

## **REFLEXIONS A PROPOS DE LA REPARTITION DES GRANITOIDES DANS LES MASSIFS CRISTALLINS EXTERNES DES ALPES FRANCAISES**

par Bernard BONIN

### **RESUME**

Les massifs cristallins externes représentent un segment orogénique hercynien inclus dans l'orogène alpin. Ils vont donc subir plusieurs histoires successives. Les granitoïdes sont de plus en plus utilisés en vue de reconstruire les sites géodynamiques dans le temps et l'espace et de définir les transferts de masse et d'énergie à travers la croûte. Les modes d'approche actuelle (nomenclature des roches, classifications des séries magmatiques) sont passés en revue, ainsi que les problèmes de datation qui se posent en milieux polydéformés à histoire étalée dans le temps. L'ensemble des types granitiques est présent dans les Massifs Cristallins Externes tholéiitique océanique du Cambro-Ordovicien, calco-alcalin tonalitique précoce du Dévonien, anatectique autochtone et diapirique à partir de la limite Dévonien Carbonifère, calco-alcalin tardif granodioritique à monzonitique du Carbonifère et du Permien Inférieur, alcalin anorogénique à partir du Permien moyen, considéré comme les prémisses de l'ouverture océanique téthysienne liasique.

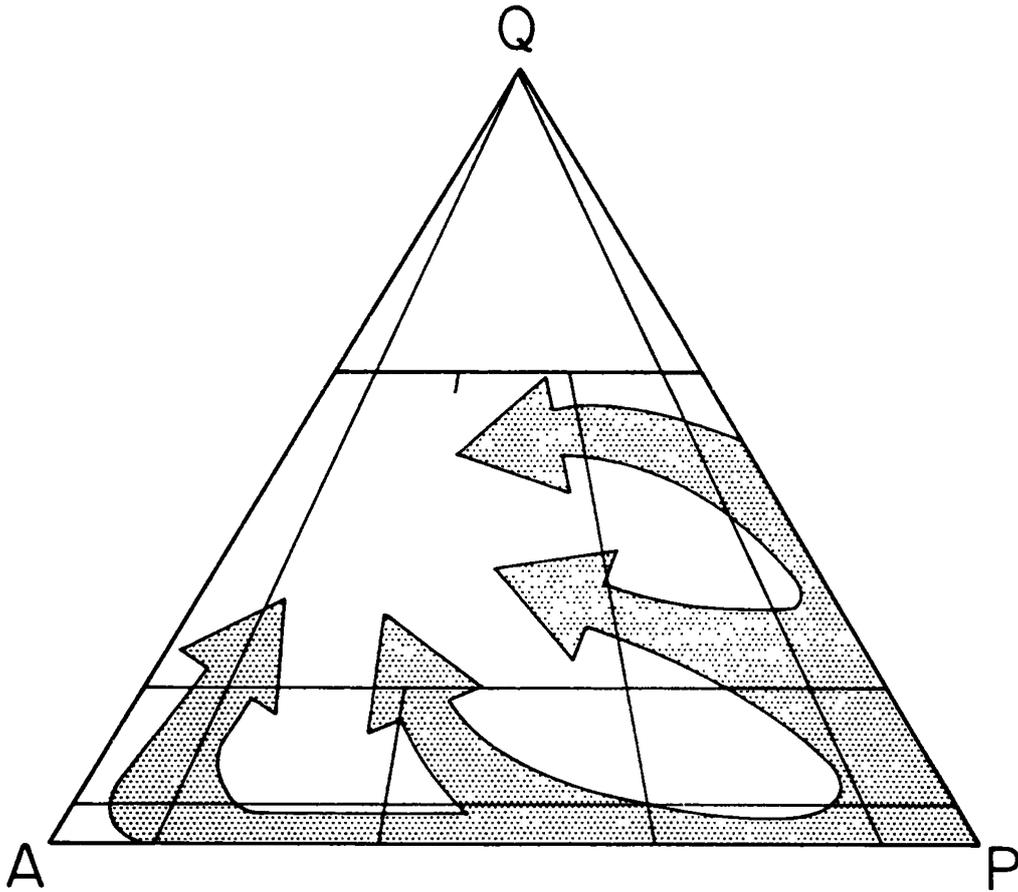
La recherche de zonalités magmatiques doit passer également par la résolution du problème posé par les masses orthogneissiques plus ou moins migmatitiques et par la reconstitution cinématique de tous les mouvements entre les périodes de mise en place et l'époque actuelle.

### **ABSTRACT**

SOME THOUGHTS ON THE DISTRIBUTION OF GRANITIC ROCKS IN THE "MASSIFS CRISTALLINS EXTERNES" (FRENCH ALPS).

In the French Alps, the "MASSIFS CRISTALLINS EXTERNES" (external crystalline massifs) is made up of a Variscan orogenic segment, enclosed in the Alpine orogen. Geologic formations have suffered several processes during a complex and long-duration history. Granitic rocks are more and more used in order to outline contrasting geodynamic environments in space and time and to define mass and heat transfers through the crust. Present conceptual approaches (rock nomenclature, classification of magmatic series) are briefly reviewed. Geochronological intricacies in polydeformed zones are also emphasized. The whole set of granitic types is represented in the "Massifs Cristallins Externes": oceanic tholeiitic suite during the Cambro-Ordovician, early tonalitic calc-alkaline suite during the Devonian, autochthonous and diapiric anatectic associations since the Devonian Carboniferous boundary, late granodioritic to monzonitic calc-alkaline suite during the Carboniferous and the Lower Permian, anorogenic alkaline suite since the Middle Permian, considered as a prelude to the Liassic Tethysian oceanic opening.

Magmatic zonation problems will be solved only when orthogneissic masses, moreless migmatitic, will enter in this scheme and when all the crustal movements since the periods of emplacement will be completely understood.



**Figure 1.** Le diagramme Q A P et les séries granitiques, sous la forme d'un "logo" imaginé par P. Sabaté pour un congrès international sur les Granites, l'I.S.G.A.M. à Salvador , Bahia (Brésil) en Janvier 1987. Différentes séries granitiques y sont représentées et se distinguent parfaitement, non par leurs pôles basiques et acides qui sont plus ou moins confondues, mais par les roches intermédiaires qui sont très différentes.

**Figure 1.** Granitic series reported in a Q A P triangular plot, as a "logo" draft by P. Sabaté for an international Conference on Granites, I.S.G.A.M. held at Salvador, Bahia (Brazil) during January 1987. Contrasting granitic series are represented and can be easily discriminated, not by their mafic and felsic end-members, which are moreless identical, but by their intermediate rock-types.

