Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 69 (1989)

Heft: 2

Artikel: Importance des différents processus d'hybridation dans les plutons granitiques du batholite de la Sierra Nevada, Californie

Autor: Barbarin, Bernard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-52796

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

SCHWEIZ. MINERAL. PETROGR. MITT. 69, 303–315, 1989

Importance des différents processus d'hybridation dans les plutons granitiques du batholite de la Sierra Nevada, Californie

par *Bernard Barbarin*[1]

Abstract

Petrography, mineralogy, geochemistry, and isotope study of magmatic enclaves and mafic rocks associated with calc-alkaline granitoids from the central part of the Sierra Nevada Batholith indicate that several hybridization processes are involved in the genesis and evolution of the various components of plutons. These processes are thorough magma mixing, mingling, mineral, chemical, and thermal transfers. They are active at depth, during or after emplacement of the plutons. Most of them are favored by convections. Comparison of textures, mineralogy, major and rare-earth elements chemistry, and Rb-Sr isotopes between the different associated rocks lead to the discussion of effects of these processes. Physical properties of the coeval components constrain the role of each process. A model is proposed to show how the relative rheology between the two coeval components influences either the occurrence or the absence of the hybridization processes. All these processes are complementary and tend to reduce the contrasts between the various rocks associated in the plutons.

Keywords: Sierra Nevada Batholith, calc-alkaline granitoids, hybridization processes, magma mixing, mingling, mineral transfer.

Résumé

L'étude pétrographique, minéralogique et géochimique des enclaves magmatiques et des roches mafiques associées aux granitoïdes calco-alcalins de la zone centrale du batholite de la Sierra Nevada a permis de montrer que de nombreux processus d'hybridation sont intervenus dans la genèse et l'évolution des différents constituants des plutons. Les principaux mécanismes sont les mélanges, partiels ou avec homogénéïsation, les transferts de minéraux, les transferts chimiques et thermiques. Ces processus qui sont actifs en profondeur, pendant ou après la mise en place des plutons, sont généralement favorisés par des mouvements de convection qui tendent à brasser les composants en présence. La comparaison des textures et des compositions (minéralogie, chimie des éléments majeurs et des terres rares, isotopes du rubidium et du strontium) des roches associées permettent de discuter des effets respectifs des différents processus. Le rôle de chacun est étroitement contrôlé par les propriétés physiques des composants présents. L'apparition ou l'absence de certains processus peuvent par exemple dépendre de la rhéologie relative des deux composants. Tous ces processus sont complémentaires et concourent à minimiser, voire à annuler les contrastes entre les différentes formations associées dans les plutons.

Introduction

Le batholite de la Sierra Nevada (fig. 1) représente un fragment de la ceinture des granites circum-pacifiques (PITCHER, 1983). Orienté NNO-SSE, il s'étend sur plus de 500 km de long et une centaine de km de large. Il est formé par une première chaîne de plutons jurassiques ou plus rarement triasiques, fortement érodés, recoupée par une chaîne plus méridienne de plutons crétacés. Cette dernière donne à la Sierra Nevada son aspect actuel.

Mis en place à l'aplomb de zones de subduction, ces granitoïdes au caractère calco-alcalin bien marqué, peuvent contenir jusqu'à 7% de CaO et sont riches en amphiboles. Les granodiorites sont largement dominantes; les tonalites et granites sont aussi assez communs (BATEMAN, 1983, 1989). A ces granitoïdes sont associés d'importants stocks de roches mafiques qui présen-

[1] Laboratoire de Pétrographie-Volcanologie, Université de Paris-Sud, Bât. 504, F-91405 Orsay Cedex

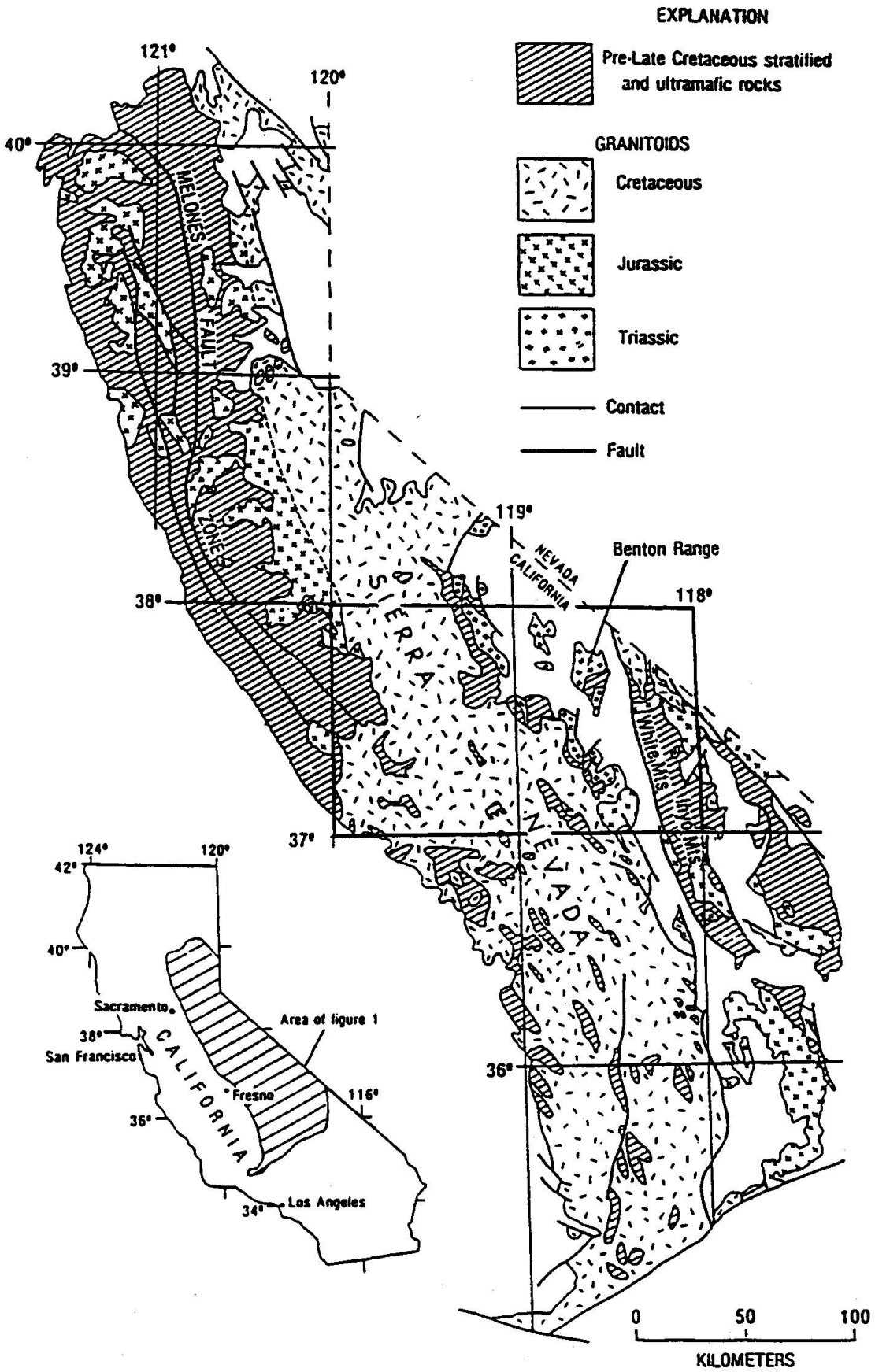


Fig. 1 Carte géologique simplifiée du batholite de la Sierra Nevada, Californie (BATEMAN, 1989). Les plutons étudiés qui sont d'âge Crétacé, appartiennent à la zone centrale, délimitée par les 37e et 38e parallèles.

tent des compositions allant des diorites quartziques aux gabbros. Ces roches mafiques apparaissent sous la forme d'intrusions kilométriques, d'agrégats métriques, de filons ou d'enclaves.

