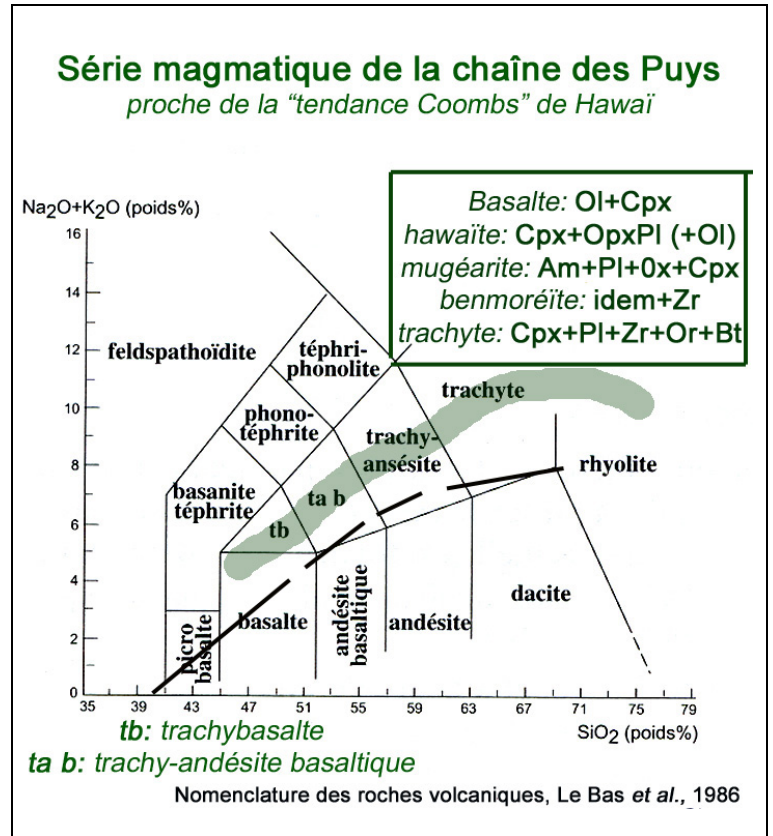


Figure 9. Les constituants sont, dans l'ordre d'apparition à partir des basaltes : **Ol** : olivine ; **Cpx** : clinopyroxène, dont **Di**=diopside ; **Opx** : orthopyroxène, dont **En**=enstatite et **Hy**=hypersthène (> 30 % Fe) ; **Pl** : plagioclases ; **Am** : amphibole ; **Or** : orthose ; **Bt** : biotite.

Cette série a également été abordée en détail à l'occasion du voyage d'étude de la Commission de volcanisme dans le massif du Mont-Dore (septembre 2012).

1.3.4. Série hyperalcaline

Assez exceptionnelle, cette série se rencontre dans le rift africain, mais aussi au Vésuve, où elle donne la « téphrite à leucite ». On peut également y classer l'« ordanchite » (Banne d'Ordanche, massif du Mont-Dore), la trachy-phonolite de cette série, contenant de la *haiïne*¹⁰.

La série hyperalcaline se distingue de la série alcaline par un taux d'alcalin supérieur au taux d'alumine.

¹⁰ *Haiïne*, feldspathoïde avec ions Na, Ca et sulfate, de couleur bleue, uniquement dans les phonolites.

1.3.5. Cumulats

Les coulées des laves des séries alcalines sont parfois parcourues de filons de couleur très sombre, souvent porphyriques¹¹, à cristaux de pyroxène parfois centimétriques, et d'olivine : ce sont les « ankaramites » (voir note 11 et **figure 10**), basaltes mélanocrates à augite dominante. Leur intérêt provient de ce que ces variétés ont été enrichies en phénocristaux par cumulation au bas de la chambre magmatique.

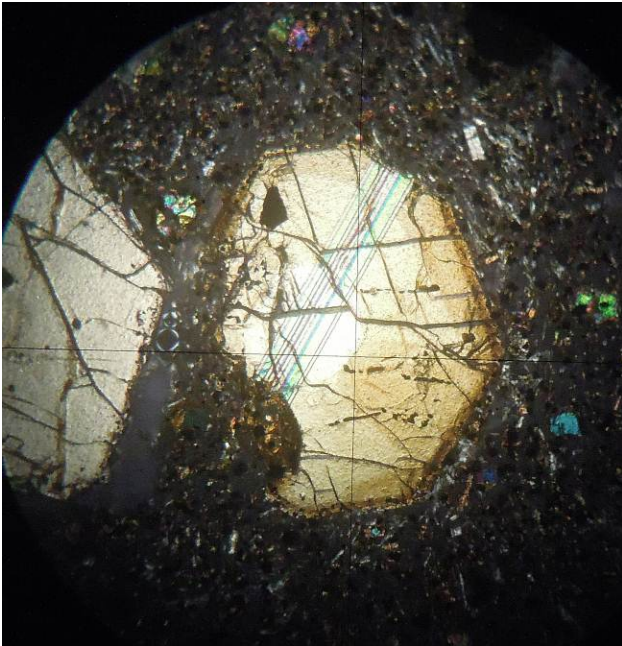


Figure 10. Ankaramite, Pas de Cère, Cantal. LPA. Échelle 1/40. Section normale d'une augite maclée.