Ces réflexions sur la répartition des granites dans les Massifs Cristallins Externes sont issues d'une synthèse sur le plutonisme hercynien dans la chaîne alpine. Ce travail est l'aboutissement du collationnement des données effectué du Maroc aux Alpes orientales et au Caucase, par un groupe de travail du P.I.C.G. de l'UNESCO n° 5 "Corrélation des Evénements Anté-Alpins dans la Chaîne Alpine - Méditerranéenne" (direction du projet: SASSI), comprenant une vingtaine de personnes, provenant de plusieurs pays européens (Espagne, France, Italie, Suisse, U.R.S.S.) (BONIN et al., in prep.).

Le trait le plus marquant d'une chaîne orogénique est l'abondance des granitoïdes. Leurs compositions texturales, minéralogiques et chimiques varient, Leurs contextes tectoniques également. Dans la chaîne alpine, le problème est rendu plus complexe par la superposition dans les mêmes zones de plusieurs orogènes: les formations cadomiennes probables (Protérozoïque Supérieur), calédonno-hercyniennes (Paléozoïque) et alpines (Secondaire à Tertiaire) y sont étroitement imbriquées. L'abondance et la composition des massifs plutoniques diffèrent largement dans l'espace et le temps d'une région à l'autre.

S'appuyant sur une riche expérience de la géologie du granite, PITCHER (1979, 1982, 1987) a proposé plusieurs types orogéniques, dont l'hercynotype et l'alpinotype. Les Massifs Cristallins Externes présentent ainsi, avec les Massifs Cristallins Internes et les unités austro-alpines, la particularité de constituer un segment orogénique hercynien (hercynotype ?), repris dans une orogénèse alpine (alpinotype ?). De ce fait, l'étude des granitoïdes qui s'y trouvent constituent un bon test des classifications actuelles.

## 1. CLASSIFICATION DES GRANITES: UNE BREVE REVUE.

### 1.1. nomenclatures et séries.

La nomenclature des roches magmatiques a été réexaminée en détail par STRECKEISEN et son groupe de travail, réuni dans la Sous-Commission de Systématique des Roches Ignées de l'I.U.G.S. L'outil principal est l'analyse modale (composition minéralogique réelle des roches) et les paramètres utilisés sont les proportions en quartz (Q), feldspaths alcalins (A), plagioclases (autres que l'albite An <5) (P) et feldspathoïdes (F) (STRECKEISEN, 1976).

Au départ, le diagramme Q A P F a été établi dans un unique souci de nomenclature. Cependant, LAMEYRE (1980), puis LAMEYRE et BOWDEN (1982) ont montré que ce diagramme permettait également de visualiser les différentes séries granitiques, représentées aussi bien par des types plutoniques que par leurs équivalents volcaniques (figure 1):

- 1/ mobilisats anatectiques et granitoïdes associés,
- 2/ séries calco-alcalines avec leurs variantes,
- 3/ séries alcalines,
- 4/ Séries tholéitiques.

Ce schéma peut également être utilisé pour distinguer les contextes tectoniques (granites anorogéniques et orogéniques) et les sources possibles (DIDIER et al., 1982; BOWDEN et al., 1984).

Comme la composition minéralogique d'une roche n'est que le reflet de sa composition chimique, il est raisonnable de coupler les données modales QAPF avec les données chimiques. La composition chimique en éléments majeurs est une première donnée. De nombreux diagrammes multicationiques, plus ou moins complexes d'élaboration et d'interprétation, ont été proposés (DE LA ROCHE, 1986). Cependant, il est possible d'y séparer les types pétrographiques et d'y regrouper les séries granitiques (STUSSI et DE LA ROCHE, 1984; BATCHLOR et BOWDEN, 1985). Les données en éléments trace, assez rares dans les travaux anciens, deviennent de plus en plus abondantes dans les publications récentes. De ce fait, il est tentant de recourir à ces analyses pour définir les types granitiques. Parmi les essais significatifs, retenons les travaux de PEARCE et al. (1984), qui, par le biais de teneurs en RB, NB, Y, ZR,...., peuvent définir les contextes géodynamiques des magmas granitiques:

- granites syn-collision (SYNCOLOG),
- granites d'arc volcaniques (VAG),
- granites intraplaque (WPG),
- granites de ride océanique (ORG).

La classification des granitoïdes par lettres est également devenue très populaire. Elle est fondée sur un ensemble de critères pétrographiques et géochimiques ainsi que sur une approche conceptuelle des roches granitiques en termes de mélange de liquides de composition de minimum thermique plus ou moins pollués par des restites. Théoriquement, la classification est indépendante de tout supposé génétique. Dans la réalité, ce n'est pas tout-à-fait

si simple et DIDIER et al. (1982) ont bien montré que cette approche est critiquable (interprétation des enclaves basiques, par exemple).

Cette classification, que l'on pourrait appeler S-I-M-A, bien qu'elle s'applique à des roches sialiques, comprend à l'heure actuelle quatre groupes: S et I ont été les premiers distingués sur des exemples australiens (CHAPPELL et WHITE, 1974), puis ont suivi le type A sur des exemples de nouvelle Angleterre (LOISELLE et WONES, 1979) et le type M sur des exemples sud-américains (PITCHER, 1982).

## 1.2. utilisation des différentes classifications.

Les types par lettres ne se recouvrent pas parfaitement avec les séries granitiques de LAMEYRE et BOWDEN (1982), comme cela a été signalé par DIDIER et al. (1982) pour les types I et S. De même, le type A regroupe aussi bien les granites alcalins que les leucogranites, différenciés les plus évolués de la série anatectique. Ceci conduit à des ambiguïtés lors de l'utilisation des diagrammes: WHALEN et al. (1986) ont montré que les granites de type A recouvrent assez bien les WPG de PEARCE et al. (1984) mais que certains de leurs échantillons se retrouvent dans le champ des SYNCOLG.

Ces difficultés montrent bien qu'aucune méthode de discrimination ne peut être auto-suffisante et que, seul, l'emploi d'un nombre important de données d'interprétations convergentes peut permettre une détermination acceptable. De ce fait, je préfère la classification de LAMEYRE et BOWDEN pour les raisons suivantes:

- la discrimination proposée par la répartition des points dans le diagramme QAPF permet un premier dégrossissage, simple et rapide, peu coûteux,

- les leviers sur le terrain et la distribution des types pétrographiques permettent alors de résoudre les cas ambigus, comme la discrimination entre série transitionnelle anorogénique (type Islande) et série calco-alcaline granodioritique orogénique,

- les séries sont nommées selon les règles déontologiques habituelles de la nomenclature, c'est-à-dire d'après les définitions les plus anciennes, celles des séries volcaniques,

- il y a ainsi recouvrement parfait du langage des volcanologues et de celui des granitologues, ce qui permet une compréhension plus facile et des comparaisons fructueuses entre ces deux domaines, que l'expérience cour-

ante du géologue montre intimement liés.