Modèle de genèse et d'évolution des différentes roches associées

L'étude des enclaves et autres roches mafiques associées à des granitoïdes crétacés de la zone centrale de la Sierra Nevada (fig. 1) a permis de proposer un modèle de genèse et d'évolution de l'ensemble de ces roches (BARBARIN et BATEMAN, 1986). Fondé sur les données pétrographiques, minéralogiques, géochimiques et isotopiques obtenues pour cinq plutons (BARBARIN et al., 1989), ce modèle est illustré par un diagramme triangulaire utilisant les modes des roches étudiées (fig. 2a). Ce diagramme permet de séparer les différentes roches des plutons, ainsi que les processus de mélange de magmas, de différenciation magmatique et de ségrégation minérale (fig. 2b).

Les enclaves magmatiques sombres (EMS) sont dans leur grande majorité constituées pour moitié de plagioclase et pour moitié de minéraux mafiques. Quelques rares exceptions sont anormalement enrichies en minéraux mafiques. D'autres sont en revanche faiblement enrichies en quartz et en feldspath alcalin et ont donc des compositions assez proches des granitoïdes les plus sombres. Les granitoïdes sont plus riches en minéraux felsiques parmi lesquels le plagioclase reste dominant même lorsqu'un enrichissement en quartz et en feldspath alcalin accompagne la différenciation. Comme les enclaves, les filons mafiques principalement constitués de plagioclase et de minéraux ferro-magnésiens peuvent se rapprocher de la composition des granitoïdes par enrichissement en quartz et en feldspath alcalin. Les agrégats de minéraux mafiques se distinguent par leur pauvreté non seulement en quartz et en feldspath alcalin mais également en plagioclase. En revanche, ils se caractérisent par une grande richesse en minéraux accessoires qui peuvent représenter jusqu'à 5% du mode.

Le modèle (fig. 2b) fait intervenir un composant (M) et un composant felsique (F) dont le mélange avec homogénéïsation («mixing») produit des magmas hybrides homogènes (H1, H2, H3) qui, par différenciation donneront les différents faciès des plutons zonés. Si ce mélange ne se fait que de façon partielle («mingling»), des magmas hybrides hétérogènes seront produits. Dans cette émulsion, le magma mafique fortement modifié subsistera sous la forme d'EMS. Du magma mafique (M) injecté tardivement dans le système peut lui aussi se mélanger localement avec du magma granitique déjà différencié (D). Un tel processus peut s'observer le long des filons mafiques qui sont souvent fragmentés ou partiellement assimilés. Les grands cristaux de minéraux mafiques et accessoires peuvent être concentrés par accumulation gravitaire ou dynamique pour former de grandes masses d'une roche mafique à grain grossier et de composition hétérogène. Des EMS et des xénolites sont souvent entraînés par les mêmes processus cumulatifs et sont alors enrobés dans ces concentrations de grands cristaux d'amphibole et de biotite. Les contacts entre ces cumulats et les enclaves sont toujours francs, alors que leurs contacts avec les granitoïdes encaissants sont généralement progressifs. D'exceptionnelles EMS particulièrement riches en minéraux mafiques dérivent de processus cumulatifs identiques qui affectent le composant mafique (fig. 2a).

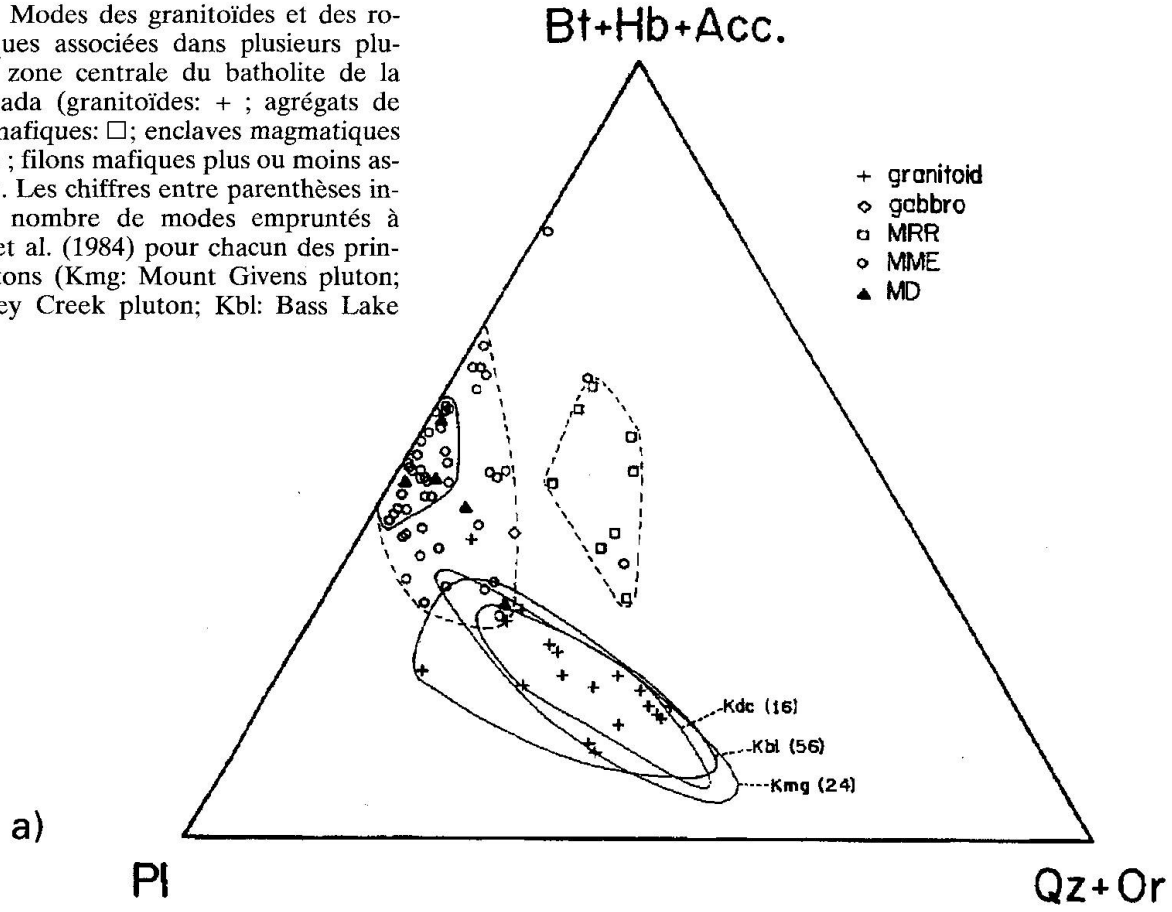
Ce modèle déjà complexe est encore compliqué par la répétition de certains de ces processus. La répétition et l'enchaînement des processus d'hybridation, clairement mis en évidence dans d'autres plutons (DIDIER, 1987; BARBARIN, 1988a et b), permettent d'expliquer la grande diversité des EMS souvent associées dans les mêmes essaims, et également la formation d'EMS doubles.

La description détaillée des différentes roches mafiques et des granitoïdes associés dans les plutons de la Sierra Nevada, l'exploitation des nombreuses données analytiques publiées parallèlement (BARBARIN et al., 1989) et le développement du modèle brièvement résumé ci-dessus seront rassemblés dans une autre publication. Le but du présent article est de montrer que les processus d'hybridation sont de nature variée, que leur action et leur prépondérance varient souvent avec les différents niveaux structuraux, et que leurs effets diffèrent sans pour cela empêcher leur complémentarité.