2. Composition des basaltes. Composition chimique vs composition minérale

2.1. Analyse modale et Norme CIPW

De prime abord, la comparaison des compositions **chimiques** globales de tous types de basalte donne des résultats homogènes et finalement relativement proches. On peut parler d'une composition typique donnée pour les principaux constituants par les chiffres moyens suivants :

50 % de SiO₂, 16 % de Al₂O₃, 7 % MgO, 7 % FeO,
4 % Fe₂O₃, 3 % Na₂O, 2 % TiO et 1 % K₂O.

D'un basalte à l'autre, les valeurs changent assez peu. Mais ce caractère est trompeur ; en réalité, les

¹¹ Porphyrique : désigne une roche volcanique présentant des cristaux de grande taille au sein de la phase vitreuse.

compositions « minérales », c'est-à-dire les proportions des principaux constituants minéraux, diffèrent sensiblement : en effet, l'apparition ou la disparition de telle ou telle phase minérale est très sensible non seulement à la composition, mais aussi aux conditions de formation et de refroidissement du basalte. C'est pourquoi il est important de caractériser un basalte ou un différencié par sa composition minérale, c'est-à-dire sa composition en composants minéraux essentiels.

L'analyse visuelle des minéraux réellement présents est dite « modale » : les minéraux réellement identifiés, par exemple en lame mince, sont les minéraux modaux. Or, les roches volcaniques sont incomplètement cristallisées, et cette analyse modale se révèle insuffisante ! La phase vitreuse ou micro cristallisée peut occuper la quasi-totalité du volume d'une lave, ce qui rend l'identification visuelle problématique. On a alors recours à l'analyse chimique. Mais à l'inverse, comment la traduire en termes de minéraux présents ?

C'est pour répondre à cette question que les géochimistes américains Cross, Iddings, Pirsson et Washington ont proposé un protocole permettant de recalculer la composition en poids de minéraux virtuellement présents, à partir de la composition chimique mesurée.

Les minéraux fictifs, ou virtuels, de la norme sont appelés « minéraux normatifs ». L'assemblage constitue la **Norme CIPW calculée** de la roche analysée, ou encore « composition normative ».

L'intérêt de ce protocole est d'avoir été adopté de façon universelle par les pétrographes. C'est ce qui permet de faire des comparaisons fines entre les basaltes et les différenciés de tous les volcans de la Terre, et de stabiliser une classification universelle.

Voici un exemple tiré de la notice de la carte géologique à 1/50 000 du Mont-Dore, feuille Bourglastic (éd. BRGM) : **figure 11** (page suivante).

La **moitié supérieure** du tableau donne les résultats des analyses pour cinq laves représentatives du premier épisode volcanique (dite série inférieure) : comme pour le diagramme TAS (**figures 2 et 4**), elles sont données en pourcentages pondéraux des **oxydes**. En effet, ceux-ci sont les briques de construction des minéraux silicates et alumino-silicates... De gauche à droite, on parcourt la série magmatique de la lave la plus basique (« ankaramite¹² ») à celle la plus acide (« trachyte »), en passant par la « basanite », ce qui se voit à l'augmentation du taux de silice passant de 42,20 à 64,75 %.

¹² Ankaramite, d'Ankarama, à Madagascar. Basaltes enrichis de phénocristaux d'olivine et de pyroxène, par cumulation au bas de la chambre magmatique. Les pyroxènes (augites) peuvent être centimétriques.

Simultanément, le pourcentage de magnésium (typique des péridots et des pyroxènes) s'effondre, tandis que le taux de présence de l'alumine augmente, ainsi que celui des alcalins.

disparaissent au profit de la *sanidine* (feldspath). De même la concentration d'olivine diminue, puis disparaît pour le terme trachyte, au même moment où le quartz (silice libre) fait son apparition. La concentration des clinopyroxènes diminue notablement.