## 2. TYPES OROGENIQUES.

### 2.1. le schéma de PITCHER.

A partir d'une première classification dualistique des chaînes de montagnes en "alpinotype" et "hercynotype" proposée par ZWART (1967), PITCHER a défini les principaux environnements géodynamiques des granites. Sa classification la plus récente (PITCHER, 1987) se subdivise en six types:

- 1/ *alpinotype*, sans phénomènes magmatiques associés importants,

- 2/ *type Ouest Pacifique* (locus typicus : arcs insulaires de l'Ouest - Pacifique): des gabbros et des plagiogranites, peu abondants, se mettent en place dans des formations volcaniques et volcanoclastiques, dans un environnement de subduction océan-océan. L'épisode magmatique a une courte durée et prendrait son origine dans la fusion partielle de la plaque subductée et métamorphisée et la production de magma dioritique en conditions anhydres.

- 3/ *andinotype* (locus typicus : batholite côtier du Pérou): des tonalites, des granodiorites et quelques gabbros associés, se mettent en place dans des formations andésitiques et constituent de vastes batholites intrusifs, linéaires, servant d'alimentation aux volcans sus-jacents. L'environnement est une subduction océan-continent. Les épisodes magmatiques ont une durée de vie plus longue et prendraient leur origine dans la fusion partielle de manteau subducté avec des contributions crustales limitées et la production de magma tonalitique en conditions anhydres.

- 4/ *hercynotype* (locus typicus : orogène varisque d'Europe moyenne): des migmatites sont remobilisées en granites anatectiques, mis en place diapiriquement, au cours des phases précoces d'une collision oblique entre continents ("subduction" continent-continent). Des épisodes de recyclage et de fusion partielle de matériaux crustaux conduisent à la production de poches magmatiques en conditions hydratées, qui peuvent cristalliser en profondeur et subir ensuite des processus de recristallisations autométamorphiques.

- 5/ *type calédonien* (locus typicus : "Newer Granites" d'Ecosse et du Donegal, en Irlande): les roches plutoniques, calco-alcalines, se caractérisent par de fortes teneurs en K et se mettent en place en massifs intrusifs, plus ou moins diapiriques, à la suite d'une surrection

rapide de la chaîne. La décompression adiabatique qui en résulte permet l'ascension de magmas au cours d'un épisode relativement bref. La source pourrait en être un mélange de croûte inférieure tonalitique et de manteau supérieur.

- 6/ *type anorogénique* (locus typicus : "Younger Granites" du Nigeria): les granitoïdes sont alcalins à hyperalcalins et se mettent en place sous la forme de complexes annulaires durant des épisodes de coulissements intracratoniques ou de début d'extension. La source est particulièrement enrichie en fluor, permettant la production de magmas à températures assez basses pouvant monter dans la croûte jusqu'à la surface.

Ce schéma est très largement utilisé pour reconnaître les formations (méta) granitiques. C'est ainsi que PEARCE et al. (1984) ont utilisé la même philosophie pour leur classification géochimique. On peut toutefois regretter qu'un type médio-océanique (ORG de PEARCE et al., 1984) n'ait pas été distingué, de façon à inclure les plagiogranites océaniques des ophiolites et les granitoïdes transitionnels des îles océaniques. Il est vrai que PITCHER avait surtout en vue les roches granitiques continentales orogéniques.

**Remarque importante:**

Rappelons que les termes utilisés par PITCHER n'ont aucune signification chronologique : alpinotype, andinotype, hercynotype, type calédonien, ... se réfèrent à des lieux où ces types sont définis et non à des orogénèses, auxquelles ces noms peuvent faire penser. Cette précision est à conserver à l'esprit dans la suite.

**2.2. types orogéniques et granitoïdes associés.**

Reprenant la classification de LAMEYRE et BOWDEN (1982), BATCHELOR et BOWDEN (1985) ont montré une excellente corrélation entre les types orogéniques de PITCHER et les séries granitiques (figure 2):

- les types 1/ et 2/ (alpinotype et type Ouest Pacifique) n'ont pas été considérés,
- 3/ l'andinotype est caractérisé par un état antérieur à la collision et les séries calco-alcalines tonalitiques et granodioritiques,
- 4/ l'hercynotype, avec sa série anatectique, est une signature de collision continent-continent,

- 5/ le type calédonien, post-collision, est caractérisé par une surrection et des séries calco-alcalines potassiques, suivies par une série "subalcaline" monzonitique,

- 6/ le type anorogénique nigérian, lié à des structures distensives en pull-apart ou en rifts, le long de grandes zones de cisaillement (BONIN et LAMEYRE, 1978) est caractérisé par la série alcaline.

L'apport le plus important du travail de BATCHELOR et BOWDEN (1985) est de montrer clairement que les différents types orogéniques au sens de PITCHER constituent des épisodes successifs d'un même événement orogénique. Une orogénèse montrera la succession de plusieurs types magmatiques orogéniques, à la fois dans le temps et dans l'espace.

D'autres méthodes ont apporté quelques faits nouveaux et la confirmation du schéma général. L'étude morphologique des zircons appliquée aux granites (PUPIN, 1980) permet la définition de séries granitiques. Utilisée dans un même segment orogénique, cette méthode a montré (PUPIN, 1985) l'existence d'une zonation spatiale, de la zone de suture océanique vers le continent:

- granites calco-alcalins, provenant de magmas hydratés (cf. type Ouest Pacifique et andinotype),
- granites anatectiques alumineux autochtones ou paraautochtones (cf. hercynotype),
- granites anatectiques hyperalumineux intrusifs (cf. hercynotype),
- granites calco-alcalins, provenant de magmas anhydres (cf. type calédonien),
- granites "subalcalins" potassiques (cf. type calédonien).

La seule différence des résultats de PUPIN avec le schéma de PITCHER est le caractère hydraté des granitoïdes calco-alcalins précoces (= andinotypes). Encore faut-il rappeler que les zircons indiquent les conditions de la cristallisation d'un magma à son lieu de mise en place et non celles de sa production. Or la solubilité des fluides dans un liquide silicaté varie largement en fonction de la pression lithostatique.

Les Massifs Cristallins Externes des Alpes françaises, un segment limité de l'orogène hercynien, repris dans l'orogénèse alpine, présente un échantillonnage de types orogéniques variés. Pour cela, une excellente connaissance des groupes de granitoïdes et de leurs âges est indispensable.