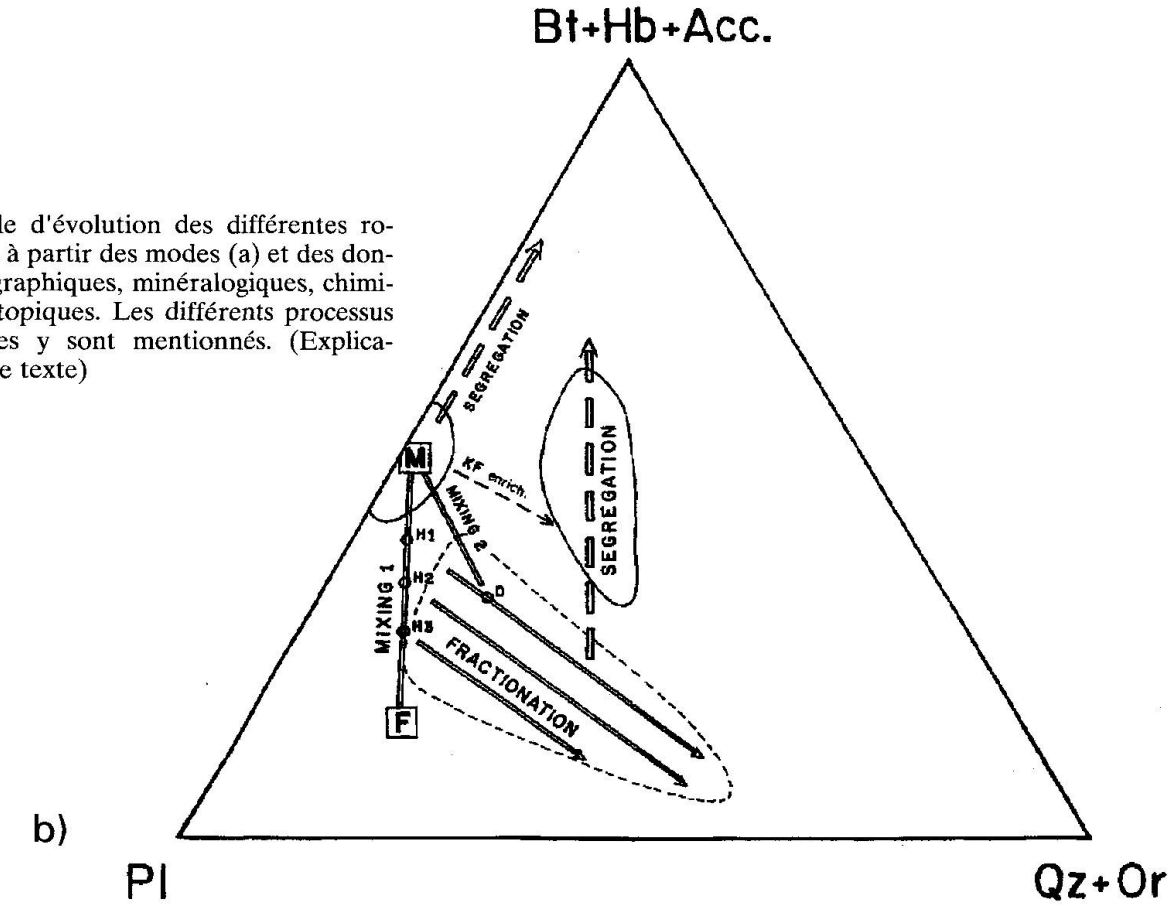
Les différents processus d'hybridation et leurs résultats

Le mélange avec homogénéïsation ou «mixing» se produit en profondeur, probablement dans la croûte inférieure, où les conditions thermodynamiques sont favorables. Dans l'hypothèse fréquemment admise, le composant mafique provient du manteau supérieur et apporte la chaleur nécessaire pour fondre la croûte inférieure et produire le composant felsique (DIDIER et LAMEYRE, 1969; PATCHETT, 1980; MARSH, 1984;

Fig. 2 (a) Modes des granitoïdes et des roches mafiques associées dans plusieurs plutons de la zone centrale du batholite de la Sierra Nevada (granitoïdes: + ; agrégats de minéraux mafiques: □; enclaves magmatiques sombres: ○ ; filons mafiques plus ou moins assimilés: ▲). Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de modes empruntés à BATEMAN et al. (1984) pour chacun des principaux plutons (Kmg: Mount Givens pluton; Kdc: Dinkey Creek pluton; Kbl: Bass Lake pluton).



(b) Modèle d'évolution des différentes roches réalisé à partir des modes (a) et des données pétrographiques, minéralogiques, chimiques et isotopiques. Les différents processus magmatiques y sont mentionnés. (Explications dans le texte)



HUPPERT et SPARKS, 1988). Le mélange avec homogénéïsation se produit dès la formation du magma felsique. Il permet d'obtenir des roches homogènes comme par exemple des granodiorites calco-alcalines. Bien que les caractéristiques géochimiques et isotopiques des granitoïdes calco-alcalins soient intermédiaires entre celles des roches mantelliques et des roches crustales (FOURCADE et ALLEGRE, 1981; DE PAOLO, 1981), leur nature hybride reste difficile à démontrer pétrographiquement.

Le mélange avec homogénéïsation n'affecte qu'exceptionnellement des magmas totalement dépourvus de minéraux. Les phénocristaux présents en plus ou moins grande quantité dans les deux composants vont se retrouver dans un nouveau milieu où ils sont en déséquilibre. Ils seront alors soit recristallisés, soit totalement résorbés, soit partiellement résorbés et ensuite blindés. La présence souvent discrète de ces minéraux à auréoles réactionnelles aussi appelés xénocristaux, est un indice de la nature hybride des magmas apparemment homogènes. L'étude minutieuse des granitoïdes de la Sierra Nevada permet de mettre en évidence la présence sporadique de tels minéraux comme par exemple des plagioclases à cœurs constitués de xénocristaux d'andésine (BARBARIN, à paraître). Les premiers xénocristaux (plagioclase, amphibole, pyroxène) proviennent exclusivement du composant mafique car l'énergie dépensée par celui-ci pour fondre la croûte environnante provoque une baisse de température qui déclenche sa cristallisation (HUPPERT et SPARKS, 1988).

Le mélange partiel ou «mingling» remplace le mélange avec homogénéïsation lorsque ce dernier n'est plus possible à cause de conditions rhéologiques trop contrastées ou de manque d'énergie (SPARKS et MARSHALL, 1986). Les mélanges partiels qui produisent des roches hybrides dans lesquelles les deux composants initiaux souvent fortement modifiés, sont encore distincts, diffèrent des mélanges avec homogénéïsation qui produisent des roches hybrides homogènes dans lesquelles les composants initiaux ne peuvent plus être distingués (BARBARIN, 1988a).

Le mélange partiel peut intervenir en profondeur lorsque la viscosité du magma mafique est trop forte, ou lorsque son volume est trop faible et ne permet pas d'avoir suffisamment d'énergie pour permettre un mélange avec homogénéïsation. Il opère aussi pendant la mise en place des plutons pendant laquelle les masses mafiques peuvent être dissociées mécaniquement lors de leur injection simultanée avec les magmas granitiques dans les conduits d'alimentation des plutons. Le mélange partiel produit une émulsion grossière du magma mafique dans le magma felsique, avec des contacts entre les deux magmas généralement bien délimités. Les EMS proviennent de la cristallisation des boules de magma mafique. Encore appelées «enclaves microgrenues sombres» (DIDIER, 1964, 1973) ou «enclaves microgranitoïdes» (VERNON, 1983, 1984), ces enclaves se caractérisent par une texture magmatique et par un grain toujours plus fin et une teinte toujours plus sombre que l'encaissant granitique. Dans la Sierra Nevada, les EMS, très abondantes, présentent une exceptionnelle diversité quant à leur texture, la taille des grains, leur paragenèse, la nature et l'abondance des phénocristaux, leur forme et leur taille, leurs contacts avec l'encaissant et leurs compositions chimiques. Cette diversité et la présence d'enclaves doubles montrent que le mélange partiel se produit de façon répétitive (DIDIER, 1987; BARBARIN, 1988a).