Notice Carte Géologique 1/50 000 Tour d'Auvergne, page 21

Tableau 2 – Sélection d'analyses chimiques des laves des 3 cycles du massif du Mont-Dore et de la série de l'Artense

Série inférieure:
Pliocène inférieur
5,3 à 3 Ma
Série inférieure

Massif du Mont-Dore

Pourcentages d'oxydes	Série inférieure				
	1 Ankararamite	2 Ankararamite	3 basanite	4 trachyte	5 trachyte
SiO ₂	42,20	42,90	47,00	60,00	64,75
TiO ₂	3,10	3,00	2,50	0,98	0,58
Al ₂ O ₃	13,50	14,00	15,00	18,22	17,16
Fe ₂ O ₃	1,50	1,50	1,50	1,50	1,29
FeO	10,35	9,81	8,82	2,68	1,51
MnO	0,20	0,19	0,18	0,25	0,04
MgO	11,50	11,80	7,50	0,82	0,61
CaO	12,00	11,40	10,60	3,47	1,71
Na ₂ O	2,60	3,20	3,45	5,62	6,14
K ₂ O	1,80	1,45	1,65	4,27	5,15
P ₂ O ₅	-	-	-	-	0,16
H ₂ O*	0,46	0,37	2,01	1,54	0,58
H ₂ O*	0,16	0,27	0,24	-	0,19
Somme	99,37	99,89	100,46	99,35	99,87

Composition normative : (F₂O₃ bloqué à 1,5%)

APAT	-	-	-	-	0,35
ILME	5,89	5,70	4,75	1,86	1,10
ORTH	-	4,59	9,75	25,23	30,43
LEUC	8,34	3,12	-	-	-
ALBI	-	-	14,41	47,55	51,95
NEPH	11,92	14,67	8,01	-	-
ANOR	19,85	19,55	20,57	11,88	4,05
CORIN	-	-	-	-	-
AEGY	-	-	-	-	-
MAGNE	2,17	2,17	2,17	2,17	1,87
HEMA	-	-	-	-	-
DIOCA	15,79	15,45	13,37	2,23	1,46
DIOMG	10,14	10,15	7,94	0,99	0,89
DIOFE	4,62	4,22	4,76	1,23	0,48
HYPMG	-	-	-	1,05	0,63
HYPFE	-	-	-	1,31	0,34
FORS	12,97	13,48	7,53	-	-
FAYA	6,50	6,16	4,96	-	-
QUART	-	-	-	2,33	5,60
SOMME	98,76	99,26	98,22	97,84	99,16
DI	20,84	22,38	32,17	75,12	87,99

1 : ankararamite, les Croûtes (Mossand, 1983) ; 2 : ankararamite, la Montagne d'Ance (Mossand, 1983) ; 3 : basanite, la Morangie (Mossand, 1983) ; 4 : trachyte, bois de Crèveœur (Mehdizadeh, 1979) ; 5 : trachyte comenditique, Loubazeix (Musengié, 1978).

DI = Indice de différenciation

Figure 11. Compositions chimiques de laves du massif du Mont-Dore, d'où est tirée leur « composition normative ».

Celle-ci fait apparaître l'existence virtuelle de néphéline dans les ankararamites et la basanite, alors que les trachytes n'en présentent pas, non plus que du péridot.

Dans ce cas, la norme permet l'expression du quartz libre. (Exemple tiré de la notice de la carte géologique à 1/50 000 du Mont-Dore, feuille La-Tour-d'Auvergne, éd. BRGM).

Par le calcul, on aboutit à la *moitié inférieure* du tableau, relative aux « minéraux normatifs », donc virtuels, information indispensable pour les comparaisons et les classifications.

En lisant à nouveau de gauche (basique) à droite (acide), les feldspathoïdes apparaissent effectivement dans les laves les plus basiques, puis

Il n'est pas dans notre propos de décrire en détails le protocole de la norme CIPW, car il n'est pas particulièrement simple. Nous en donnons les grandes lignes, en six étapes, dans les figures 12 et 13.

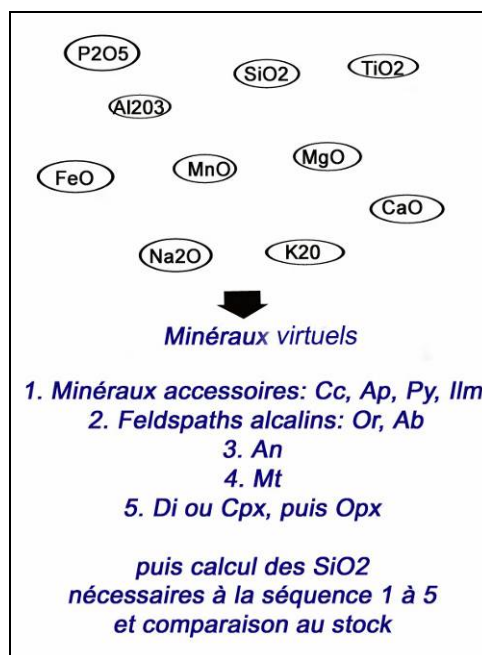


Figure 12.