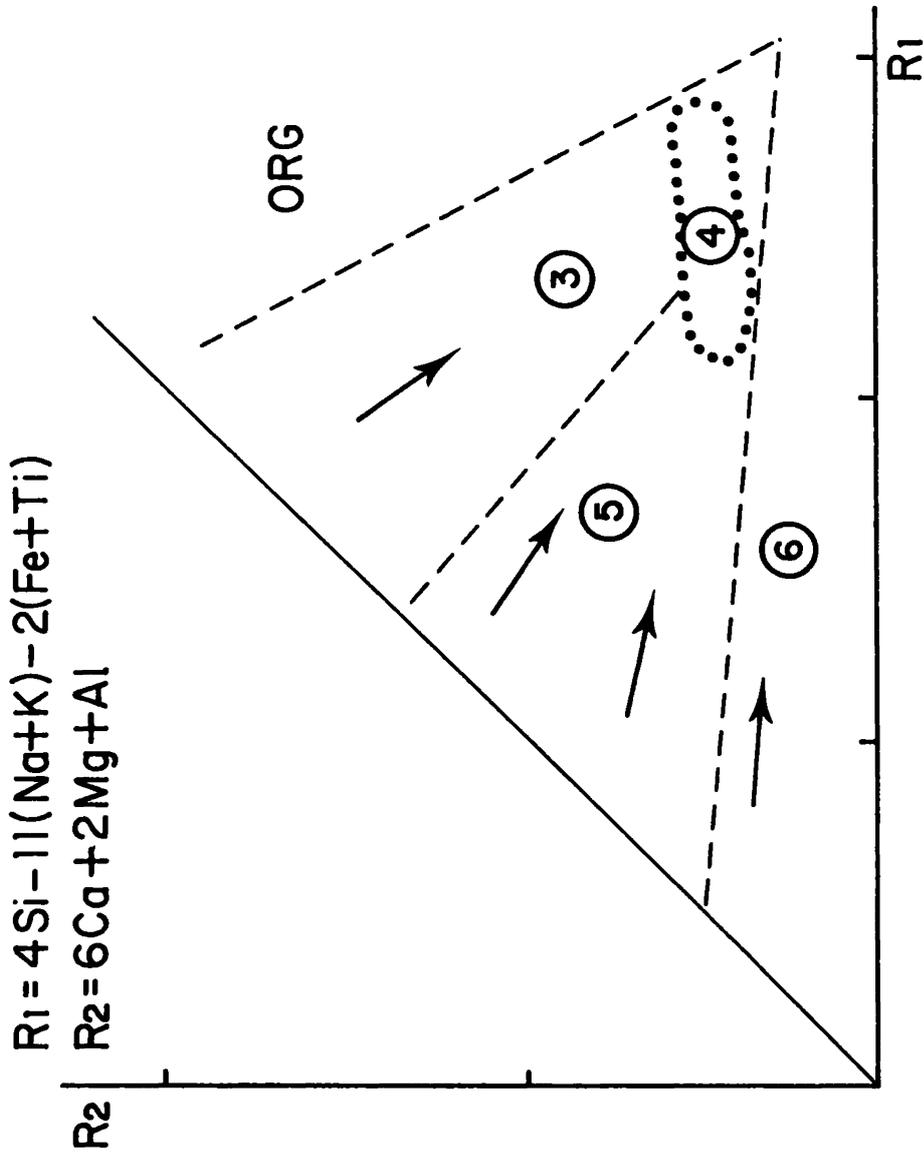


Figure 2. Les types orogéniques dans un diagramme multivarié R1-R2 (d'après BATCHELOR et BOWDEN, 1985). ORG = granites de rides océaniques, 3 à 6 correspondent aux types orogéniques de PITCHER (1987), voir texte.

Figure 2. Orogenic granite types in a R1-R2 multivariate plot (modified after BATCHELOR and BOWDEN, 1985). ORG = oceanic ridge granites, 3 to 6 refer to orogenic types defined by PITCHER (1987), see text.

### 3. DIFFICULTES GEOCHRONOLOGIQUES.

La reconstitution des événements magmatiques ayant affecté les Massifs Cratallins Externes nécessite l'établissement d'une échelle de temps géologique fiable. Deux méthodes sont conjointement utilisées: la chronologie relative, fondée sur les observations de terrain (critères de remaniement, datations paléontologiques), et la chronologie absolue, fondée sur le concept de fermeture des systèmes isotopiques (minéraux et roches totales) à des températures déterminées. Les résultats obtenus sont-ils significatifs d'événements géologiques ?

A l'heure actuelle, seuls quelques massifs ont été analysés par les deux types de méthodes. Quelques exemples représentatifs sont décrits dans ce volume. Ailleurs, la distribution spatiale et la fiabilité des résultats sont extrêmement hétérogènes, au point que, parfois, l'âge "hercynien" sensu lato d'un massif (méta) granitique n'est supposé que sur la foi d'une couverture sédimentaire, plus ou moins transgressive, plus ou moins décollée, d'âge secondaire, voire tertiaire.

#### 3.1. limitations à l'interprétation des données isotopiques.

Il est difficile d'interpréter de façon univoque les données isotopiques pour les raisons suivantes:

1/ De nombreux massifs plutoniques ont subi à des degrés variables les effets de la tectonique alpine et des phases métamorphiques associées. Dans les zones de chevauchement, les granites sont complètement transformés en orthogneiss et se disposent en lentilles tectoniques, les caractères magmatiques primaires ne sont conservés que par endroits (par exemple, les orthogneiss de la Dent-Blanche). Ailleurs, les zones de cisaillement coulissant produisent des roches mylonitiques entièrement rétro-morphosées. Dans les deux cas les horloges isotopiques ont été remises plus ou moins complètement à zéro.

2/ Les massifs hercyniens pré-tectoniques et syncinématiques ont pu également subir des réajustements plus ou moins longtemps après leur époque de mise en place, au cours d'événements tectonométamorphiques hercyniens postérieurs. Dans ces conditions, ils peuvent indiquer un âge rajeuni par rapport à celui de leur mise en place. L'homogénéité des âges obtenus dans une région (par exemple, dans les

massifs cristallins externes de la Suisse) peut souvent être interprété comme le résultat d'une surimpression tardive pendant la culmination d'un métamorphisme thermique ("thermal overprinting") et/ou des effets d'homogénéisation au cours d'un refroidissement lent ("slow cooling"). Les événements magmatiques tardi-orogéniques, avec leur auréole thermique, peuvent ainsi provoquer une remise à zéro complète des horloges isotopiques situées dans les plutons plus précoces.

3/ Dans de nombreux massifs à injections multiples, les évidences de terrain permettent l'établissement d'une chronologie relative, qui n'est pas toujours vérifiée par les isotopes. Les intervalles de temps entre les mises en place successives sont alors trop courts pour être enregistrés par les horloges isotopiques, à cause des incertitudes dues aux méthodes d'analyses et à l'échantillonnage.

