

Cristallographie et pétrographie des roches volcaniques

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

Introduction générale

Le thème contenu dans le titre du présent article est celui de la Tribune libre donnée à la SAGA le 8 novembre 2014, dans le cadre de l'*Année internationale de la cristallographie* proclamée par l'Unesco. Il peut aussi être compris comme un rappel du rôle précurseur et fondateur joué par Alfred Lacroix dans le domaine de la pétrographie et du volcanisme, Alfred Lacroix dont on a fêté en 2013 le 150^e anniversaire de la naissance.

L'étude et la compréhension du volcanisme passe par une bonne connaissance des roches volcaniques et de leur genèse : c'est l'un des objets de la *pétrographie*¹, étape obligée pour aboutir à la *pétrologie* dite *endogène*². Dans cet article, la *cristallographie* est présentée comme un outil utile non seulement pour déterminer la composition et la structure de ces roches mais aussi pour élucider les lois de formation, au sein du magma, des cristaux qui composent les roches volcaniques. De proche en proche, le lien se fait ainsi avec le volcanisme et les observations sur le terrain.

Concernant les aspects expérimentaux de la pétrographie, nous nous limitons à la *microscopie en lumière polarisée* sur lames minces. À la SAGA, nous la pratiquons systématiquement sur les roches étudiées par la Commission de volcanisme à l'occasion de nos voyages d'étude. C'est une méthode à la fois puissante et efficace, et relativement facile à mettre en œuvre par des « géologues amateurs » !

La pétrographie a besoin de la minéralogie, et donc de la cristallographie. Inversement, elle peut poser de nouvelles questions au minéralogiste et au cristallographe. Dans certains cas, elle peut apporter des réponses dans le domaine particulier des phénomènes de naissance (*nucléation*) et de croissance des cristaux dans un magma. En définitive, la cristallographie

apparaît bien comme un outil nécessaire à la pétrographie et à la pétrologie endogène.

Tous nos exemples seront pris dans les *roches volcaniques*, avec cependant une restriction : il s'agit toujours d'échantillons prélevés *in situ*, dans une coulée ou dans un dépôt de tufs consolidés ; l'échantillon doit avoir une certaine ténacité pour permettre la taille d'une lame mince. Les roches volcaniques sont généralement composées d'une matrice minérale qui peut être vitreuse, microcristalline ou les deux à la fois et, au sein de celle-ci, de cristaux de dimension macroscopique, les phénocristaux. Alfred Lacroix a été l'un des premiers à comprendre que ces phénocristaux naissent et se développent en profondeur dans le magma même, et non pas au moment de l'éruption. Ce sont donc des témoins d'une histoire qui peut s'être déroulée dans une chambre magmatique, ou dans les conduits profonds du magma. Ce sont ces phénocristaux, souvent automorphes, qui se prêtent à une approche cristallographique. De ce point de vue, les roches volcaniques apparaissent comme un cas favorable pour illustrer l'importance de la cristallographie pour la pétrographie.

Le plan général de « **Cristallographie et pétrographie des roches volcaniques** » va comporter trois parties.

Dans cette *première partie*, nous présentons dans son principe la *méthode expérimentale* à la base de la pétrographie : l'examen de lames minces au microscope polarisant. C'est une méthode optique élégante, mais qui nécessite une explication pour être bien comprise. Son rapport avec la cristallographie est intime. Fort heureusement, elle peut être menée de bout en bout sans développement mathématique, et c'est ce que nous allons tenter, sans entrer dans trop de détails. Cette première partie sert d'introduction aux deux articles qui suivront. Tous les aspects de la « *détermination des minéraux des roches* » par cette méthode ont été remarquablement développés dans un ouvrage historique, qui reste notre livre de chevet, et

¹ **Pétrographie** : science de la description des roches.

² **Pétrologie endogène** : science de la classification des roches magmatiques et de l'interprétation de leur genèse (terme introduit par Alfred Lacroix).



Figure 1. « Rapporteur » conçu et fabriqué par Arnould Carengeot, à la demande de Jean-Baptiste Romé de Lisle. Fin du XVIII^e siècle.

que nous nommons familièrement « *Le Roubault* » (voir bibliographie).

La *deuxième partie* sera consacrée à l'utilisation pratique de la méthode dans des cas concrets, avec analyse de la structure conduisant à l'identification du minéral, ou au moins y contribuant. Sans développer l'ensemble des méthodes optiques de la pétrographie, nous illustrerons leur efficacité par des exemples pratiques.

Dans la *troisième partie*, nous nous intéresserons à la *formation* des cristaux, avec les phénomènes de *nucléation* et de *croissance*. Ceux-ci se produisent pour l'essentiel au sein d'un magma ; si bien que la visualisation des phénocristaux au microscope, dans leurs moindres détails, conduit à s'interroger sur ce domaine fascinant des « *chambres magmatiques* » et de leurs secrets de fonctionnement.

Première partie : la méthode expérimentale optique, à la base de la pétrographie classique

Introduction

À la fin du XIX^e siècle, l'outil de base qui a permis à la cristallographie de se moderniser et de se développer est la diffraction des rayons X. Grâce à leur courte longueur d'onde, les rayons X éclairent chaque famille de plans cristallins d'un minéral et en donnent ainsi une signature et un repérage géométrique remarquablement fins et précis. Nous ne disposons pas de la diffraction des rayons X à la SAGA, et d'ailleurs les cristaux d'une roche volcanique sont si petits que nous serions bien en peine de l'utiliser. Notre outil pétrographique est la *microscopie en lumière polarisée*. Elle met en œuvre une puissante méthode d'*opti-*

que interférentielle pour révéler les propriétés physiques et géométriques du minéral d'un cristal, et cela jusqu'à des dimensions bien inférieures au millimètre.

Par la mesure d'angles, la méthode devient quantitative et, dans quelques cas, nous pouvons déterminer approximativement la composition du minéral observé.

Ce que le « rapporteur » conçu et fabriqué par Arnould Carengeot (figure 1) avait apporté à Jean-Baptiste Romé de Lisle, à la fin du XVIII^e siècle, dans l'étude macroscopique de grands cristaux, c'est la platine rotative du microscope qui nous l'offre pour étudier les phénocristaux des roches volcaniques (figure 2).



Figure 2. Platine tournante d'un microscope Nachet à polarisation. La lame mince est fixée à la platine par des ressorts. La lame est traversée par la lumière polarisée issue du condenseur situé au dessous de la platine.