Figure 12. À partir des pourcentages pondéraux des oxydes :

- étape 1 : on commence par calculer la concentration virtuelle des minéraux accessoires : calcite et apatite, ainsi que les « opaques » pyrite et ilménite ;
- étape 2 : à partir de Na₂O et K₂O, on calcule les feldspaths alcalins ;
- étape 3 : puis les feldspaths sodo-calciques (plagioclases) ;
- étape 4 : à partir de FeO et de Fe₂O₃, la magnétite et l'hématite ;
- étape 5 : on peut alors, à partir de MgO, calculer les clinopyroxènes, puis les orthopyroxènes.

Figure 13 :

- étape 6 : enfin, on en déduit le pourcentage de SiO₂ nécessaire pour former tous ces silicates.

L'étape 6 est l'étape « clé », et aussi la plus délicate ! Car, en comparant le pourcentage de SiO₂ nécessaire aux cinq premières opérations à celui du stock de SiO₂ réellement présent dans la lave, on peut conclure à classer la lave dans l'un des trois cas de la classification

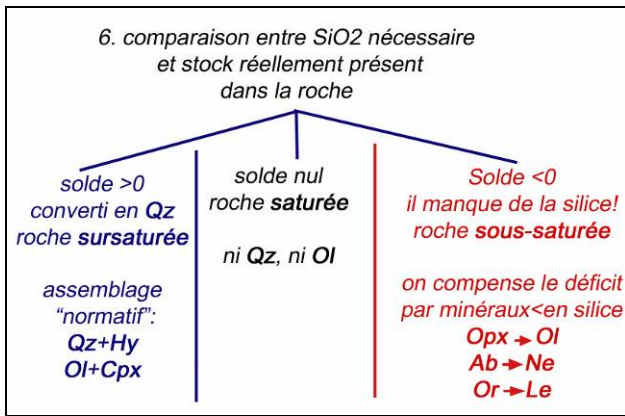


Figure 13.

TAS. Les deux premiers cas de la **figure 13** (solde > 0 et solde nul) ne posent pas de problème.

• **Premier cas**

Si le solde est > 0, la roche est « sursaturée » et on peut conclure en donnant l'assemblage normatif en termes des deux « constituants normatifs index » :

**Qz et Hy, c'est-à-dire quartz
et hyperstène (orthopyroxène).**

Bien entendu, le diopside est généralement présent mais il n'est pas à prendre en compte en tant que constituant normatif index.

• **Deuxième cas**

Le solde est juste nul, la roche est « saturée », il n'y a ni quartz, ni olivine.

Le constituant normatif est : Hy (*hyperstène*). Même remarque que précédemment pour le diopside.

• **Troisième cas**

Le solde est négatif, le compte n'est pas bon ! Il manque de la silice.

Il faut alors refaire les calculs en cherchant à réduire le déficit autant que faire se peut, en allant prélever de la silice, là où c'est possible encore. Par exemple, en convertissant l'*orthopyroxène* en *olivine* et en récupérant la silice en excès. De même, en convertissant de l'*albite* en *néphéline*... jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'en trouver. La roche est « sous-saturée » et on peut conclure en donnant l'« assemblage normatif » en termes des principaux constituants normatifs « index » : **Ol, Ne et Lc**, soit **olivine, néphéline et leucite**.

Exemple : « tous les basaltes du massif du Mont-Dore appartiennent à la classe des basaltes alcalins à olivine. Leur déficit en silice conduit à un taux de 5 à 15 % de néphéline normative ».

(Citation tirée de la notice de la carte géologique à 1/50 000 de Bourg-Lastic. BRGM, p. 22).

Le diopside est toujours présent, comme dans les autres cas, mais il ne sert pas à caractériser l'assemblage normatif.

Sur la moitié inférieure du tableau de la **figure 11**, on peut voir le résultat final des calculs. Il est donné en termes de minéraux normatifs.

On l'a vu, ces calculs sont directs pour les trachytes, qui sont des laves sursaturées. Par contre, on ne peut pas suivre sur le tableau les calculs intermédiaires, avec « récupération » de silice, pour les ankaramites et les basanites, comme on l'a expliqué plus haut.

En conclusion, la norme CIPW est un outil puissant, utilisé pour bien s'orienter lors de l'étude pétrographique d'un appareil volcanique ou d'un vaste système volcanique. Certes, le protocole a en apparence une part d'arbitraire, mais ses fondements sont solides. L'expérience montre qu'elle facilite considérablement la classification des laves qui, sur le terrain, présentent une très grande variété. Ainsi, sur la feuille de Bourg-Lastic au Mont-Dore, il n'y a pas moins d'une trentaine de types de laves distinctes. La norme CIPW est indispensable pour les distinguer et les nommer correctement.