La distribution des EMS n'est pas aléatoire dans les plutons granitiques de la Sierra Nevada. Leur abondance augmente avec l'indice de coloration de l'encaissant granitique. Comme la grande majorité des plutons sont normalement zonés, les EMS sont préféntiellement concentrées dans les zones externes, à proximité des contacts avec l'encaissant métamorphique ou plutonique, alors qu'elles sont exceptionnelles ou absentes au centre de certains plutons. Cette relation étroite entre abondance des enclaves et basicité de leur roche hôte indique qu'une grande proportion de composant mafique va simultanément donner par mélange avec homogénéïsation un granitoïde sombre, et par mélange partiel une grande quantité d'EMS. Cette observation tend à montrer qu'un volume important de magma mafique ne va pas favoriser le mélange avec homogénéïsation au détriment du mélange partiel (SPARKS et MARSHAL, 1986; BARBARIN, 1988a). Elle suggère en revanche que lorsque le composant mafique est très abondant, seule une certaine proportion de celui-ci est mélangée de façon homogène avec le composant felsique, le restant étant éparpillé dans le granitoïde résultant sous forme d'enclaves.

Dans les EMS comme dans leur encaissant, les xénocristaux sont présents, parfois en grande quantité. Ils proviennent soit du composant mafique soit du composant felsique. Dans les enclaves des granites de la Sierra Nevada, les xénocristaux d'andésine partiellemment corrodés qui constituent les cœurs des phénocristaux de plagioclase (BARBARIN, à paraître) et les agrégats de minéraux mafiques, millimétriques et de forme géométrique, proviennent du composant mafique. Les quartz ocellaires abondants dans les

enclaves des rares plutons comme celui d'El Capitan, proviennent en revanche du composant felsique ou du magma granitique. Les enclaves des granitoïdes de la Sierra Nevada ne contiennent pas de feldspaths rapakivi car les roches hôtes sont pauvres en feldspath potassique; les seuls granitoïdes de la Sierra Nevada à mégacristaux de feldspath potassique sont des faciès très évolués, pauvres en enclaves, localisés au cœur des plutons. La présence de xénocristaux issus du composant mafique dans les enclaves montre que ces dernières ne proviennent pas directement de la cristallisation de ce composant mais de magmas déjà fortement hybrides. La rareté voire l'absence des xénocristaux issus du composant felsique indique que les transferts de minéraux et probablement les autres processus d'hybridation ne sont plus très actifs dans les plutons du batholite de la Sierra Nevada quand le magma granitique commence à cristalliser.

Dans la majorité des cas, le mélange avec homogénéïsation semble plus précoce et se passer à de plus grande profondeur que le mélange partiel. Toutefois, une alternance entre ces deux processus d'hybridation est assez fréquente. Une relation étroite entre ces deux mécanismes, mais également avec d'autres processus d'hybridation semble probable (BARBARIN, 1988b).

Dans les exemples naturels, la limite entre mélange avec homogénéïsation et mélange partiel est assez difficile à préciser. Les granitoïdes de la Sierra Nevada qui contiennent des xénocristaux en plus ou moins grande abondance ne sont pas vraiment des roches hybrides homogènes car les éléments d'un des composants y subsistent. Par ailleurs, il est également important de faire intervenir la notion d'échelle d'observation. Si le granitoïde ou une enclave pris isolément sont des roches hybrides obtenues par mélange avec homogénéïsation, en revanche, à l'échelle de l'affleurement, le mélange n'est que partiel car il est encore possible de distinguer les représentants largement modifiés des deux composants initiaux.

Les transferts de minéraux accompagnent les processus de mélange. Il ne sont possibles qu'entre des magmas dans lesquels des phénocristaux sont déjà présents (DIDIER, 1987). Ils se font d'abord du composant mafique qui cristallise le premier, vers le composant felsique, ensuite du composant felsique vers le composant mafique. Ils conduisent à la formation de minéraux à auréoles réactionnelles ou xénocristaux qui sont d'excellents indicateurs des processus de mélange (références dans SABATIER, 1984, et BARBARIN, 1988a). Les xénocristaux présentent une grande mobilité et peuvent traverser les interfaces entre magmas mafique et felsique comme le montrent les grands cristaux d'amphibole ou de plagioclase à cheval sur les contacts entre enclaves et encaissants granitiques de la Sierra Nevada.

Les transferts chimiques font également partie des principaux processus d'hybridation dans les systèmes granitiques. Ils complètent les processus de mélange dont ils se distinguent par leur opiniâtreté. Ils tendent à homogénéiser les magmas hybrides produits par les processus de mélange. Les transferts chimiques se font par diffusion ou par percolation. Ils sont particulièrement efficaces dans les magmas riches en volatils. Il est important de distinguer les transferts chimiques à faible échelle (diffusion) qui sont limités autour de certaines enclaves, des processus d'homogénéïsation chimiques à grande échelle qui affectent un grand volume de magmas et dont les effets ne sont pas décelables pétrographiquement.

Des études modales et chimiques détaillées des bordures à grain fin de certaines enclaves de la Sierra Nevada montrent que ces bordures sont relativement enrichies en minéraux mafiques (ou appauvries en minéraux felsiques) par rapport aux zones plus internes (fig. 3). Certaines enclaves sont entourées par des halos felsiques. Ces zones de l'encaissant granitique fortement appauvries en minéraux mafiques peuvent parfois atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur. Les halos felsiques sont généralement bien développés autour des EMS qui possèdent une épaisse bordure à grain fin, riche en minéraux mafiques. La formation des halos felsiques dans l'encaissant granitique et des bordures d'enclaves enrichies en minéraux mafiques est étroitement liée à des transferts chimiques. Les halos felsiques sont obtenus par expulsion de l'enclave de la silice et des alcalins et par absorption par l'enclave des ferro-magnésiens de la roche hôte. Les éléments ferro-magnésiens sont alors piégés dans les bordures à grain fin des enclaves dont la cristallisation rapide est communément expliquée par la trempe de volumes de magmas relativement chauds suite à leur introduction dans un magma froid (références dans DIDIER, 1973). Les transferts chimiques ont également été évoqués pour expliquer la formation de halos felsiques autour d'enclaves à bordures enrichies en minéraux ferro-magnésiens des granites du Mont Blanc (BUSSY, 1987) et de Saint Gervais d'Auvergne (BELIN, 1988). Ces transferts chimiques sont induits par une nucléation rapide des minéraux ferromagnésiens (BELIN, 1988).

Dans les granites de la Sierra Nevada, les effets des processus d'homogénéïsation chimique à grande échelle sont nombreux. Les EMS, ovoï-

des, de quelques dizaines de centimètres de diamètre, à grain fin de l'ordre de quelques millimètres et riches en phénocristaux de plagioclase, d'amphibole et de biotite, sont les plus communes (plus de 50% des enclaves). Ces enclaves ont été minéralogiquement et chimiquement comparées avec leur granitoïde hôte dans plusieurs plutons de la zone centrale de la Sierra Nevada (BARBARIN et al., 1989). Les résultats ont été obtenus pour différents couples enclave-encaissant provenant des différentes zones d'un même pluton ou de plutons voisins. L'étude à la microsonde électronique des biotites et des amphiboles atteste de la similitude de composition de chacune de ces phases dans chaque couple, quelle que soient la taille et l'habitus des cristaux analysés. Lorsque des variations de composition apparaissent entre les différents faciès d'un même pluton ou entre les granitoïdes de plutons voisins, des variations identiques affectent leurs enclaves respectives. Les biotites et amphiboles ont donc des compositions identiques dans chaque couple enclave-encaissant bien qu'elles soient en proportions nettement distinctes. Les écarts en teneurs en FeO_t et en MgO entre enclave et encaissant dans chaque couple sont cons-