Les phénocristaux : un premier repérage, en « lumière naturelle »

La pétrographie par microscopie se fait sur une « lame mince » de la roche volcanique étudiée. C'est une tranche ultrafine, taillée dans la roche volcanique, d'environ 3 cm x 4 cm de surface, collée à une simple lame de verre. Son épaisseur de 30 micromètres (30 millièmes de millimètre) doit être bien régulière. En posant la préparation sur un scanner numérique en mode dit « transmission », la lame mince traversée par la lumière naturelle³ du scanner apparaît dans son ensemble, comme sur l'exemple d'un basalte de l'Aubracs (figure 3). Sur un fond peu distinct, apparaissent un grand nombre de phénocristaux, et ce sont ces derniers qui seront examinés au microscope.

³ Lumière naturelle : lumière polarisée ou non, mais non analysée.

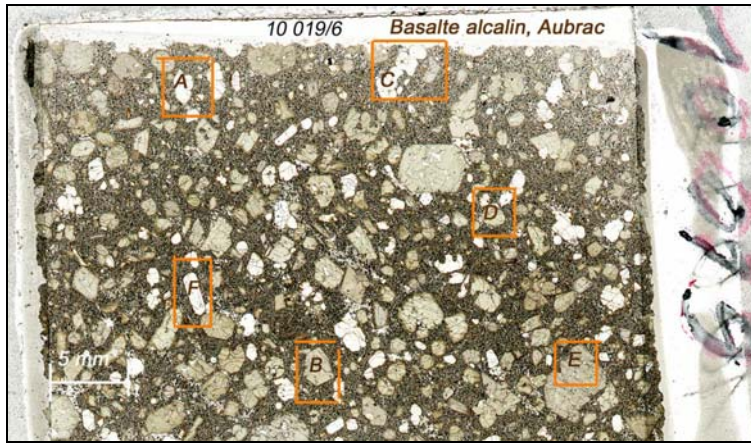


Figure 3. Ce cliché a été pris au moyen d'un scanner opérant dans le mode transmission. L'échelle est indiquée dans le quart inférieur gauche. Dans ce basalte prélevé en Aubrac, certains phénocristaux atteignent la taille du demi-centimètre. Les cristaux sont scellés dans une pâte, la mésostase, plus ou moins vitreuse.

On peut parler de texture porphyrique, qui se prête bien à l'analyse cristallographique de certains cristaux. La première étape de l'analyse de la roche consiste à « cartographier » la lame en choisissant et localisant sur le scan les cristaux à examiner en détail : ils sont entourés sur le cliché, et repérés par une lettre.

Avec l'expérience, il est possible d'en reconnaître rapidement certains. La photographie en transmission au scanner, comme on le fait pour une diapositive, est utile pour cartographier et repérer des cristaux choisis en vue d'une étude détaillée... Mais on ne peut pas les étudier tous ! L'expérience du pétrographe réside en grande partie dans son habileté à choisir les « bons cristaux » sur lesquels travailler.

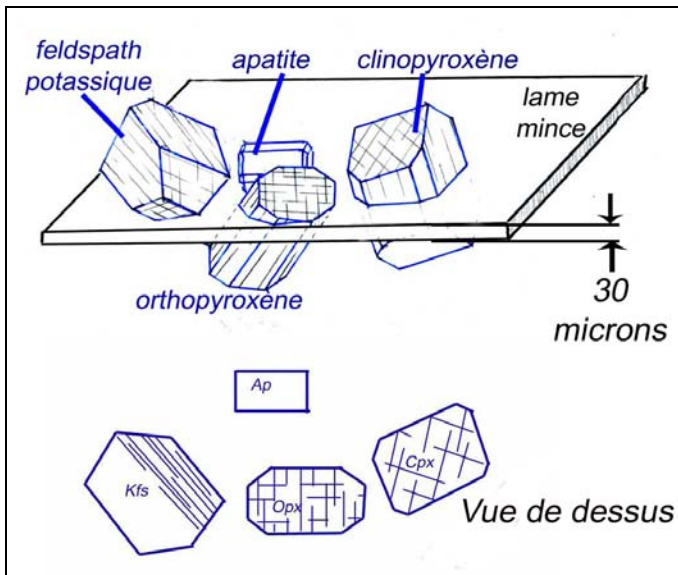


Figure 4. Le dessin du haut schématise la vue en perspective de la roche volcanique et de la lame taillée dans sa masse ; seuls les cristaux sont représentés, la mésostase étant gommée. Le dessin du bas montre la projection des contours des cristaux dans le plan de la lame.

Le « scan » offre une vision plutôt chaotique, puisque les cristaux sont orientés en général dans tous les sens, comme l'illustre le dessin de la figure 4.

La lame mince paraît de prime abord comme un assemblage à deux dimensions de sections de cristaux. Dans le meilleur des cas, les cristaux sont automorphes et leurs formes géométriques imparfaites ne font que rappeler les faciès familiers des minéraux communs du volcanisme, comme nous le verrons sur quelques exemples.

En passant à l'examen de la lame au microscope, toujours en lumière naturelle, deux critères assez banals sont très utiles dans le repérage rapide des minéraux, mais nous ne les développons pas ici, car le lien avec la cristallographie n'est pas essentiel, ou même absent. De plus, ils sont exposés dans tous les ouvrages de pétrographie, ouvrages dont nous donnons les références dans la bibliographie.

Le premier critère est le relief optique du cristal (figure 5, page 14). Il est directement lié à l'indice de réfraction : un indice fort conduit à un relief accentué et un fort contraste.

Ce critère est toujours utilisé en premier, lors de l'examen de la lame en lumière naturelle. Il permet de repérer dans la lame les silicates ferromagnésiens comme les périclites et les pyroxènes, et aussi des minéraux dits accessoires (voir le tableau en fin d'article), comme l'apatite et la titanite.

Le second critère simple est la coloration éventuelle du cristal (figure 5). Elle s'observe également lors d'un premier examen de la lame au microscope et en éclairant la lame au travers d'un polariseur (voir plus loin la signification de la polarisation), puis en observant le changement de teinte lors de la rotation de la platine tournante sur laquelle est disposée la lame : c'est le pléochroïsme.

Dans le cas de minéraux comme la biotite ou les amphiboles, la coloration, et sa variation avec l'angle de rotation, sont liées au réseau cristallin ; elles sont caractéristiques du minéral.

Toutefois, comme nous l'avons déjà souligné, nous n'observons que des sections et la troisième dimension manque cruellement !

C'est là qu'intervient la puissance de l'optique interférentielle. Pour permettre de restituer la troisième dimension d'un minéral cristallin, afin de conduire une étude proprement cristallographique, la solution va venir de certaines propriétés optiques qui, elles, sont étroitement liées au réseau cristallin, et l'optique interférentielle va les faire apparaître dans l'épaisseur pourtant tenue de la lame.