Nous allons voir maintenant deux applications de la norme CIPW : « l'indice de différenciation D.I. », et la représentation géométrique des assemblages normatifs, dite du « tétraèdre de Yoder et Tilley ».

2.2. D.I. : indice de différenciation

C'est un indice qui se calcule à partir de la norme CIPW.

Il a été introduit par Thornton et Tuttle pour les granites, mais il est maintenant utilisé pour les laves ; il est sensé exprimer le taux de minéraux blancs dans la roche, à partir du calcul des pourcentages pondéraux des minéraux de teinte claire de la norme. Ainsi :

$$D.I. = Qz + Or + Ab + Ne$$

Où **Or** est l'orthose, **Ab** est l'albite,
Ne est la néphéline.

Sur le bas du tableau (**figure 11**), les valeurs du D.I. des laves du Mont-Dore sont portées. Le D.I. varie de 20,84 pour la première ankaramite (roche sombre) à 87,99 pour le trachyte (roche claire).

2.3. Le tétraèdre des assemblages normatifs de Yoder et Tilley, pour les basaltes

C'est en 1961 que Yoder et Tilley ont donné une première représentation géométrique et cohérente du classement des basaltes. Ils ont pour cela proposé une représentation tétraédrique (**figure 14**), avec les quatre pôles suivants :

- 1^{er} pôle : celui de l'olivine (*forstérite*) Mg_2SiO_4 ;
- 2^e pôle : celui du clinopyroxène, le *diopside* $CaMgSi_2O_6$;
- 3^e pôle : celui de la silice, SiO_2 ;
- 4^e pôle : celui des « composés alumineux » :
 - . soit purement sodique, c'est la *néphéline* $(Na,K)AlSi_3O_8$; **tétraèdre A**,
 - . soit purement calcique, c'est la *mélilite* $(Ca,Na)_2(Al,Mg)(Si,Al)_2O_7$; **tétraèdre B**.

Comme la mélilite n'est pas fréquente, on parle plutôt, pour désigner le pôle alumineux calcique, de la « molécule de Tschermak », $CaAl_2SiO_6$.

L'intérêt de cette représentation est double. Tout d'abord, elle conduit à placer les basaltes dans un des trois espaces délimités par les plans colorés en rouge ou rose (rayures) sur la **figure 14**. Ensuite, elle permet de placer les autres composants importants sur les arêtes du tétraèdre.

Ce sont, sur le **tétraèdre A** de la **figure 14** :

- l'*enstatite*, orthopyroxène essentiel, sur l'arête qui relie la *forstérite* (olivine) à la silice ;

- la *jadéite*, clinopyroxène des éclogites, et l'*albite*, toutes deux sur l'arête qui relie la néphéline (pôle alumineux sodique) à la silice. Cependant la jadéite n'est à prendre en compte qu'à haute pression. Dans ce cas, un nouveau plan de séparation apparaît dans le tétraèdre et il s'appuie précisément sur le nouveau pôle jadéite : plan Di-Ol-Jd, où Jd désigne la jadéite.

Toutefois, pour ne pas alourdir la présentation, le pôle « hautes pressions » de la jadéite n'a pas été représenté sur les **figures 14, 15 et 16**.

De même sur le **tétraèdre B**, on place l'*anorthite*, sur l'arête qui relie le pôle alumineux calcique à la silice. Les plagioclases sont donc positionnés sur l'arête qui relie le pôle alumineux, sodique ou calcique, au pôle silice. Enfin, on localise la famille des grenats sur la ligne qui relie le *grenat grossulaire* (sur l'arête diopside-pôle alumineux) et le *grenat pyrope* (sur l'arête diopside-olivine).

La **figure 14** permet de voir où se situent les différents types de basalte dans le tétraèdre de référence.