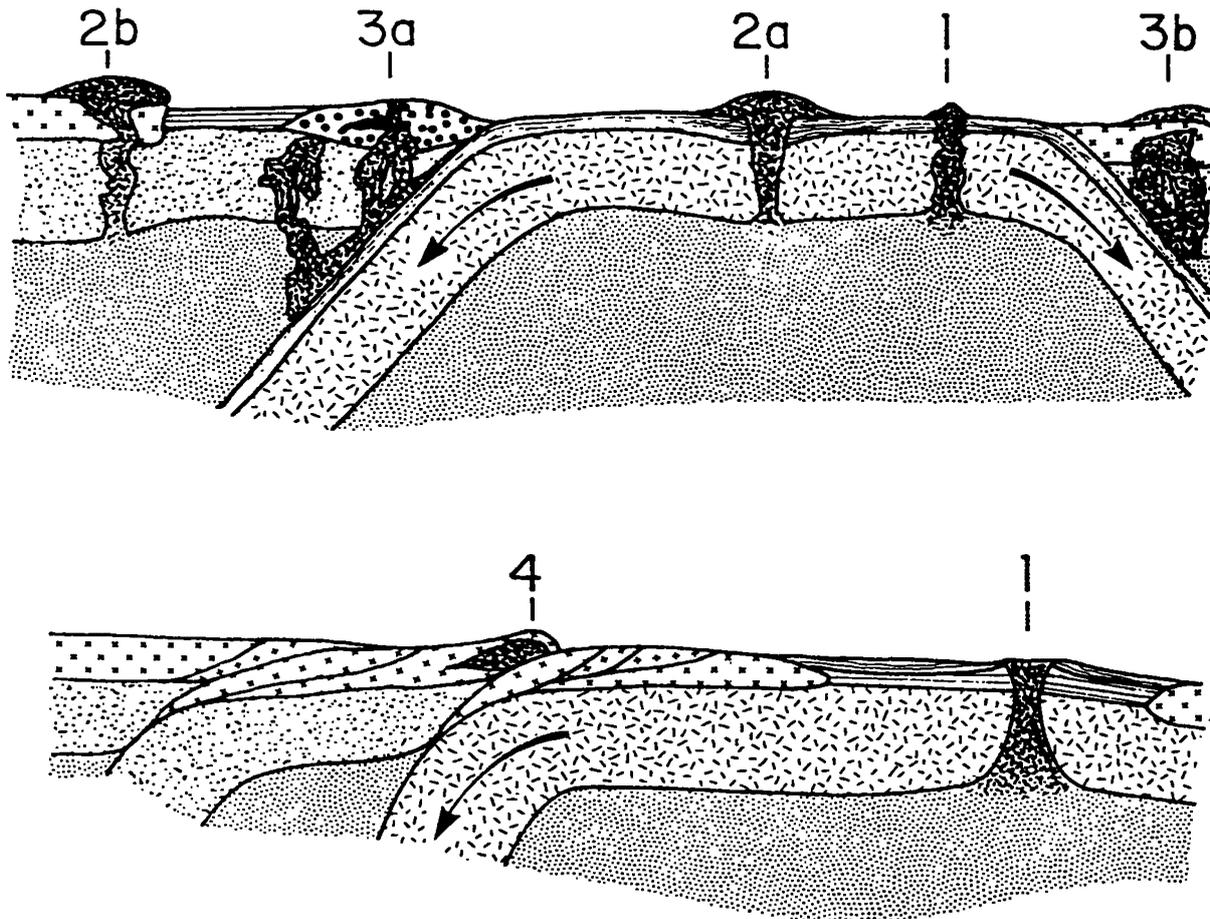
4/ Très souvent, le contrôle géologique des données isotopiques est impossible, lorsque les roches magmatiques se mettent en place en profondeur dans des zones polymétamorphiques..

Ces limitations aux méthodes de chronologie absolue doivent toujours rester à l'esprit au cours de l'interprétation des résultats. Elles ne constituent pas un constat de désaveu à l'encontre des méthodes isotopiques, mais seulement la reconnaissance qu'elles ne fournissent pas des résultats définitifs en termes d'événements géologiques de mise en place des magmas. Toute interprétation doit s'appuyer sur un grand nombre de données convergentes, tant analytiques que géologiques. En d'autres termes, le laboratoire et le terrain ne sauraient être en désaccord.

#### 3.2. applications aux formations varisques dans les Alpes.

Le problème fondamental est que l'orogénèse hercynienne est si vaste en superficie et si longue en durée que l'activité magmatique n'a pas pris place en même temps dans les différents domaines.

Ainsi, les données isotopiques actuelles sur les Alpes au sens large indiquent une distribution des âges de l'activité plutonique orogénique hercynienne de 350 à 260 Ma, indiquant une continuité apparente depuis la fin du Dévonien jusqu'au Permien (BONINet al., in prep.). Ajoutons-y les orthogneiss, témoins de magmatismes antérieurs, souvent assez mal datés.



**Figure 3. Contextes géodynamiques du magmatisme granitique.**

- 1 : ride médio-océanique,
- 2a: île océanique intraplaque,
- 2b: volcan-bouclier continental intraplaque et marge continentale passive,
- 3a: arc insulaire,
- 3b: marge continentale active,
- 4 : zone de collision continent-continent.

**Figure 3. Geodynamic environments for granitic magmatism.**

- 1 : medio-oceanic ridge,
- 2a: intraplate oceanic island,
- 2b: intraplate continental shield volcano and passive continental margin,
- 3a: island arc,
- 3b: active continental margin,
- 4 : continent-continent collisional range.

Cependant, dans les Alpes centrales et orientales (Autriche, Italie, Suisse), aucun âge Rb-Sr antérieur à 320 Ma. n'a été enregistré et le maximum des données est centré autour de 290-270 Ma. (AYRTON, in prep.; VISONA et al., in prep.). Ces résultats contrastent avec la gamme plus étendue obtenue dans les Massifs Cristallins Externes (VIVIER et al., in prep.), ce qui suggère:

- que la culmination des phénomènes magmatiques dans les Alpes centrales et orientales date du Permien inférieur, ce qui s'accorde avec les évidences de terrain dans certains massifs,

- que les autres massifs, plus anciens, comme en témoignent des données U-Pb sur zircon (AYRTON, in prep.), ont été rajeunis par l'évènement thermique accompagnant la mise en place des plutons et des volcans du Permien inférieur.

Un deuxième maximum à 250 Ma, à la limite Permien-Trias, est relié à la mise en place de complexes annulaires alcalins et des formations volcaniques associées (BONIN et al., 1987). Ces âges ont également été reportés dans de nombreux systèmes minéraux situés dans des granitoïdes calco-alcalins antérieurs (Alpes Centrales Italiennes, Corse) (FERRARA et INNOCENTI, 1974; BONIN, 1980).