Réseau cristallin et propriétés optiques. Notion de biréfringence

Prenons l'exemple du *quartz*, dont le réseau cristallin appartient au système *rhomboédrique*. Ce système a un axe de symétrie d'ordre > 2 , et un seul (figure 6). Comment décrire de façon synthétique les propriétés optiques d'un tel réseau ?

Dans un réseau où les atomes sont disposés suivant l'ordre strict des plans cristallins, la propagation d'un rayon lumineux va dépendre de son orientation par rapport au réseau ; on dit que le milieu est anisotrope, par opposition à des milieux comme l'air, ou le verre, qui sont isotropes. Dans ces milieux, l'indice de réfraction est le même dans toutes les directions. Si on trace la surface, lieu de l'indice de réfraction dans toutes les directions de l'espace, on obtient une sphère ; et comme la vitesse de la lumière est inversement proportionnelle à cet indice, la lumière se propage à la même vitesse dans toutes les directions.

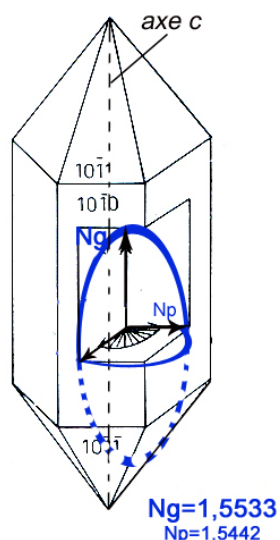


Figure 6. L'ellipsoïde des indices du quartz a un axe de symétrie de révolution, confondu avec l'axe *c* de symétrie élevée, supérieure à deux, du réseau rhomboédrique.

L'indice le plus élevé **Ng** est porté par cet axe.

(Tiré de M. Roubault, ouvrage cité en référence).

Il n'en est pas de même pour un réseau comme celui du quartz. Si l'on trace la surface, lieu de l'indice de réfraction dans une direction de l'espace, on obtient une sphère déformée, un ellipsoïde : c'est l'*ellipsoïde des indices*, comme celui représenté sur la figure 6.

Ellipsoïde des indices : c'est cette surface géométrique et ses paramètres qui vont servir à la synthèse des propriétés optiques du réseau, et à guider sa détermination.

Examinons plus en détail l'ellipsoïde de la figure 6, dessiné pour les besoins de la cause à l'intérieur du cristal représenté. Ses caractéristiques géométriques sont étroitement liées au *rhomboèdre* du réseau cristallin du quartz ; il est de révolution, autour d'un axe qui est celui de plus haute symétrie du quartz : l'axe *c*, d'ordre > 2 . C'est le grand axe de l'ellipsoïde, et il porte la valeur maximum de l'indice de réfraction : par convention, l'axe et l'indice associé sont toujours notés **Ng**.

Dans le plan perpendiculaire au grand axe (donc à *c*), la section de l'ellipsoïde est un cercle, à cause de la haute symétrie du système rhomboédrique. Le rayon de ce cercle est noté **Np** et désigne la valeur minimum de l'indice de réfraction.

Le paramètre crucial pour la méthode pétrographique est la différence **Ng-Np** ; on l'appelle la *biréfringence*. Elle vaut 0,009 dans le cas du quartz. Apparemment, c'est une valeur insignifiante, et on se demande vraiment quel parti on va pouvoir en tirer !

La biréfringence est connue depuis fort longtemps pour la calcite : sa valeur de 0,172 est proportionnellement « énorme ». Le physicien Christiaan Huygens (1690) l'avait correctement interprétée en termes de propagation de deux faisceaux lumineux dans le cristal. De plus, il avait compris que, par sa nature ondulatoire, la lumière interagit avec les « corpuscules » de matière, et il avait établi un lien intuitif entre la biréfringence et la structure en réseau ordonné des cristaux.

Dans le cas général d'un cristal ayant un **axe de symétrie** simplement **d'ordre deux** - et non pas supérieure à deux comme pour le système rhomboédrique du quartz, vu précédemment (voir le tableau en fin d'article) - cet axe reste l'axe principal **Ng** de l'ellipsoïde des indices. Mais, comme la symétrie est plus faible, l'ellipsoïde n'est pas de révolution. Il peut être écrasé ou aplati, et la section principale de l'ellipsoïde, découpée par le plan perpendiculaire à l'axe de symétrie, est une ellipse. Elle doit donc être décrite par deux axes principaux : **Nm** et **Np**. Le plus petit indice, attaché à l'axe **Np**, est également noté **Np**. L'indice **Nm**, attaché à l'axe **Nm**, a une valeur intermédiaire entre **Ng** et **Np**.

Là encore, le paramètre essentiel est la biréfringence, et c'est la différence **Ng-Np**.

Lumière polarisée et polarisation chromatique

Comment tirer parti de la biréfringence et des intuitions de Huygens. Plus généralement, comment utiliser la variation de la vitesse de la lumière en fonction de la direction de propagation dans un cristal ? Tel est bien le défi.

La réponse a été donnée, il y a un peu plus de 200 ans, par deux physiciens français, Malus⁴ et Arago⁵, qui travaillaient tous deux sur les propriétés de la *lumière polarisée* et de son interaction avec la matière. L'histoire de ces découvertes remarquables est racontée dans un excellent article du numéro de novembre 2014 de la revue *La Recherche*, signé par Bernard Maitte (page 104), au titre éloquent : « *Le double chemin de la lumière* ».

Malus connaissait le phénomène de polarisation de la lumière : sous certaines conditions de réflexion, la lumière, au lieu de vibrer dans toutes les directions, voit son mode de vibration réduit à un seul plan. De même, lors de la réfraction dans un milieu très biréfringent comme la calcite, les deux faisceaux réfractés subissent également une polarisation sélective dans un plan ; mais ils diffèrent l'un de l'autre en ce qu'ils se propagent en vibrant chacun dans son propre plan, perpendiculaire à l'autre.

Malus avait unifié tous ces phénomènes en les décrivant sous les mêmes lois : les lois de polarisation de la lumière par la matière.

Enfin, Arago avait été le premier à observer l'effet produit dans une mince tranche de cristal par une lumière polarisée, et l'avait baptisé : **polarisation chromatique**.

Il ne restait plus qu'à transformer ces effets en une puissante méthode expérimentale.