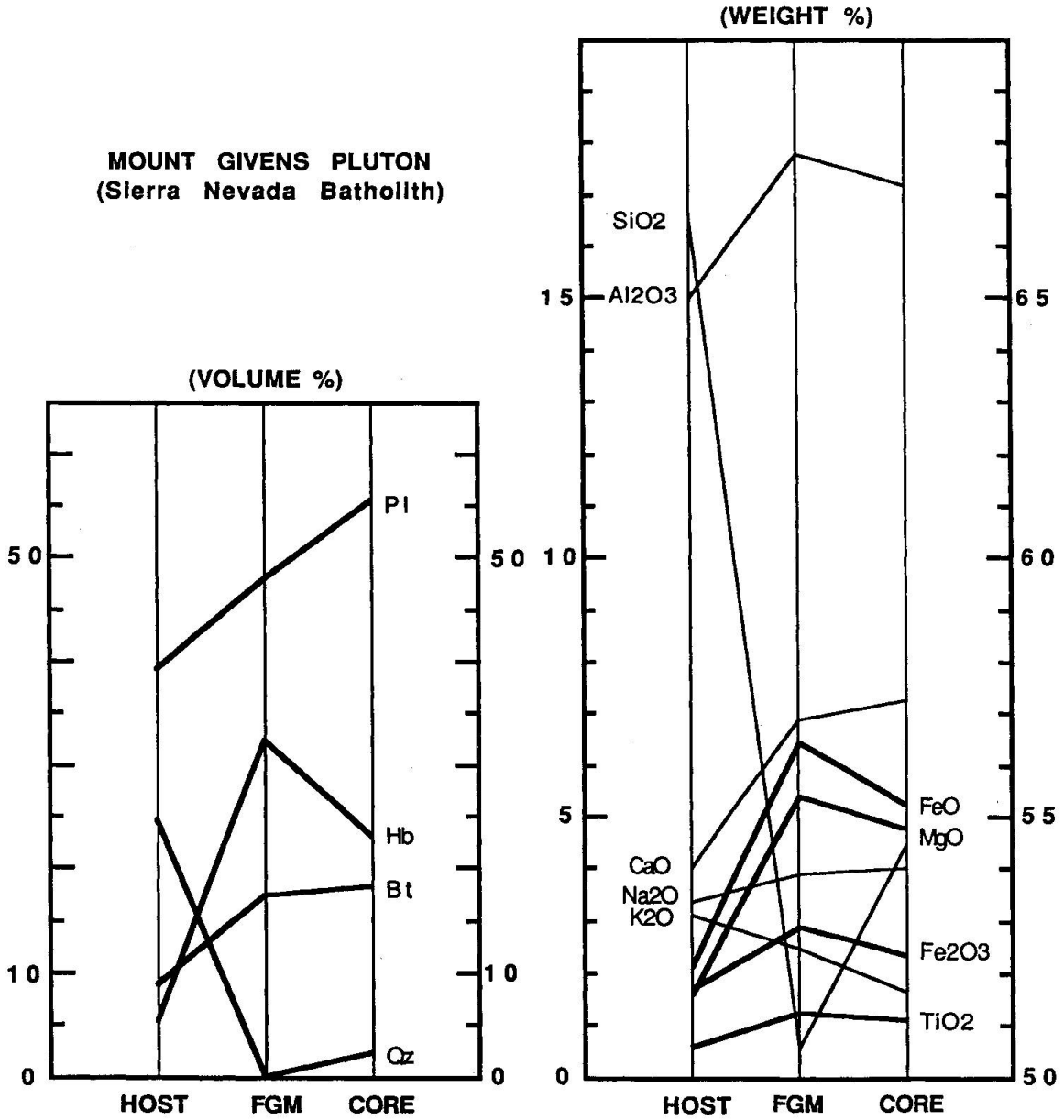


Fig. 3 Variations des teneurs en minéraux cardinaux et en éléments majeurs entre la granodiorite de Mount Givens (HOST), la bordure à grain fin (FGM) et le cœur (CORE) d'une enclave magmatique sombre. La granodiorite a été prélevée à 10 cm de l'enclave, et le cœur de l'enclave à environ 5 cm de la bordure qui a 2 cm d'épaisseur.

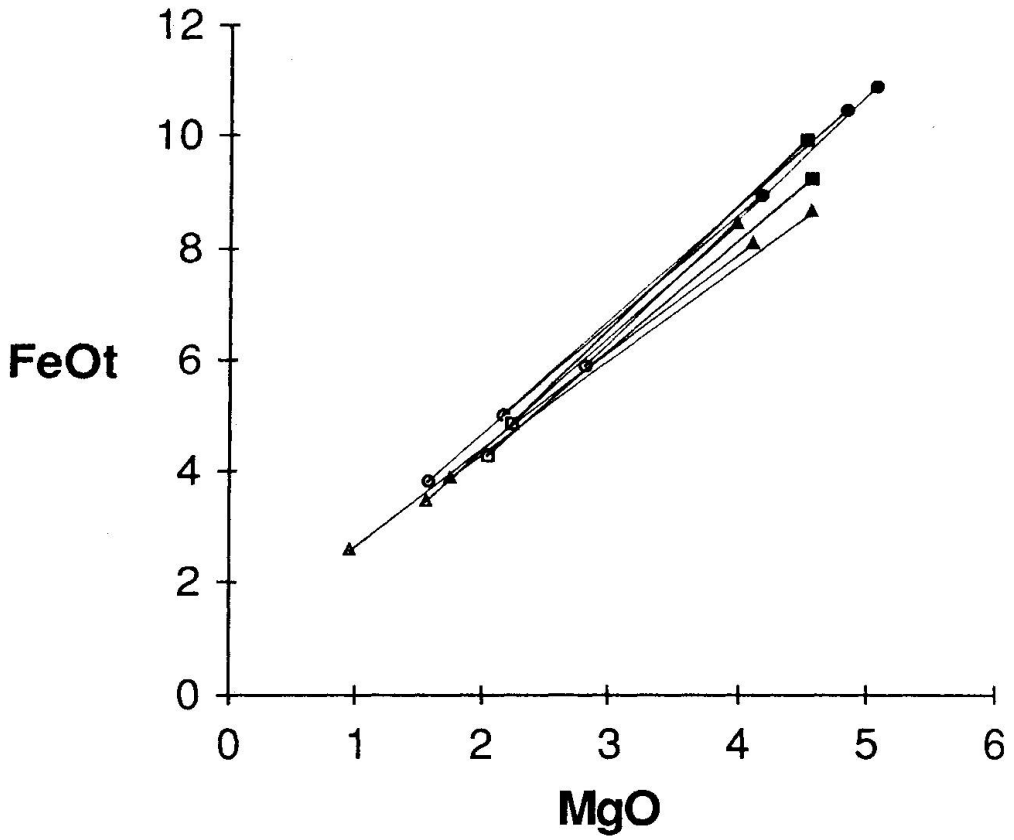


Fig. 4 Pourcentage de FeO_t et de MgO dans les enclaves magmatiques sombres (figurés pleins) et dans les granitoïdes correspondants (figurés creux) pour quelques plutons de la zone centrale du batholite de la Sierra Nevada (Mount Givens pluton: ▲ ; Dinkey Creek pluton: ● ; Bass Lake pluton: ■).

tants (fig. 4): un encaissant granitique riche en FeO_t et en MgO contiendra des enclaves riches en ces mêmes oxydes; un encaissant plus pauvre en ces oxydes contiendra des enclaves également pauvres, la différence de teneurs restant toujours la même. Des relations étroites existent également entre le fractionnement des terres rares dans les enclaves et dans leur encaissant. Les terres rares sont systématiquement plus abondantes et moins fractionnées dans les enclaves que dans leurs encaissants (fig. 5). Toutefois, lorsqu'elles sont peu fractionnées dans l'encaissant, elles le sont également peu dans les enclaves; lorsqu'elles sont plus nettement fractionnées dans l'encaissant, elles sont relativement plus fractionnées dans les enclaves, et cela toujours dans les mêmes proportions (fig. 5). En revanche, il ne semble pas y avoir de relations entre les anomalies négatives en Eu, systématiquement très fortes pour les enclaves et presque nulles pour les granitoïdes encaissants. Ces anomalies sont probablement liées à la grande richesse en minéraux mafiques et à la pauvreté en feldspath potassique des EMS par rapport à leurs encaissants.