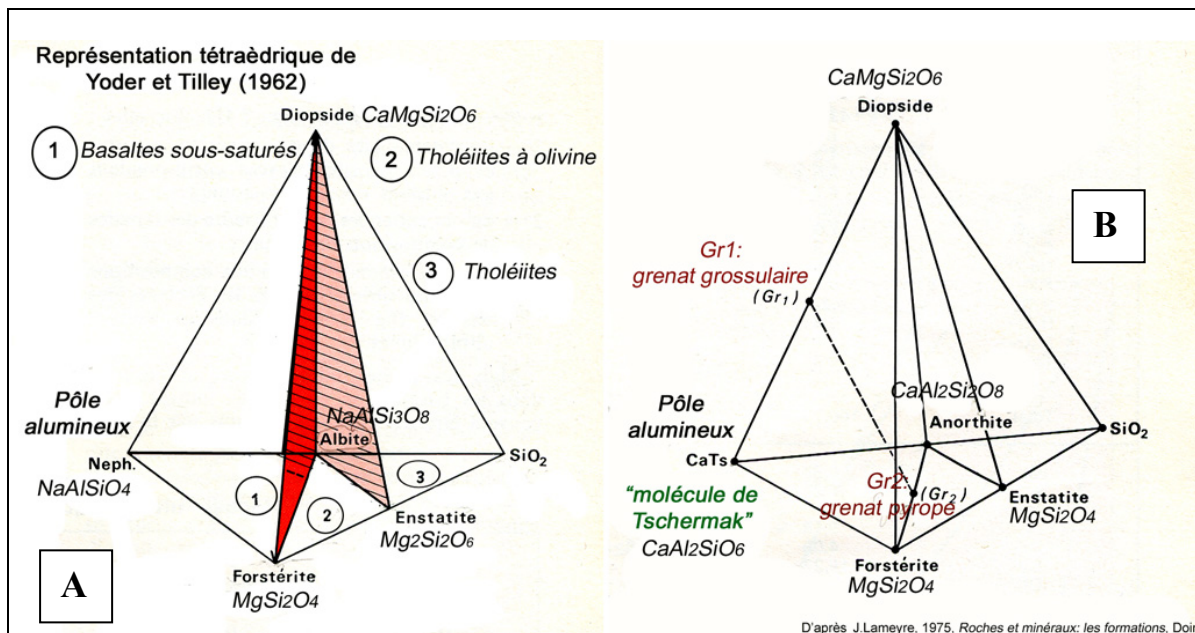


Figure 14. Diagrammes tétraédriques pour les assemblages normatifs : A est le diagramme Di-Ne-Qz-Fo, où chaque lettre désigne un pôle. Di=diopside, Ne=néphéline, et Fo= forstérite.

Comment placer les basaltes dans cette représentation ? C'est à partir de leur « assemblage normatif » :

- les tholéiites à quartz sont situées dans l'espace 3, Di-Ab-Hy-Qz ;
- les tholéiites à olivine sont situées dans l'espace 2, Di-Ab-Hy-Fo ;
- les basaltes alcalins sont situés dans l'espace 1, Di-Ab-Fo-Ne :
 - Di est le pôle diopside,
 - Ab est l'albite, sur l'axe Ne-Qz,

- Hy est l'hyperstène, qui est l'enstatite avec du fer substitué au magnésium, à plus de 30 %, sur l'axe Fo-Qz. Les représentations se font soit avec l'enstatite, comme sur les **figures 14, 15 et 16** soit avec l'hyperstène, quand le fer est plus abondant,
- Fo est le pôle olivine, ou forstérite.

L'espace 1, représenté dans la partie gauche du tétraèdre de la **figure 15**, est l'espace des basaltes alcalins. Dans cet espace, on a vu que les feldspathoïdes font partie de l'assemblage normatif, au même titre

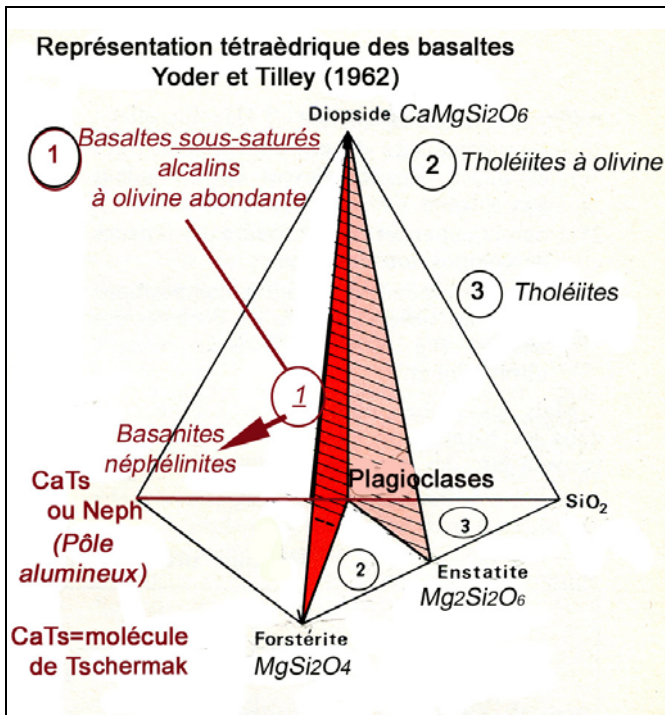


Figure 15. Tétrahédre des assemblages normatifs. Espace 1 des basaltes alcalins.