Pétrographie optique et optique interférentielle en lumière polarisée

La figure 7 (page 14) représente, pour l'essentiel, la géométrie de la réfraction dans une lame de cristal d'un rayon lumineux polarisé au préalable dans le plan méridien du microscope (figure 8). Pour faciliter la lecture de la figure, le rayon de lumière incidente est représenté incliné sur l'axe vertical perpendiculaire au plan de la lame mince, mais, dans la pratique, il est quasiment parallèle à cet axe.

Le cristal est représenté par son ellipsoïde des indices ; il est en général orienté de façon quelconque par rapport à l'axe vertical, ce qui est traduit sur la figure par l'inclinaison de l'ellipsoïde sur cet axe.

La section elliptique sN de cet ellipsoïde par le plan perpendiculaire au rayon incident n'est donc pas en général la section elliptique principale avec axes principaux Ng et Np . C'est la raison pour laquelle les axes de sN sont désignés par les lettres $N'g$ et $N'p$, et les valeurs correspondantes des indices sont légèrement différentes des valeurs nominales Ng et Np .

⁴ Étienne Louis Malus (1775-1812), physicien français.

⁵ François Arago (1786-1853), homme politique, physicien et astronome français. Il a été directeur de l'Observatoire de Paris.

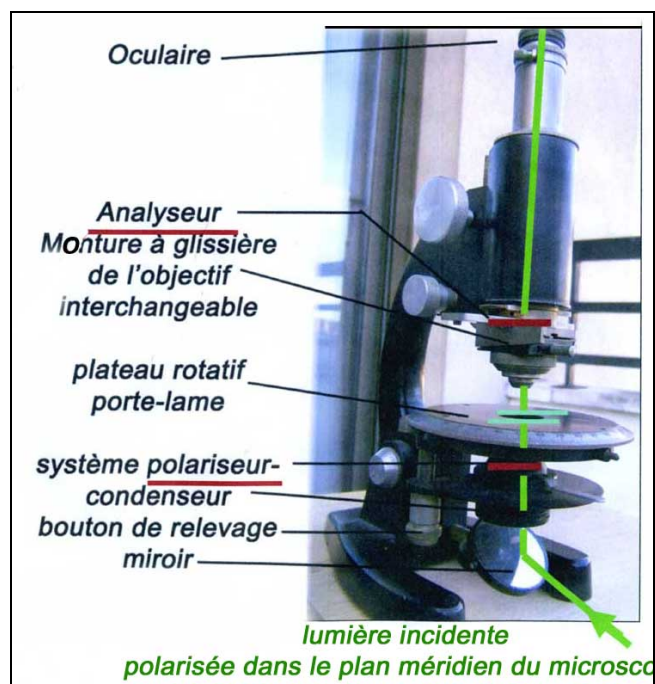


Figure 8. Microscope Nachet, du type de ceux utilisés par la SAGA pour son séminaire de pétrographie. Très simple d'emploi et robuste, il était autrefois très répandu dans les universités. On a représenté le trajet du rayon lumineux dans son parcours au travers du condenseur et du polariseur, dont l'orientation dans le plan méridien du microscope est indiquée sur la figure. La lumière ayant traversé la lame mince, est recueillie par l'objectif interchangeable (grossissement typique de X4 à X10), puis traverse l'analyseur avant d'être concentrée par l'oculaire muni d'un réticule (grossissement typique de X8 à X15), sur l'œil de l'observateur ou le capteur de l'appareil photo. L'analyseur, d'orientation perpendiculaire à celle du polariseur, est escamotable à l'aide d'une tirette, de façon à passer facilement du mode d'observation en lumière naturelle à la lumière polarisée/analysée.

Une caractéristique fondamentale de ce type de microscope est la possibilité de faire pivoter la lame mince par la platine tournante (voir figure 2), de repérer les directions intéressantes dans un cristal grâce au réticule, et ainsi de mesurer des angles caractéristiques du réseau cristallin. Ceci fera l'objet de la deuxième partie de l'article.

Les deux faisceaux réfractés (biréfringence) le sont suivant deux directions, deux vitesses et deux modes de polarisation distincts, intimement liés à la géométrie de l'ellipsoïde, et donc à la structure du réseau. Ce lien va jouer un rôle décisif.

La figure suivante (figure 9, page 14) représente, en vue de dessus, la disposition des deux directions de polarisation lors de la traversée d'un cristal orienté de telle sorte que les axes principaux Ng et Np soient dans le plan de la lame mince. Ng forme un angle α avec l'axe du polariseur du microscope.

(Suite de l'article page 16).