Ainsi, deux empreintes thermiques permiennes ont modifié les systèmes isotopiques magmatiques primaires. Ces deux empreintes sont particulièrement apparentes dans certaines zones alpines (Suisse, Alpes Centrales Italiennes) alors qu'elles le sont moins dans d'autres (Alpes Françaises). Un peu plus tard, de nouvelles empreintes prendront le relais, comme celle à 200 Ma (Trias supérieur), mise en évidence en Italie, par FERRARA et INNOCENTI (1974).

#### 4. DISTRIBUTION ESPACE-TEMPS DES GRANITOÏDES.

À l'heure actuelle, toutes les séries granitiques, donc tous les contextes géodynamiques, apparaissent dans les formations varisques des Alpes. Les âges de mise en place sont également variés et témoignent de plusieurs phases orogéniques, voire de plusieurs orogénèses.

##### 4.1. les orthogneiss, témoins d'orogénèses anciennes ?

Les orthogneiss, qui ont subi une (des) importante(s)

structuration(s) tectonométamorphique(s), témoignent de phénomènes magmatiques antérieurs ou synchrones des phases hercyniennes. Ils posent, comme dans toute la chaîne hercynienne européenne, le problème irritant de la présence ou non de reliques précambriennes (JAEGER, 1977).

Le noyau du Haut-Dauphiné (LE FORT, 1972) est constitué en partie de formations orthogneissiques (formation de Crupillouse) provenant d'anciens granites porphyroïdes encore bien reconnaissables, malgré les déformations et les modifications paragénétiques. Il est souvent affecté par une anatexie qui, pour des raisons de chimismes (les orthogneiss ont des compositions proches des minimums thermiques), se développe largement dans les orthogneiss, pouvant oblitérer alors toute signature magmatique primaire. Les âges obtenus indiquent alors au maximum l'anatexie (cf. VIVIER et al., ce volume).

Cependant, certains orthogneiss de Belledonne, différents des orthogneiss de Crupillouse (VIVIER et al., ce volume), peuvent se former au même moment ou après les phénomènes d'anatexie.

Les rares données chimiques et minéralogiques, dans les régions indemnes d'anatexie (COSTARELLA, 1987), indiquent des granites calco-alcalins issus de magmas relativement anhydres, assez semblables aux orthogneiss ocellés du Somail, en Montagne Noire (DEMANGE, 1982) mais bien différents des orthogneiss provençaux, provenant de la transformation de granites anatectiques cadomiens (PUPIN, 1976). Y a-t-il donc orthogneiss et orthogneiss ? Les données actuelles restent encore trop éparées.

Par ailleurs, les séries tholéitiques sont représentées par des massifs ophiolitiques pré-hercyniens, d'âge Cambro-Ordovicien, clairement anté-tectoniques (MENOT, 1987). Les granitoïdes y sont présents sous la forme de plagiogranites, intrusifs dans les parties centrales et sommitales de l'édifice océanique. Les caractères chimiques les rapprochent des ORG de PEARCE et al. (1984), en accord avec les évidences géologiques.

Des témoins orthogneissifiés du début des phases de collision (360-350 Ma.) ont été décrits, provenant de la transformation de diorites, tonalites et trondhjémites, associées à leurs équivalents volcaniques et issues de magmas calco-alcalins hydratés. Ce magmatisme a été

produit à la fin des phénomènes de subduction océan-continent et de la culmination des épisodes tectonométamorphiques acadiens. Il est très comparable aux magmatismes de type Ouest Pacifique et andinotypes. Comme dans les exemples andins, la mise en place des magmas est en relation avec une distension régionale sialique ("ensialic spreading") qui contrôle la répartition des massifs (MENOT, 1987) mais qui n'est pas incompatible avec le développement d'une phase orogénique majeure marquant le début des phénomènes de collision continentale.

Les orthogneiss présentent donc plusieurs centres d'intérêt: existence ou non d'une croûte continentale précambrienne, mise en évidence des prémisses de l'orogénèse. Leur étude est délicate, car il faut préalablement décrypter l'histoire tectonométamorphique et en particulier le puzzle constitué par le collage de "terranes" d'origines variées avant de retrouver l'histoire magmatique et son interprétation géodynamique.

#### 4.2. les types granitiques en fonction du temps.

Les différents types orogéniques sont bien représentés dans les massifs granitiques ou les caractères magmatiques primaires ont été conservés.

1/ Les formations anatectiques semblent relativement précoces (depuis la limite Dévonien-Carbonifère) et apparaissent sous la forme de corps migmatitiques autochtones et de diapirs tardifs, typiquement hercynotypes. Généralement, ils sont accompagnés de venues calco-alcalines, plus ou moins potassiques (vaugnérites) (BANZET, ce volume), parfois synchrones avec des phénomènes de mélanges magmatiques, parfois tardives. Certaines formations anatectiques peuvent se retrouver sous forme d'orthogneiss (VIVIER et al., ce volume).

2/ La majorité des massifs granitiques est calco-alcaline avec une association diorite quartzique-tonalite-granodiorite-granite, c'est-à-dire une suite proche des plutons andinotypes. Cependant, PITCHER et al. (1985), dans leur épilogue à l'étude du batholite andin du Pérou, ont insisté sur le fait qu'une distinction claire doit être apportée entre les types andins et d'autres ainsi désignés, bien qu'ils soient significativement plus pauvres en Ca

et plus riches en K pour les mêmes teneurs en SiO<sub>2</sub>, et qui sont dérivés d'une source mixte en régime de post-subduction" (op.cit., page 289).

De ce fait, les massifs calco-alcalins précoces orthogneissifiés, qui peuvent être synchrones ou témoigner, avec un faible retard, de la fin de la subduction océan-continent et du début de la collision continent-continent, sont caractérisés par de faibles teneurs en K, de fortes teneurs en Ca, et correspondent assez bien à l'andinotype, mais ils constituent une exception.

La plupart des massifs granitiques, et plus spécialement, les complexes plutoniques et volcaniques tardi-à post-orogéniques (300-270 Ma.) sont caractérisés par de fortes à très fortes teneurs en K. La présence de sphène, souvent automorphe, et de minéraux colorés fortement magnésiens impliquent des conditions oxydantes, témoignant d'une sursaturation en fluides des liquides résiduels. La fréquente coloration en rouge des feldspaths potassiques et la chloritisation des biotites proviennent des conditions oxydantes en cours et en fin de cristallisation des magmas et non de phénomènes alpins, comme cela a déjà été mis en évidence par LE FORT (1972). De tels massifs granitiques indiquent des événements post-collision du type calédonien.