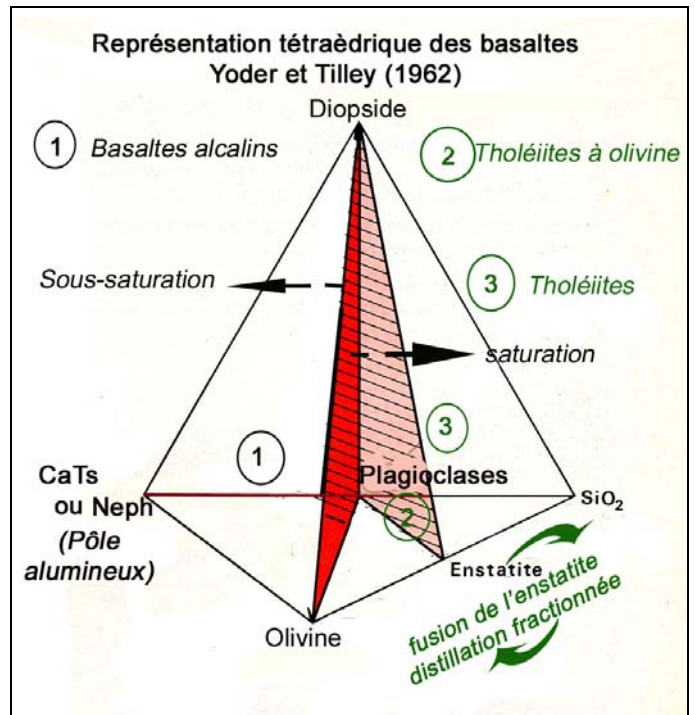


Figure 16. Tétrahédre des assemblages normatifs. Espaces 2 et 3 des basaltes saturés et sursaturés.

que l'olivine (forstérite). De plus, le plan Di-Ab-Fo, en rouge vif sur la **figure 15**, joue un rôle important de « barrière thermique » : il est appelé « plan critique de sous-saturation », car un magma qui se refroidit dans cet espace produit obligatoirement les cristaux de la norme CIPW, et rien d'autre.

Bien plus, si l'olivine se dépose pendant le processus de cristallisation fractionnée, le magma s'enrichit en néphéline et/ou en leucite.

Les espaces 2 et 3, représentés à droite du tétraèdre (**figure 16**) sont respectivement les espaces des tholéiites à olivine et des tholéiites à quartz. Dans l'espace 2, le composant normatif est l'enstatite ou l'hyperstène (voir § 2.1). Elle cohabite avec l'olivine, les plagioclases et le diopside, ce dernier plutôt minoraire.

L'espace 2 s'arrête au plan Di-Ab-Hy qui est le **plan de saturation en silice**, là où commence l'espace 3 des tholéiites à quartz (**figure 16**).

Ce plan est aussi une barrière thermique. Lors du refroidissement d'un liquide de composition située dans l'espace 2, il y normalement dépôt de cristaux d'olivine puis d'enstatite.

Mais si les cristaux d'olivine sont soutirés dans la chambre magmatique, l'équilibre peut se déplacer vers l'eutectique du système enstatite-silice, et des cristaux de silice peuvent apparaître faisant passer de l'espace 2 à l'espace 3.

Diaporamas

Les Entretiens sur la pétrologie endogène font l'objet d'exposés avec diaporamas, présentés lors des réunions de la Commission de volcanisme de la SAGA. Ils sont illustrés de clichés pris sur des lames minces provenant des échantillons prélevés à l'occasion des voyages d'étude effectués par les membres de la Commission.

Bibliographie

On se reportera utilement aux « Géol'Images » créées par Alain Guillon dans *Saga Information*.
 BONIN B. (1998) – *Pétrologie endogène*. Dunod éd.
 BONIN B. (2011) – *Magmatisme et roches magmatiques*. Dunod éd.
 FOUCAULT A. et RAOULT J.-F. (2010) – *Dictionnaire de géologie*, 7^e éd. Masson. (Index ci-dessous).
 Guide Chamina (2003) – *Le volcanisme en Auvergne*.
 LAMEYRE J. (1975) – *Roches et minéraux*. T. 1 : *Les matériaux*. T. 2 : *Les formations*. Doin éd.
 Notices des cartes géologiques à 1/50 000, La Tour d'Auvergne et Bourg-Lastic, BRGM éd.

Index des mots-clés

Alcalins : éléments de la première colonne du tableau de Mendeleïev. Ces éléments sont le lithium, le sodium et le potassium. Les ions de ces éléments ont une charge positive simple : ce sont des cations qui

jouent un rôle fondamental dans les liaisons entre constituants silicatés ou alumino-silicatés des roches magmatiques. Exemple : Na^+ .