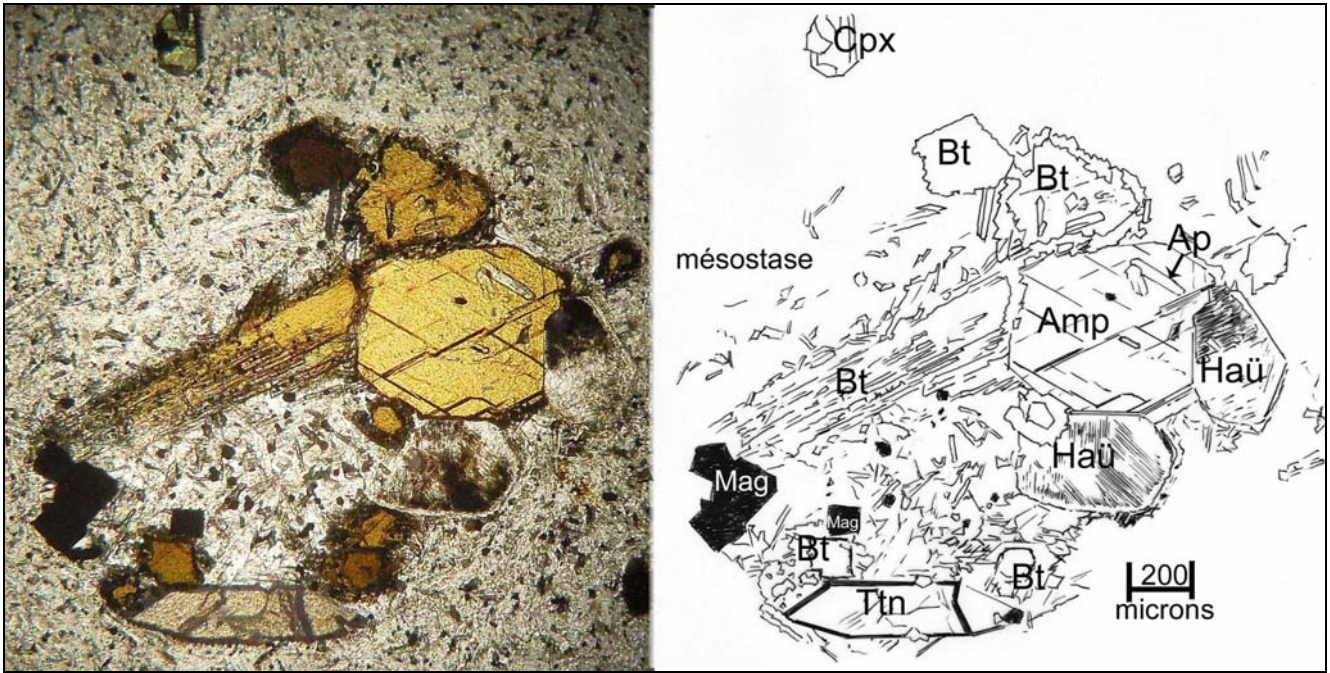


Figure 5. À gauche, cliché en lumière naturelle (lumière dite polarisée non analysée) pris sur une lame mince de phonolite prélevée sur la Roche Sanadoire, dans le complexe volcanique des monts Dore. Le dessin de droite donne l'échelle et l'identification des phénocristaux par leur nom abrégé (convention internationale) :

Cpx pour clinopyroxène. Pléochroïsme léger, dans les verts à vert jaunes ; **Bt** pour biotite. Pléochroïsme marqué dans les oranges à bruns ; **Amp** pour amphibole. Pléochroïsme faible ; **Häü** pour häüyne ; **Mag** pour magnétite. Oxyde opaque ; **Ttn** pour titanite ; **Ap** pour apatite.

La titanite (ou sphène) se reconnaît immédiatement grâce à son très fort relief, lié à un indice de réfraction énorme. C'est le cas également pour le pyroxène et l'amphibole, qui sont à relief fort à moyen. Les biotites sont facilement identifiées par leur teinte changeante d'orange à brun foncé, en fonction de l'orientation : c'est le pléochroïsme.

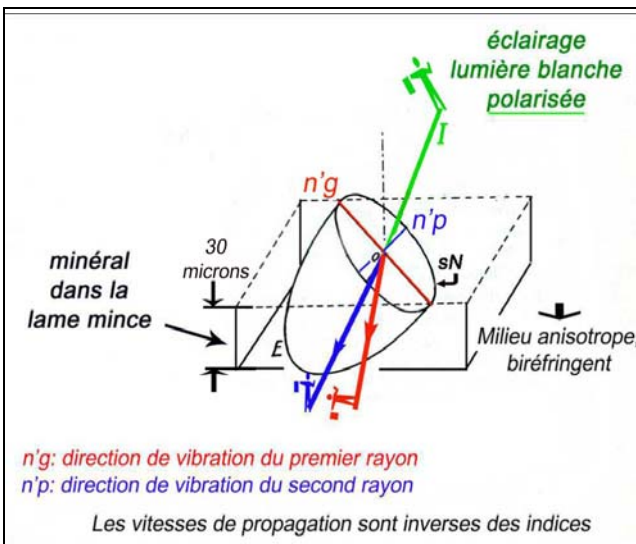


Figure 7. Géométrie de la réfraction dans une lame mince de cristal. Celui-ci est représenté par son ellipsoïde des indices. Le petit personnage avec son drapeau figure la direction du plan de polarisation attaché à chacun des rayons lumineux. Les plans de polarisation des rayons réfractés par le cristal anisotrope, de direction $N'g$ et $N'p$, sont perpendiculaires entre eux. Le plan perpendiculaire au rayon incident découpe l'ellipsoïde suivant une section elliptique sN dont les grands axes sont désignés par $N'g$ et $N'p$.

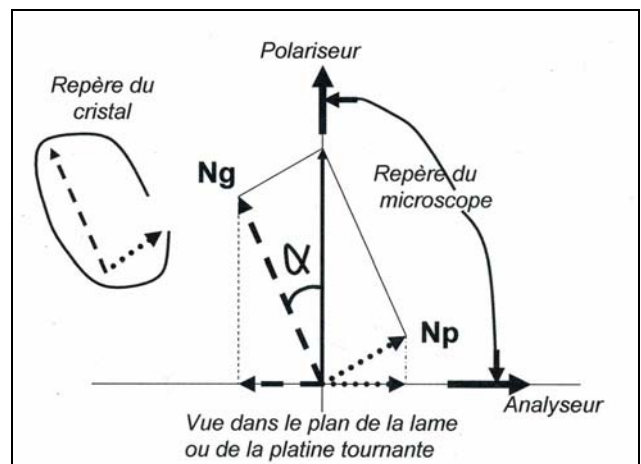


Figure 9. Sur cette vue de dessus, le repère local du microscope est indiqué par les deux directions du polariseur Ox et de l'analyseur Oy , perpendiculaires entre elles. La lumière incidente I , polarisée suivant Oy , est décomposée par le cristal en ses deux composantes suivant les directions principales Ng et Np de l'ellipsoïde. Ces deux directions forment un second repère, le repère du cristal observé : il se déduit du premier par une rotation d'un angle α autour de O . A la sortie de l'analyseur, ne subsistent que les projections des deux composantes sur Ox , axe de l'analyseur : elles sont égales et opposées. Cependant, en terme de temps de propagation dans le cristal, la biréfringence les déphase l'une par rapport à l'autre.