Ces quelques résultats attestent du rôle des transferts chimiques et suggèrent qu'une homo-

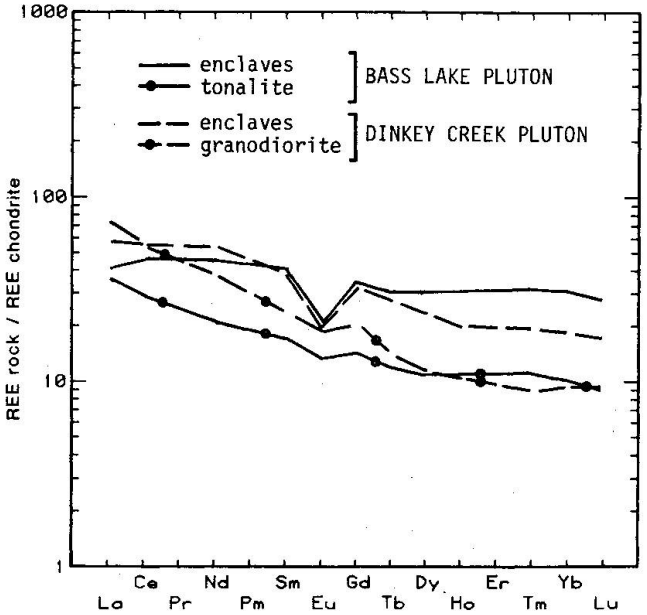


Fig. 5 Tendance moyenne d'évolution des terres rares dans les enclaves magmatiques sombres et dans les granitoïdes hôtes pour deux plutons du batholite de la Sierra Nevada (la tendance moyenne a été obtenue à partir de cinq enclaves pour le pluton de Dinkey Creek, et de deux enclaves pour le pluton de Bass Lake).

généïsation partielle est obtenue entre enclave et encaissant dans chaque couple.

Les transferts de minéraux mafiques et accessoires participent également à l'homogénéïsation partielle aussi bien pour les majeurs que pour les terres rares. La présence de xénocristaux d'apatite a déjà été démontrée dans les EMS d'autres granites calco-alcalins (DIDIER et BARBARIN, 1988). Le sphène peut également jouer un rôle important au niveau des terres rares. Les enclaves des granitoïdes riches en sphène comme la granodiorite du Mount Givens, contiennent beaucoup de sphène alors que celles des granitoïdes pauvres en ce même accessoire comme celui de Dinkey Creek, en contiennent peu. Aucun indice ne permet cependant de démontrer le transfert de sphène entre enclaves et encaissant. Il semblerait plutôt que le sphène ait cristallisé dans les deux milieux après homogénéïsation chimique partielle ou totale par transfert de titane et des autres constituants de cette phase dont les terres rares. Les écarts constants qui subsistent dans chaque couple après homogénéïsation chimique partielle sont probablement liés aux potentiels chimiques respectifs des deux milieux de part et d'autre de l'interface. L'homogénéïsation chimique demeure toutefois limitée et n'affecte pas l'ensemble d'un pluton: les différences entre les faciès d'un même pluton subsistent et se retrouvent au niveau de leurs enclaves. L'étude isotopique selon la méthode Rb-Sr des enclaves et des encaissants de mêmes plutons révèle un excellent équilibrage isotopique. Pour les différents plutons, les enclaves s'alignent sur les isochrones définies à partir d'échantillons de granitoïde uniquement (fig. 6).

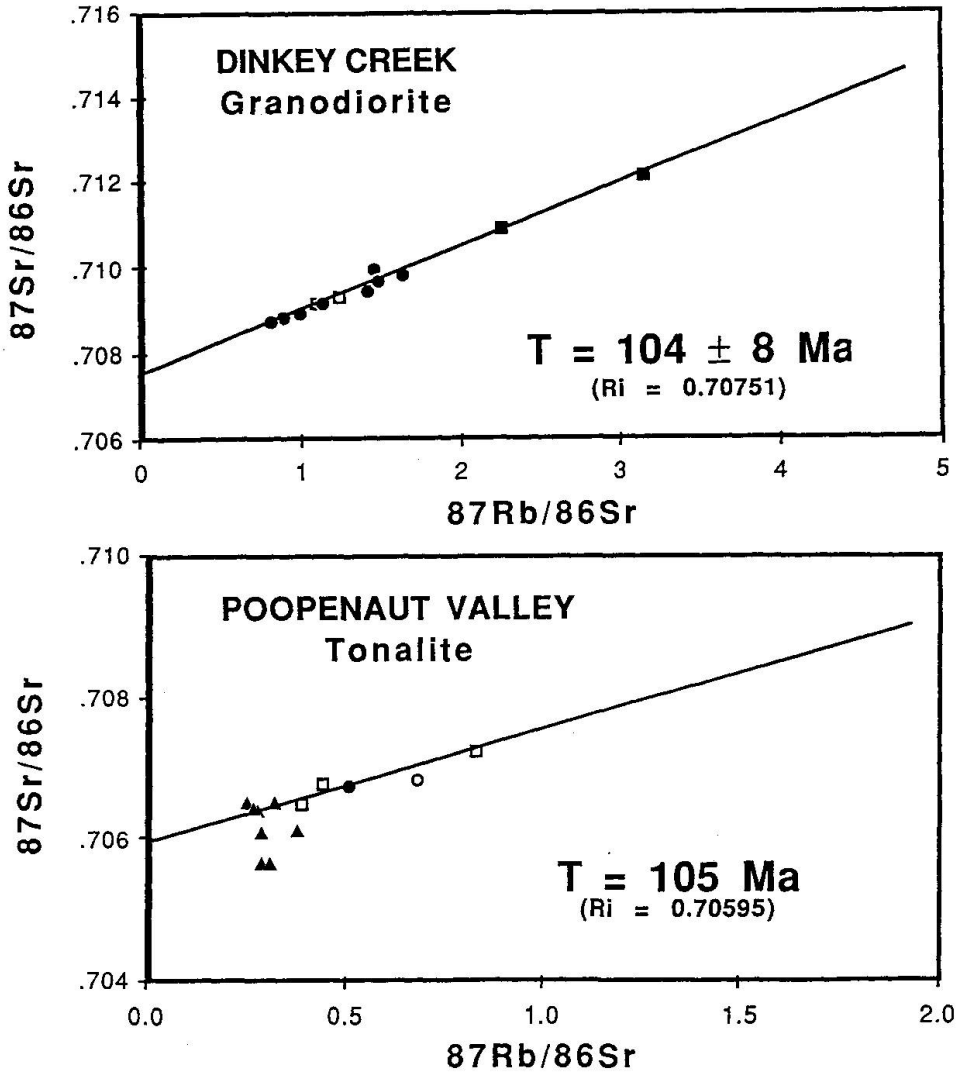


Fig. 6 Position sur les isochrones obtenues pour la granodiorite de Dinkey Creek (Dinkey Creek pluton) et pour la tonalite de Poopenaut Valley (Bass Lake pluton) par EVERNDEN et KISTLER (1970), des différentes roches plus récemment analysées (BARBARIN et al., 1989). (granitoïdes: □ ; agrégats de minéraux mafiques: ■ ; enclaves magmatiques sombres: ● ; filons mafiques plus ou moins assimilés: ▲).

Les transferts chimiques se traduisent par des similitudes entre enclaves et roches hôtes. Ces similitudes et la remarquable homogénéïsation isotopique sont parfois utilisées comme argument en faveur du cogénétisme des enclaves et des granitoïdes encaissants (DODGE et KISTLER, 1988). Cet apparent cogénétisme a non seulement été acquis tardivement par transferts chimiques, mais en plus il résulte des processus de mélange. Il est évident qu'enclaves et granitoïde hôte qui sont des roches hybrides provenant du mélange en proportions différentes des deux mêmes composants, vont présenter un caractère cogénétique, chacun ayant hérité des propriétés de chacun des deux magmas parents.

Les transferts thermiques représentent aussi un important processus d'hybridation, bien que ses effets directs ne soient pas observables. Les transferts thermiques, beaucoup plus rapides que les transferts chimiques, jouent un rôle fondamental dans la genèse des granitoïdes calco-alcalins par fusion de la croûte (Patchett, 1980; MARSH, 1984; HUPPERT et SPARKS, 1988). Ils contribuent également à atténuer les contrastes thermiques entre les différents composants et à favoriser les processus de mélange.