Ankaramite : note 11.

Arc insulaire : note 8.

Complexes ophiolitiques : portions de la croûte océanique et du manteau supérieur d'anciens océans, charriés sur de la croûte continentale lors de collisions entre deux continents ou entre un continent et un arc insulaire (phénomène d'*obduction*).

Différenciation magmatique : processus par lequel un magma se scinde en portions chimiquement et minéralogiquement différentes, chacune pouvant évoluer indépendamment. Ces processus, où intervient la cristallisation fractionnée, conduisent à des successions de roches magmatiques différentes les unes des autres, et constituant des séries magmatiques.

Dorsales (ou rides) médio-océaniques : alignements de hauteurs sur des milliers de kilomètres au fond des océans, présentant un fossé d'effondrement (*rift*) en leur milieu. Lieux de l'écartement entre deux plaques océaniques, et d'un volcanisme basaltique sous-marin.

Marges continentales actives : région immergée de la bordure d'un continent, le glaciaire étant creusé d'une fosse de grande profondeur liée à la subduction d'une plaque océanique sous le continent voisin. Région très sismique, et souvent accompagnée d'un arc insulaire.

Mésostase : matière interstitielle vitreuse, ou finement cristallisée, remplissant les espaces entre les cristaux (phénocristaux) de la lave.

Péridotites : note 1.

Saturation, sursaturation, sous-saturation : note 4.

Shoshonites : voir aussi note 7. Séries alcalines à forte teneur en potassium et sous-saturées. Ce sont des séries de nature orogénique, c'est-à-dire liées à la naissance d'une chaîne de montagnes. Elles sont principalement localisées dans les systèmes d'arcs insulaires mûrs, en fin d'évolution.

Trapp : note 5.

Volcans boucliers : note 6.

Xénomorphe : s'applique à un minéral qui, bien que cristallisé, présente une forme quelconque, les faces cristallographiques du système correspondant n'ayant pas pu se développer.



*Cristal d'olivine
translucide
(var. forstérite).*

Dim :

2,3x1,9x1,3 cm.

*Provenance : Sapat,
N.O. Pakistan.*

Les Lundis du Muséum

Informations pratiques

Les conférences débutent à 18 h, à l'Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution du Muséum, 36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, 75005 Paris. Entrée libre et gratuite dans la limite des 120 places disponibles. Accueil du public dès 17 h 30.

• Lundi 12 novembre

Gigantisme chez les reptiles marins du Mésozoïque.

Par Nathalie Bardet, spécialiste des reptiles marins du Mésozoïque, Muséum national d'Histoire naturelle.

Durant le Mésozoïque, plusieurs grands clades de vertébrés tétrapodes sauropsides (reptiles) envahirent le milieu marin : Ichthyosaures, Sauroptérygiens, Squamates, Chéloniens, Crocodyliformes, etc. Ils furent le « miroir » en milieu marin de l'extraordinaire radiation des dinosaures en milieu terrestre.

Tous ces groupes témoignent d'un retour à la vie aquatique intense et nous permettent d'étudier les processus d'adaptations à ce milieu, souvent convergents, sous l'angle de leurs spécialisations, qu'elles aient été morphologiques, physiologiques ou comportementales.

Dans l'histoire évolutive de chacun de ces grands groupes, on constate que certaines formes, pas forcément les plus dérivées, ni les plus récentes, montrent des tendances au gigantisme. C'est le cas par exemple de l'Ichthyosaure *Shonisaurus* (Trias), du Pliosauure *Liopleurodon* (Jurassique), du Crocodyliforme *Dakosaurus* (Jurassique), du Mosasaure *Hainosaurus* (Crétacé), de la tortue Archelon (Crétacé), et de bien d'autres taxons encore. S'ils n'étaient pas tous gigantesques dans leur ensemble, les taxons appartenant à ces clades de reptiles marins étaient néanmoins souvent de grande taille. Pourquoi cette tendance au gigantisme chez ces groupes? Quelles sont les contraintes et les limites imposées par le milieu marin? Une comparaison est faite avec les cétacés, qui représentent les plus grands Vertébrés marins existants.

• Lundi 19 novembre

Que savons-nous vraiment de la paléobiologie des Sauropodes ?

Par Ronan Allain, paléontologue, spécialiste des dinosaures, Muséum national d'Histoire naturelle.

Les archives fossiles ne livrent, la plupart du temps, aux paléontologues qui s'intéressent aux dinosaures que des restes squelettiques et des empreintes de pas. Comment dans ce cas reconstituer à partir de ces données brutes la physiologie d'un dinosaure? Com-