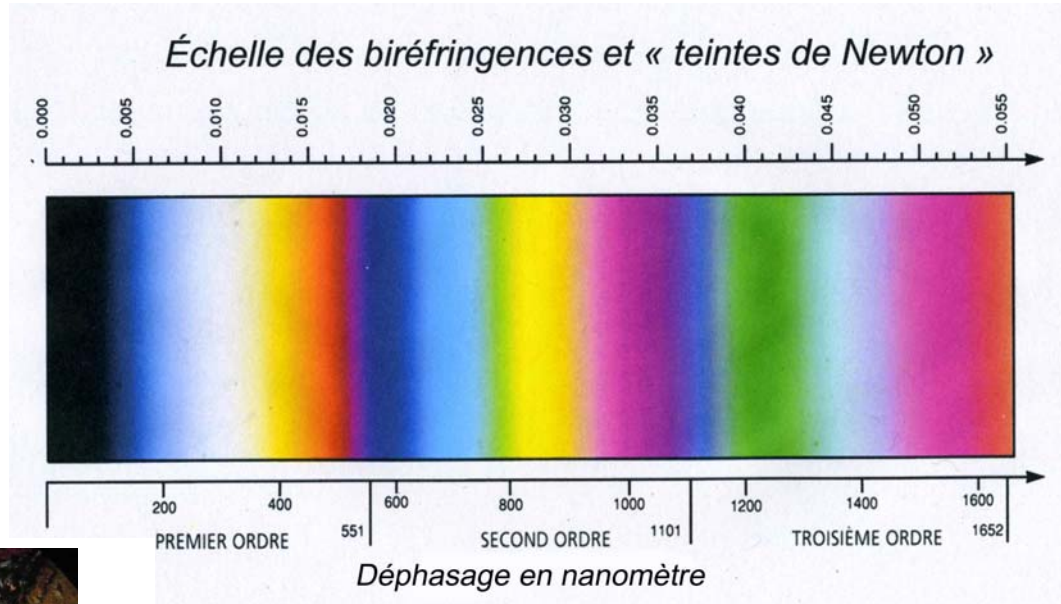


Figure 10. Diagramme des teintes de Newton, pour un éclairage en lumière blanche, en fonction de la biréfringence portée sur l'échelle du haut de la figure, de la valeur zéro à la valeur de 0,055. L'échelle du bas représente le « retard d'onde », c'est-à-dire le déphasage, proportionnel à la biréfringence, exprimé en nanomètre (milliardième de mètre, ou encore millionième de millimètre ou millième de micromètre).

La succession des ordres d'interférence du premier au troisième est indiquée.

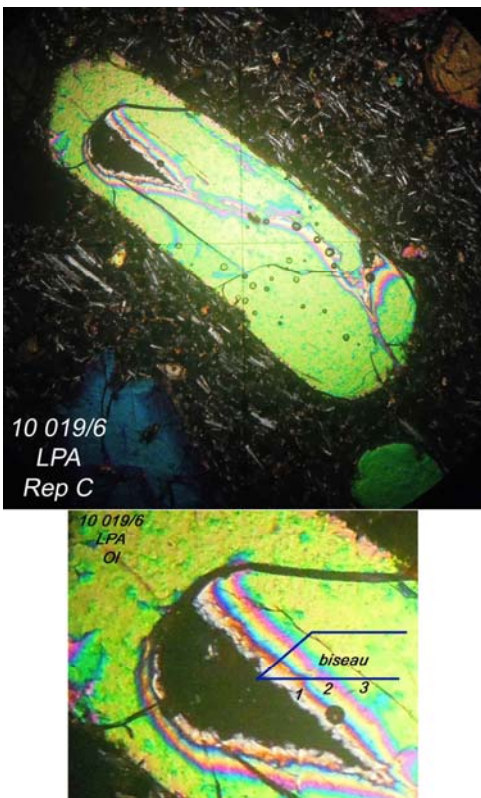


Figure 12. Le cliché du haut est pris sur la même lame que celle montrée de la figure 3. Il a été pris en LPA, sur un phénocrystal d'olivine, minéral essentiel des roches volcaniques, de la famille des péridots. Sa forme allongée et arrondie est courante dans ce type de basalte et indique qu'il s'agit d'un prisme dont l'axe coïncide avec l'axe Ng. La teinte de Newton est un beau vert du troisième ordre, à cause de la biréfringence élevée. Le cristal est troué (quart haut à gauche du cliché), et le cristal est biseauté sur la bordure du trou. Des franges multiples d'interférence apparaissent tout le long des biseaux, et le cliché du bas obtenu par grandissement numérique de l'image permet de les compter et même de les identifier dans l'échelle des teintes de Newton (figure 10). On détermine ainsi, sans ambiguïté, que la teinte verte est du troisième ordre, comme on s'y attend pour l'olivine.

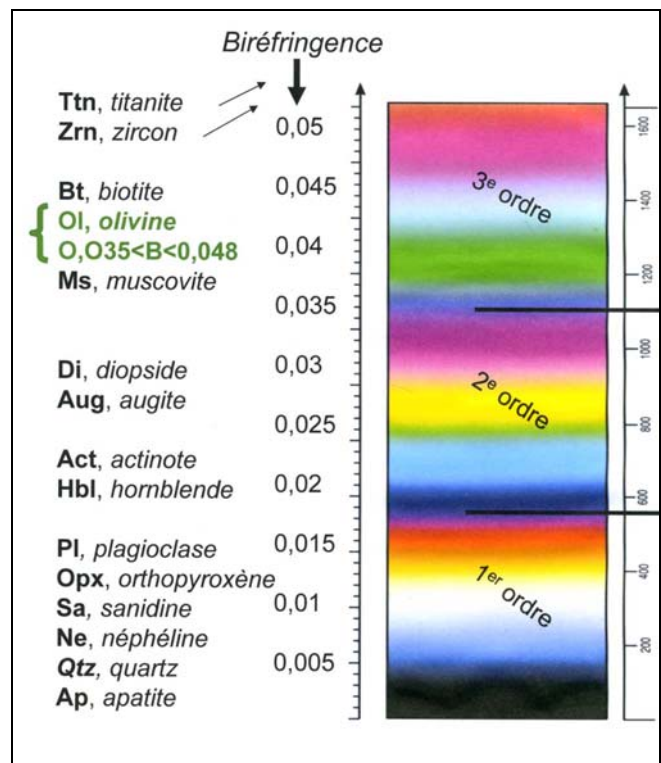


Figure 13. L'échelle des teintes de Newton est disposée verticalement, avec l'indication des trois zones délimitées par les ordres d'interférence de un à trois. En regard de chaque zone, sont placés trois groupes de familles de minéraux importants pour les roches volcaniques dans un ordre de biréfringence croissante. Il s'agit d'une présentation plus qualitative que quantitative, mais on doit ensuite se reporter aux tables donnant les gammes de valeurs de la biréfringence pour toutes ces familles de minéraux. Ces tables sont données dans le « Roubault ».

À la sortie de la lame, si aucune disposition n'est prise, les deux faisceaux réfractés vont se recombinaison pour n'en faire qu'un seul, avec des caractéristiques voisines du faisceau éclairant la lame, avant de traverser l'oculaire du microscope et pénétrer dans l'œil de l'observateur. Mais, si on dispose à la sortie un second polariseur, dénommé *analyseur*, cette fois perpendiculaire au premier, il sélectionnera les composantes des deux faisceaux projetées sur son plan, comme le montre le schéma de la figure 9 (page 14) ; il créera ainsi une *interférence* entre les deux faisceaux projetés.

Ce mode d'observation fondamental s'appelle le **mode LPA**, en lumière polarisée analysée.