Aspect dynamique des processus d'hybridation

Les travaux expérimentaux (KOUCHI et SUNAGAWA, 1983, 1985) ont souligné l'importance des mouvements magmatiques (convections, brassages mécaniques) qui favorisent tous les processus d'hybridation. La fusion de la croûte profonde n'est possible et réellement efficace que si d'importantes convections existent dans le magma mafique et permettent un transfert constant de chaleur vers l'interface avec les roches crustales ou le magma felsique en formation (HUPPERT et SPARKS, 1988). Des courants de convection apparaissent également dans le magma felsique lorsqu'il a atteint une certaine épaisseur. Les convections proviennent des constrates de température et de composition entre les magmas présents, et entre ces derniers et l'environnement froid et solide. Lorsque le volume de magma felsique devient important, de nouvelles injections de magma mafique produisent de fortes turbulences qui activent les différents processus d'hybridation (CAMPBELL et TURNER, 1985). Les brassages liés aux convections peuvent également s'accentuer lors du transfert des magmas dans des conduits d'alimentation vers la croûte supérieure (KOYAGUCHI, 1985, 1987; BLAKE et CAMPBELL, 1986).

Pendant longtemps le terme de mélange mécanique a été utilisé pour mélange partiel ou transfert de minéraux: il est clair que tout mélange est mécanique, qu'il soit avec homogénéïsation ou seulement partiel. Même des mécanismes qui semblent à priori plus statiques comme les transferts chimiques ou thermiques dépendent étroitement des mouvements magmatiques. Cet aspect dynamique des processus d'hybridation est important car il montre que dès lors que deux magmas, ou que l'un des deux magmas, atteignent un certain taux de cristallisation, les mélanges et les transferts de minéraux ne seront plus possibles. Seuls des transferts chimiques ou thermiques limités peuvent subsister.

Rhéologie et processus d'hybridation

Les propriétés physiques des composants présents conditionnent l'apparition des différents mécanismes d'hybridation. Le modèle proposé souligne les variations des contrastes thermiques et surtout rhéologiques au cours de l'évolution du système granitique (fig. 7). Dans la Sierra Nevada, l'injection des magmas mafiques s'est poursuivie après l'individualisation des différents plutons et même pendant la cristallisation de ces derniers au niveau de mise en place. Les interactions entre deux magmas ou entre un magma et un granitoïde en fin de cristallisation vont être totalement différents. Dans le schéma simplifié proposé (fig. 7), le même magma mafique est injecté dans un magma granitique pendant différents stades d'évolution de ce dernier. En fonction des taux de cristallisation et par conséquent des contrastes de rhéologie entre magmas mafique et granitique, différents processus d'hybridation vont intervenir. (1) Lorsque le magma mafique est introduit alors que le magma felsique est en formation, un mélange avec homogénéïsation se produit et une roche hybride homogène est formée. Les granitoïdes calco-alcalins pourraient correspondre à des roches hybrides formées par ce processus. (2) Si le volume de magma felsique est relativement important par rapport au volume de magma mafique ou si les contrastes de température sont tels que les boules de magma mafique sont trempées et figées dans le magma felsique sous la forme d'enclaves arrondies, seul un mélange partiel est possible. (3) Lorsque le magma granitique est partiellement cristallisé, le magma mafique introduit est canalisé dans les fractures précoces où il peut localement avoir des échanges avec les jus granitiques concentrées dans ces zones. Les filons mafiques peuvent ainsi être partiellement assimilés ou se présenter sous

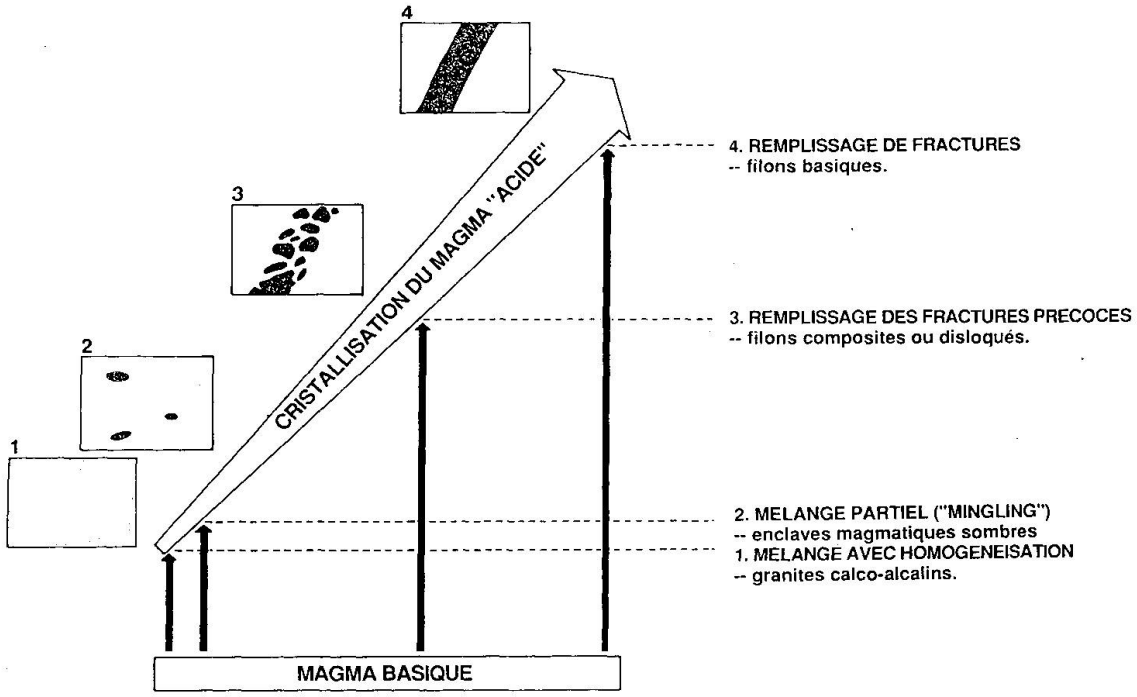


Fig. 7 Schéma montrant les différents types d'interactions entre magma mafique et magma felsique à différents stades de la cristallisation de ce dernier. (Explications dans le texte)

la forme d'un alignement de masses basiques arrondies et de taille variable, soudées par un ciment aplitique de composition très proche du granitoïde environnant. La réhomogénéïsation isotopique est encore possible. (4) Enfin, du magma mafique injecté alors que le granitoïde est cristallisé va donner des filons continus. Les contrastes de rhéologie ne permettent plus aucune hybridation. Les contrastes thermiques se traduiront par la formation d'une épaisse bordure trempée dans le filon mafique au contact avec l'encaissant granitique. Il n'y aura pas d'homogénéïsation isotopique entre les injections mafiques tardives et l'encaissant granitique. Contrairement aux EMS, les filons mafiques ne s'alignent pas sur les isochrones Rb-Sr des granitoïdes (fig. 6). Dans la tonalite de Poopenaut Valley (pluton de Bass Lake), les filons mafiques continus, tardifs sont nettement éloignés de l'isochrone, alors que ceux plus précoces, qui sont fragmentés ou partiellement assimilés, tendent à s'en approcher et même à s'aligner sur l'isochrone.

Conclusions

L'étude des enclaves magmatiques et des roches mafiques associées aux granitoïdes de la zone centrale du batholite de la Sierra Nevada a permis de préciser les conditions d'apparition et le rôle des différents processus d'hybridation. Ces processus sont particulièrement efficaces dans un milieu chaud où les magmas en présence sont bien brassés par des courants de convection. Ces conditions sont réalisées en profondeur où les mélanges avec homogénéïsation sont prépondérants. Pendant la mise en place, ces derniers s'estompent; les mélanges partiels et les transferts de minéraux deviennent dominants dans un milieu particulièrement turbulent. Seuls les transferts chimiques subsistent après la mise en place.

Les propriétés physiques des composants en présence contrôlent également l'apparition des processus d'hybridation. Les exemples provenant de la Sierra Nevada permettent de présenter un modèle qui souligne la dépendance entre le contraste de rhéologie entre les deux composants en présence et la nature du ou des processus d'hybridation qui interviennent.