3/ Les complexes plutoniques-volcaniques alcalins sont, dans les Alpes françaises, de découverte plutôt récente (COSTARELLA et al., 1985). Rappelons, cependant, que de nombreux massifs italiens, réputés hercyniens, étaient connus pour leurs caractères alcalins: présence de fayalite dans les faciès miarolitiques du granite rose permien de Baveno, présence de fayalite et de fergusonite dans le granite de Predazzo, associé aux monzonites triasiques de Monzoni (revue in BONIN, 1980). Les résultats obtenus récemment dans le Haut-Dauphiné (COSTARELLA, 1987, et ce volume) permettent d'entrevoir que les Massifs Cristallins Externes renferment un jalon de plus de la province alcaline ouest-méditerranéenne définie par BONIN et al. (1987) entre la Corse et l'Estérel d'une part et les massifs suisses et italiens d'autre part.

Cette Province qui s'étend du Maroc à l'Autriche est active depuis le Permien moyen (270 m.a.) jusqu'au Trias supérieur (200 m.a.).

Dans le temps, elle constitue un événement majeur entre la fin de l'orogénèse hercynienne, marquée par les formations calco-alcalines potassiques du Permien inférieur, et

le début des ouvertures téthysiennes, marquées par les formations transitionnelles de 245 Ma du Cervin (DAL PIAZ et al., 1977) et les ophiolites tholéitiques lia-siques. Elle témoigne ainsi des phénomènes géodynamiques complexes précurseurs d'une ouverture de type océanique et participe de ce fait à l'histoire pré-alpine.

#### 4.3. une zonalité magmatique hercynienne ?

La recherche de zonalités magmatiques est très à la mode. en effet, la répartition actuelle des suites magmatiques en fonction des sites géodynamiques est de mieux en mieux connue, en ce qui concerne les associations volcaniques (figure 3). Il est logique d'interpréter la répartition spatiale des formations plutoniques, équivalents profonds des associations volcaniques, également en terme de sites géodynamiques.

En fait, plusieurs problèmes se posent:

1/ on n'a pas encore fait la preuve que le lien observé actuellement entre une association volcanique et un site géodynamique soit bijectif: la réciproque, bien que très probable, n'a pas toujours été démontrée,

2/ de même, on n'a jamais fait la preuve que le lien observé actuellement implique un synchronisme absolu entre l'environnement géodynamique et sa réponse magmatique: au contraire, un phénomène de retard (30 à 50 m.a..) a été mis en évidence (SMITH, 1977; BONIN, 1987),

3/ à cause des mouvements cisailants horizontaux et coulissants longitudinaux parfois considérables mis en évidence, des massifs à présent contigus ont pu être très éloignés au moment de leur mise en place et inversement.

L'image actuelle des corps granitiques dans les Massifs Cristallins Externes est la résultante des différents mouvements de la croûte, au cours des événements hercyniens et alpins. La règle du jeu, dans toute tentative de reconstitution, consiste, étape par étape, à déplier et/ou déplacer par translation les zones déformées qui sont actuellement contiguës, ce qui implique une parfaite connaissance des périodes et des durées des phénomènes. Autant de contraintes qui interdisent pour l'instant l'établissement définitif d'une zonalité magmatique hercynienne dans les Alpes. Toute tentative de mise en évidence d'un paléoplan de subduction n'aurait aucun sens. Tout au plus, peut-on déjà proposer, selon divers

critères structuraux, minéralogiques et géochimiques, des regroupements par âges et séries granitiques. Des exemples de recherches de zonalités sont présentés dans ce volume. Mais il faut garder dans l'esprit que les zones linéaires très rapprochées mises en évidence résultent de nombreux mouvements, certains datant de l'orogénèse hercynienne, les autres liés à l'histoire alpine au sens large.

#### CONCLUSION.

Les Massifs Cristallins Externes constituent un bon terrain pour l'étude des séries granitiques. Les effets tectonométamorphiques liés aux phénomènes alpins y sont nettement moins développés que dans les zones plus internes.

La reconnaissance des caractères magmatiques primaires des plutons granitiques y est facilitée, bien que la mise en évidence des structures liées à la mise en place y soit rendue compliquée par la fracturation alpine.

Les orthogneiss ne sont pas encore calés avec précision dans le calendrier des événements: sont-ils les témoins d'un magmatisme cadomien et dans quel environnement géodynamique ? sont-ils entièrement paléozoïques ?

L'ensemble des séries granitiques connues est bien représenté:

- série tholéitique avec les ophiolites cambro-ordoviciennes,
- série calco-alcaline tonalitique au Dévonien terminal,
- série anatectique, de la limite Dévonien-Carbonifère au Carbonifère inférieur, avec des diapirs intrusifs, parfois mêlés de produits basiques calco-alcalins,
- série calco-alcaline granodioritique au cours du Carbonifère,
- série calco-alcaline monzonitique à "subalcaline", du Permien inférieur,
- série alcaline à partir du Permien moyen.

Cet ensemble de données est compatible avec un cycle de WILSON, ouverture - fermeture par subduction et collision - ouverture, tel qu'il a pu être mis en évidence ailleurs.

Par contre, l'environnement tectonique alpin pose de sévères contraintes à la mise en évidence et à l'interprétation d'une zonalité magmatique significative. Ce problème ne trouvera sa solution qu'à la suite de la collecte de nombreuses données géologiques, structurales, pétrologiques et chronologiques.

Quoi qu'il en soit, le calendrier des événements magmatiques, tel qu'il ressort des données actuellement disponibles, est comparable à celui proposé par DUTHOU et al. (1984) pour le Massif Central français, mais les leucogranites de la limite Carbonifère-Permien semblent manquer dans les Alpes. Ce résultat indique que le Massif Central français et les Massifs Cristallins Externes appartiennent à des zones voisines de l'orogène hercynien et ont subi des histoires magmatiques hercyniennes presque identiques.

Par contre, le magmatisme diffère radicalement de celui d'autres zones, également impliquées dans l'orogénèse alpine (Calabre, Afrique du Nord) (BONIN et al., in prep.).

La complexité au cours de l'orogénèse hercynienne de ce qui forme actuellement la chaîne alpine se manifeste par des histoires magmatiques variables suivant les régions. Elle pourrait s'expliquer par des sites géodynamiques différents très rapprochés et s'interpréter en termes de microplaques continentales situées entre Europe et Afrique, avant leur accréation finale dans la Pangée permienne.

#### Remerciements.

Ces réflexions ont vu le jour grâce à G. Vivier, infatigable organisateur des "Journées d'Autrans", qui m'a invité à venir animer en mai 1987 une séance consacrée aux granites, au cours des journées consacrées aux Massifs Cristallins Externes. Les différents auteurs de ce volume ont participé aux discussions et aux débats et m'ont ainsi conforté par leurs données nouvelles dans mes conceptions.