A priori, le schéma aussi bien que le calcul semblent indiquer que cette interférence est destructive, car les deux composantes sont égales et opposées ! Autrement dit, aucune lumière ne devrait passer : c'est effectivement ce que l'on observe dans le cas d'une simple lame de verre ou d'une lame mince d'un verre volcanique. En pétrographie, on parle dans ce cas d'*extinction totale*. C'est aussi ce que l'on observe pour un cristal de symétrie cubique, comme le grenat ou la fluorine. En effet, dans ces derniers cas, la symétrie est si élevée que l'ellipsoïde est sphérique : il n'y a pas biréfringence. Mais c'est l'exception et, dans la très grande majorité des cas, la symétrie est moins élevée, la biréfringence même très faible existe, et il n'y a pas extinction totale. La lumière jaillit (figure 9) ! Et, de surcroît, elle peut être colorée, parfois chatoyante, suggestive... Un vrai plaisir visuel...

C'est le petit tour de magie de cette méthode, découverte par François Arago ; il lui avait donné le nom de *polarisation chromatique*. La scène s'illumine de « teintes », elles-mêmes porteuses d'une riche information, les *teintes de Newton*, en hommage au grand physicien qui avait le premier décrit le phénomène d'interférence de la lumière⁶ (figure 10, page 15).

En effet, l'interférence se produit entre deux faisceaux de même amplitude, mais décalés dans le temps puisque leurs vitesses de propagation sont différentes. On dit que les deux faisceaux sont *déphasés*. Le déphasage est inversement proportionnel à la longueur d'onde de la lumière et proportionnel à la biréfringence, et ce sont ces deux paramètres qui vont intervenir dans l'établissement d'une part des extinctions (interférences destructives), d'autre part des éclaircissements avec « teinte de Newton » (interférences constructives). Enfin, l'épaisseur de la lame a été

universellement établie à 30 micromètres, de façon à obtenir une première interférence constructive en blanc pur (dite du premier ordre) dans le cas du quartz (figure 11, ci-dessous).

Nous allons faire maintenant une *expérience de pensée* : imaginons que nous disposons d'une lame dont on peut augmenter la biréfringence continûment de la valeur zéro aux valeurs élevées.

Comme le déphasage est inversement proportionnel à la longueur d'onde de la lumière, si on augmente la biréfringence on va voir défiler les teintes de Newton. D'abord au *premier ordre*, à partir du noir absolu (extinction totale), elles passent par le blanc pur du quartz, et par les oranges et les pourpres violacés pour aboutir au bleu indigo ; puis le *second ordre* voit la reproduction fidèle des couleurs vives de l'arc-en-ciel, correspondant à une biréfringence croissant de 0,018 à 0,037 ; enfin le *troisième ordre*, avec également un spectre proche de l'arc-en-ciel, mais en couleurs plus pastel, pour une biréfringence qui atteint un maximum de 0,055. À partir du *quatrième ordre*, les couleurs chatoyantes s'atténuent...

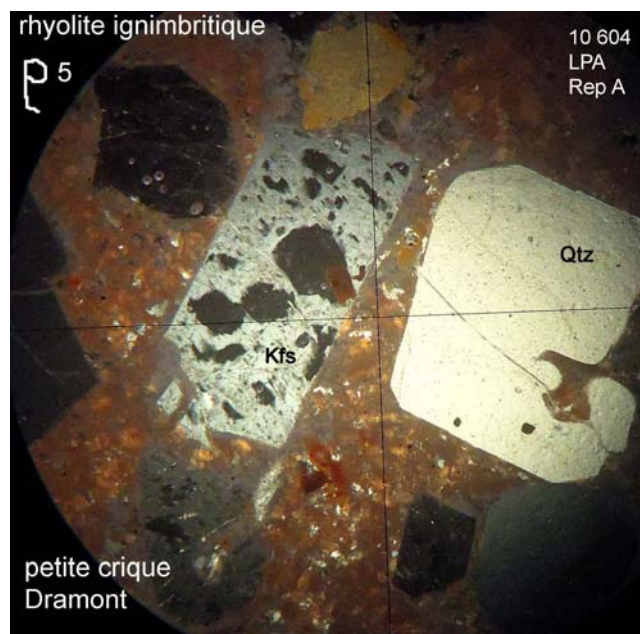


Figure 11. Sur ce cliché pris en LPA sur une lame mince taillée dans une rhyolite ignimbritique, récoltée lors de notre voyage d'étude en Estérel, un cristal de quartz apparaît parfaitement limpide, dans le blanc pur du premier ordre correspondant à une biréfringence nominale de 0,0091. La biréfringence du cristal de feldspath voisin est légèrement plus élevée, dans les gris clairs.

Un effet similaire de défilement est couramment obtenu dans l'*olivine* des roches volcaniques, commune dans les basaltes. En effet, sa biréfringence peut atteindre 0,04 et donner un beau vert émeraude du troisième ordre, bien reconnaissable. Mais si le cristal

⁶ Pour avoir une idée de l'échelle des teintes de Newton, dans tous ses ordres (jusqu'au troisième ordre), consulter l'article en couleur sur le site de la SAGA. Noter que Newton était « passé à côté » de l'explication par la nature ondulatoire de la lumière, et s'en tenait à la nature corpusculaire de la lumière.

d'olivine est fracturé ou aminci en biseau sur les bords, il apparaît un système de franges d'interférence avec défilement des teintes de Newton des trois premiers ordres (figure 12, page 15). On tient là une méthode infaillible de détermination de l'ordre dans l'échelle des teintes de Newton.

**Une étape
dans l'identification d'un minéral :
la détermination
de la biréfringence**

Chaque famille de minéraux a sa biréfringence en général restreinte à un intervalle bien délimité dans l'échelle de la figure 13 (page 15). La figure donne visuellement une idée de la correspondance entre teinte de Newton et espèce minérale, avec l'exemple de l'olivine, déjà illustré par la figure 12. À l'inverse, l'examen sur la lame mince des teintes des cristaux de la même espèce aide à leur détermination, même si ce critère n'est généralement pas suffisant. Toutefois, la teinte de Newton propre à l'espèce minérale et à sa biréfringence n'est obtenue que si le cristal est orienté par rapport au faisceau de lumière incidente polarisée, de telle sorte que les axes principaux de son ellipsoïde des indices lui soient à peu près perpendiculaires*.

Auparavant, il faut déterminer l'ordre dans l'échelle des teintes (voir § ci-dessus et figure 12, la méthode dite du biseau).

*Autrement dit, ce sont les cristaux dont les axes principaux **Ng** et **Np** sont disposés dans un plan proche de celui de la lame mince qui donneront précisément la valeur de la biréfringence : il faut donc les sélectionner dans la lame parmi tous ceux de leur famille, sur le critère de la teinte la plus « élevée » dans l'échelle de Newton.