Les roches étudiées ont généralement subi successivement ou alternativement plusieurs processus dont elles portent les marques superposées. Il est généralement difficile de distinguer la part de chaque processus dans chacune des roches associées dans les plutons.

Parallèlement aux mécanismes de mélanges partiels ou avec homogénéïsation, et aux transferts de minéraux, les processus d'échange chimique et isotopique jouent un rôle particulièrement important entre les roches associées dans les

plutons du batholite de la Sierra Nevada. Ils contribuent à atténuer et parfois à effacer les contrastes chimiques entre les enclaves et leurs encaissants. Les relations chimiques et l'homogénéïsation isotopique que certains auteurs attribuent à un éventuel cogénétisme des composants initiaux, peuvent simplement résulter des transferts chimiques.

Remerciements

Je remercie vivement Paul Bateman, Frank Dodge, Ron Kistler et Lew Calk pour leur collaboration pendant mon séjour à l'U.S. Geological Survey de Menlo Park en Californie. Cette étude a pu être réalisée grâce à une Bourse «Lavoisier» du Ministère des Relations Extérieures français et au soutien logistique de l'U.S. Geological Survey. La figure 7 n'aurait pas été aussi claire sans Jean-Michel Belin. Je remercie également Jean Didier et Gilles Bouchet pour leurs commentaires et leurs suggestions, Bernard Bonin et Lincoln S. Hollister pour la lecture critique du manuscrit.

Références

BARBARIN, B. (1986): Comparison of mineralogy of mafic magmatic enclaves and host granitoids, central Sierra Nevada, California. Geol. Soc. Am. Abstr. Prog. 18, 83.

BARBARIN, B. (1988a): Field evidence for successive mixing and mingling between the Piolard Diorite and the Saint Julien-la-Vêtre Monzogranite (Nord Forez, Massif Central, France). Canad. J. Earth Sci. 25, 49-59.

BARBARIN, B. (1988b): Mise en évidence des différentes étapes d'un processus global de mélange de magmas acides et basiques: les interactions entre la diorite de Piolard et le monzogranite de Saint Julien-la-Vêtre (Monts du Forez, Massif Central, France). C.R. Acad. Sci. Paris 306, 129-134.

BARBARIN, B. (à paraître): Plagioclase xenocrysts and mafic magmatic enclaves in some granitoids of the Sierra Nevada Batholith, California. Soumis à J. Geophys. Res.

BARBARIN, B. et BATEMAN, P.C. (1986): Origin and evolution of mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada. 14th Intern. Mineral. Assoc. Meeting, Stanford, California, 1986, Abstr. Prog., 50.

BARBARIN, B., DODGE, F.C.W., KISTLER, R.W. et BATEMAN, P.C. (1989): Mafic inclusions and associated aggregates and dikes in granitoid rocks, central Sierra Nevada Batholith. Analytic data. U.S. Geological Survey Open-File Report, (sous presse).

BATEMAN, P.C. (1983): A summary of critical relations in the central part of the Sierra Nevada Batholith, California, U.S.A. Geol. Soc. Am. Mem. 159, 241-254.

BATEMAN, P.C. (1989): Constitution and genesis of the central part of the Sierra Nevada Batholith, California. U.S. Geological Survey Open-File Report 88-382, (Prof. Paper 1483).

BATEMAN, P.C., DODGE, F.C.W. et BRUGGMANN, P.E. (1984): Major oxide analyses, CIPW norms, modes, and bulk specific gravities of plutonic rocks from the Mariposa 1. x 2. sheet, central Sierra Nevada, California. U.S. Geol. Surv. Open-File Report 84-162, 50 p.

BELIN, J.M. (1988): Evolution des enclaves basiques et de leur matrice dans un granite. L'exemple du granite porphyroïde de Saint-Gervais d'Auvergne (Massif Central français). C.R. Acad. Sci. Paris 307, 387-393.

BLAKE, S. et CAMPBELL, I.H. (1986): The dynamics of magma-mixing during flow in volcanic conduits. Contrib. Mineral. Petrol. 94, 72-81.

BUSSY, F. (1987): Interactions physico-chimiques entre le granite du Mont-Blanc et ses enclaves. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 67, 380-384.

CAMPBELL, I.H. et TURNER, J.S. (1985): Turbulent mixing between fluids with different viscosities. Nature, London, 313, 39-42.

DEPAOLO, D.J. (1981): A neodymium and strontium isotopic study of the Mesozoic calc-alkaline granitic batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California. J. Geophys. Res. 86, 10470-10488.

DIDIER, J. (1964): Etude pétrographique des enclaves de quelques granites du Massif Central français. Thèse d'Etat, Ann. Fac. Sci. Univ. Clermont-Ferrand, 23, 254 p.

DIDIER, J. (1973): Granites and their enclaves. The bearing of enclaves on the origin of granites. Dev. Petrol. 3, Elsevier, Amsterdam, 393 p.

DIDIER, J. (1987): Contribution of enclave studies to the understanding of origin and evolution of granitic magmas. Geol. Rundschau 76, 41-50.

DIDIER, J. et BARBARIN, B. (1988): Morphologie de l'apatite dans les roches felsiques et mafiques associées dans les plutons granitiques. 12e R.S.T., Lille, 47, Soc. Geol. Fr. éd.

DIDIER, J. et LAMEYRE, J. (1969): Les granites du Massif Central français. Etude comparée des leucogranites et granodiorites. Contrib. Miner. Petrol. 24, 219-238.

DODGE, F.C.W. et KISTLER, R.W. (1988): Origin of mafic inclusions, Central Sierra Nevada. Eos, 69, 1504.

EVERNDEN, J.F. et KISTLER, R.W. (1970): Chronology of emplacement of Mesozoic batholithic complexes in California and Western Nevada. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 623, 42 p.

FOURCADE, S. et ALLEGRE, C.J. (1981): Trace elements behavior in granite genesis: a case study. The calc-alkaline plutonic association from the Quérigut complex (Pyrénées, France). Contrib. Mineral. Petrol. 76, 177-195.

HUPPERT, H.E. et SPARKS, R.S.J. (1988): The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into the crust. J. Petrol. 29, 599-624.

KOUCHI, A. et SUNAGAWA, I. (1983): Mixing basaltic and dacitic magmas by forced convection. Nature, London, 304, 527-528.

KOUCHI, A. et SUNAGAWA, I. (1985): A model for mixing basaltic and dacitic magmas as deduced from experimental data. Contrib. Mineral. Petrol. 89, 17-23.

KOYAGUCHI, T. (1985): Magma mixing in a conduit. J. Volc. Geotherm. Res. 25, 365-369.

KOYAGUCHI, T. (1987): Magma mixing in a squeezed conduit. Earth Planet. Sci Lett. 84, 339-344.

MARSH, B.D. (1984): Mechanics and energetics of magma formation and ascension. In: "Explosive Volcanism: Inception, Evolution, and Hazards" (F.R. Boyd, ed.), National Acad. Press, 67-83.

PATCHETT, P.J. (1980): Thermal effects of basalt on continental crust and crustal contamination of magmas. Nature, London, 283, 559-561.

PITCHER, W.S. (1983): Granite type and tectonic environment. In: "Mountain Building Processes" (K. Hsu, ed.), Academic Press, London, 19-40.

SABATHIER, H. (1984): Vaugnérites et granites magnésiens dans le Massif Central français: une association particulière de roches grenues acides et basiques. Thèse d'Etat, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, 559 p.

SPARKS, R.S.J. et MARSHALL, L. (1986): Thermal and mechanical constraints on mixing between mafic and silicic magmas. J. Volcanol. Geotherm. Res. 29, 99-124.

VERNON, R.H. (1983): Restite, xenoliths and microgranitoid enclaves in granites. J. Proceed. Roy, Soc. New South Wales 116, 77-103.

VERNON, R.H. (1984): Microgranitoid enclaves in granite: globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment. Nature, London, 304, 436-439.

Manuscrit reçu le 28 février 1989; manuscrit revisé accepté le 15 juin 1989.