Les commentaires de P. Le Fort, G. Vivier et R.P. Ménot sur une première version m'ont permis de préciser quelques points. Je dois également beaucoup à une revue très minutieuse de S. Bogdanoff, bien que le ne l'aie pas suivi sur tout. Cette note se veut un regard extérieur (méditerranéen...) sur les granites varisques des Alpes et non un précis sur l'orogénèse varisque dans les Alpes, dont je ne suis pas spécialiste.

Merci également à J. von Raumer, organisateur d'un Symposium sur le Varisque dans les Alpes, à Fribourg (Suisse) en octobre 1987.

#### Références.

- AYRTON S. In prep. Variscan magmatism in Switzerland. In: "Hercynian plutonism", B. BONIN, D. VISONA et K. KEKELIA. P.I.C.G. n°5 Thematic Volume, UNESCO.
- BATCHELOR R.A. et BOWDEN P. 1985 Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multi-ionic parameters. *Chem. Geol.*, 48, 43-55.
- BONIN B. 1980. Les complexes acides alcalins anorogéniques continentaux: l'exemple de la Corse. Thèse Doct. Etat ès-Sci., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris.
1987. From orogenic to anorogenic magmatism: a petrological model for the transition calc-alkaline - alkaline complexes. I.S.G.A.M., Salvador, Bahia, ext. abstr., 27-31.
- BONIN B. et LAMEYRE J. 1978. Réflexions sur la position et l'origine des complexes magmatiques anorogéniques. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XX, 45-59.
- BONIN B., PLATEVOET B. et VIALETTE Y. 1987. The geodynamic significance of alkaline magmatism in the western Mediterranean compared with West Africa. In: "African geology reviews", P. BOWDEN and J.A. KINNAIRD eds., *Geol. Journal*, 22, in press.
- BONIN B., VISONA D. et KEKELIA K. In prep. Hercynian plutonism. P.I.C.G. n°5 Thematic Volume, UNESCO.
- BOWDEN P., BATCHELOR R.A., CHAPPELL B.W., DIDIER J. et LAMEYRE J. 1984. Petrological, geochemical and source criteria for the classification of granitic rocks: a discussion. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 35, 1-11.
- CHAPPELL B.W. et WHITE A.J.R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8, 173-174.
- COSTARELLA R. 1987. Thèse Doct. Univ. Grenoble
- COSTARELLA R. et VATIN-PERIGNONN. 1985. An alkaline complex: the Combeynot massif in the French Alps. *Terra Cognita*, 5, 318.
- DAL PIAZ G.V., DE VECCHI G. et HUNZIKER J.C. 1977. The Austro-Alpine layered gabbros of the Matterhorn and Mt. Collon-Dents de Bertol. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.*, 59-88.
- DE LA ROCHE H. 1986. Classification et nomenclature des roches ignées: un essai de restauration de la convergence entre systématique quantitative, typologie d'usage

- et modélisation génétique. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, II, 337-353.
- DEMANGE M. 1982. Etude géologique du massif de l'Agout. Montagne Noire -France. Thèse Doct. Etat ès-Sci., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris.
- DIDIER J., DUTHOU J.L. et LAMEYRE J. 1982. Mantle and crustal granites: genetic classification of orogenic granites and the nature of their enclaves. *J. Volc. Geoth. Res.*, 14, 125-132.
- DUTHOU J.L., CANTAGREL J.M., DIDIER J. et VIALETTE Y. 1984. Paleozoic granitoids from the French Massif Central: age and origin studied by 87Rb-87Sr system. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 35, 131-144.
- FERRARA G. et INNOCENTI F. 1974. Radiometric age evidences of a Triassic thermal event in the Southern Alps. *Geol. Rdsch.*, 63, 572-582.
- JAEGER E. 1977. The age of the continental crust of Central, Southern and Western Europe: arguments from geochemistry and isotope geology. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.*, 63, 339-346.
- LAMEYRE J. 1980. Les magmas granitiques: leurs comportements, leurs associations et leurs sources. *Mém. H. sér. Soc. Géol. Fr.*, 10, 51-62.
- LAMEYRE J. et BOWDEN P. 1982. Plutonic rock series: discrimination of various granitoid series and related rocks. *J. Volc. Geoth. Res.*, 14, 169-186.
- LE FORT P. 1972. Géologie du Haut-Dauphiné cristallin (Alpes françaises). Etude pétrologique et structurale de la partie occidentale. *Mém. Sci. Terre n°25*, Nancy, 373
- LOISELLE et WONES D.R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Abstr. 92nd Geol. Amer. Ann. Meet.*, 11, 468.
- MENOT R.P. 1987. Thèse Doct. Etat ès-Sci., Univ. Lyon 1
- PEARCE J., HARRIS N.B.W. et TINDLE A.G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25, 956-983.
- PITCHER W.S. 1979. The nature, ascent and emplacement of granite magmas. *J. Geol. Soc. Lond.*, 136, 627-662.
1982. Granite type and tectonic environment. In: "Mountain building processes", K.J. HSU ed., Acad. Press, N.Y., 19-40.
1987. Granites and yet more granites forty years on. *Geol. Rdsch.*, 76, 51-79.
- PITCHER W.S., ATHERTON M.P., COBBING E.J. et BECKINSALE R.D. 1985. Magmatism at a plate edge: the Peruvian Andes. Blackie, Halstead Press, Glasgow, 328 p.
- PUPIN J.P. 1976. Signification des caractères morphologiques du zircon commun des roches en pétrologie. Thèse Doct. Etat ès-Sci., Univ. Nice.
1980. Zircon and granite petrology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 73, 207-220.
1985. Magmatic zoning of hercynian granitoids in France based on zircon typology. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.*, 65, 29-56.
- SMITH R.B. 1977. Intraplate tectonics of the western North-American plate. *Tectonophysics*, 37, 323-336.
- STRECKEISEN A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Sci. Rev.*, 12, 1-33.
- STUSSI et DE LA ROCHE H. 1984. Le magmatisme orogénique granitique de la chaîne varisque française. Typologie chimique et répartition spatiale. *C. R. Ac. Sc.*, 298, 43-48.
- VISONA D. In prep. Variscan plutonism in Italy. In: "hercynian plutonism", B. BONIN, D. VISONA et K. KEKELIA, P.I.C.G. n°5 Thematic Volume, UNESCO
- VIVIER G. In prep. Variscan granitoids in French Alps. In: "hercynian plutonism", B. BONIN, D. VISONA et K. KEKELIA, P.I.C.G. n°5 Thematic Volume, UNESCO.
- WHALEN J.B., CURRIE K.L. et CHAPPELL B.W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95, 407-419.
- ZWART J.H. 1967. The duality of orogenic belts. *Geol. Mijnb.*, 46, 283-309.