Dans la pratique, l'expérimentateur se heurte à de nombreuses ambiguïtés, et nous verrons ultérieurement, dans la deuxième partie de l'article, qu'il faut recourir à de multiples critères additionnels. De façon assez inattendue, ce sont les **défauts des cristaux** qui vont venir à notre secours pour atteindre le but, qui est la détermination de la structure et de la nature du minéral.

Comme le souligne Marcel Roubault dans l'introduction de son ouvrage de référence (ouvrage cité), il n'existe pas de clé pétrographique au sens des clés de la taxonomie. Dans le cas des roches volcaniques, que nous étudions dans la Commission de volcanisme de la SAGA, nous utilisons une démarche empirique, combinant un grand nombre de critères, et s'appuyant sur la cristallographie, comme nous allons essayer de le montrer.

SYSTÈME CRISTALLIN : Axes de symétrie :	CUBIQUE <i>Plusieurs axes de symétrie d'ordre > 2</i>	RHOMBOÉDRIQUE (R) QUADRATIQUE (Q) HEXAGONAL (H) <i>Un seul axe de symétrie d'ordre > 2</i>	ORTHORHOMBIQUE (O) MONOCLINIQUE (M) TRICLINIQUE (T) <i>Aucun axe de symétrie d'ordre > 2</i>
Minéraux principaux :	Häüyne	Quartz (R), leucite, néphéline	Feldspaths (M et T) Micas et chlorites (M) Pyroxènes (O et M) Amphiboles (O et M) Péridots (O)
Minéraux accessoires :		Apatite (H) Zircon (Q) Calcite (R)	Titanite (M) Zoïsite (O) Clinozoïsite (M)
Minéraux accidentels :	Magnétite, chromite, Spinelle	Rutile (Q) Ilménite (R)	

Figure 14. Principaux minéraux à déterminer dans les roches volcaniques.

Pour terminer cette première partie, nous donnons une vue d'ensemble des minéraux à déterminer dans les roches volcaniques (figure 14, page 17). La liste établie dans le tableau est volontairement réduite. Elle doit paraître singulièrement banale aux minéralogistes purs, et aux amateurs recherchant les minéraux pour leur intérêt scientifique, ou esthétique, ou pour leur rareté. Mais on ne doit pas oublier que notre cadre est la pétrologie endogène et l'étude du volcanisme, voire du magmatisme, tout au long de nos entretiens en commission de volcanisme et de nos voyages d'étude.

Le but recherché dans la pétrographie est la description et la détermination de la roche, dans ses compositions minéralogique et chimique, pour permettre de remonter à son histoire et aux conditions de sa formation.

Dans ce cadre, l'expérience montre qu'on doit concentrer les efforts sur les minéraux les plus significatifs pour tracer cette histoire « magmatique », histoire qui le plus souvent se déroule dans une chambre magmatique ou même dans la zone de fusion du manteau supérieur, ou encore lors de la remontée du liquide basaltique (exemple : les séries ophiolitiques).

Le tableau (figure 14) établit le lien entre la cristallographie et la nature du réseau cristallin, d'une part, et les minéraux significatifs, d'autre part, placés dans trois catégories (voir « *Le Roubault* ») : minéraux *principaux*, minéraux *accessoires*, minéraux *accidentels*.

Du point de vue cristallographique, qui va bien apparaître dans la seconde partie de l'article, les principaux minéraux à étudier, identifier et décrire ont un réseau à faible symétrie : ils sont dans la quatrième colonne.

Paradoxalement, c'est un fait plutôt favorable, car ainsi ils ne sont pas en extinction totale, ce qui permet de bien observer et d'utiliser leurs teintes de Newton et tous leurs défauts, qui sont autant d'indices en LPA, lumière polarisée analysée.

Commentaires sur le tableau

- **Premier groupe** de lignes : la mention du système cristallin, parmi les sept systèmes de la classification universelle, est accompagnée d'une mention sur les axes de symétrie et leur ordre. À cela, une raison déterminante : l'orientation de l'ellipsoïde des indices est complètement liée à ces axes, et déterminée par le degré de symétrie.

- **Second groupe** de lignes : en caractères gras, le quartz et les six classes de silicates qui jouent un

rôle fondamental dans les roches volcaniques. Nous regroupons dans une même classe des *feldspathoïdes* : la *haiÿyne* (figure 5), la *leucite* et la *néphéline*.

- **Troisième groupe** de lignes : les minéraux dits accessoires sont souvent assez abondants en quantité, mais de petites tailles, et même de très petites tailles (figure 5, page 14) pour la *titanite* et l'*apatite*. Ces derniers sont en général bien visibles malgré leur taille, sur des critères aussi simples que le relief ou l'extinction. Les épidotes *zoïsite*, *clinozoïsite*, *piémontite* et *pistachite* (variété ferrique de la clinozoïsite) sont fréquentes et apparaissent souvent comme des minéraux assez banals de l'altération des silicates.

- **Quatrième groupe** de lignes : les « minéraux accidentels ». Le terme n'est pas très heureux, car la *magnétite*, et surtout la *titano-magnétite*, sont souvent très abondantes, mais toutefois de petite taille, comme les « minéraux accessoires ».

La magnétite, qui est un oxyde de fer ou de fer/titane, est immédiatement visible, du fait de son opacité. De même le *spinelle*, tout de suite reconnaissable, dans une *péridotite* ou une *lherzolite*, à sa couleur pourpre brun foncé profond, et son extinction totale en lumière polarisée analysée. Loin d'être accessoire, le spinelle est un marqueur essentiel des roches mantelliques. Le *rutile*, en très petits cristaux, est cependant facilement identifiable par son habitus aciculaire et sa macle caractéristique.

Remarque : nous n'avons pas retenu les *zéolites* dans ce tableau pour ne pas l'alourdir. Les *zéolites*, comme la calcite, apparaissent souvent comme des minéraux de dépôt hydrothermal en phase finale de refroidissement du magma dans les vacuoles.

Remerciements

Ma reconnaissance va à notre Président et à tous les participants au séminaire de pétrographie de la SAGA, qui, année après année, m'ont encouragé à poursuivre dans cette voie. Je dois aussi beaucoup de gratitude à Philippe Berger-Sabatel qui, inlassablement conseille, corrige et veille à la qualité de nos publications.

Bibliographie

ROUBAULT M. (1982) – *Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant*. 3^e édition revue et augmentée par J. Fabriès, J. Touret et A. Weisbrod. Éditions Lamarre-Poinat.
LAPPARENT (de) A. (1894) – *Précis de minéralogie*. Masson éd.
BEAUX J.-F., PLATEVOET B., FOGELGESANG J.-F. (2012) – *Atlas de pétrologie*. Dunod éd. ■