



HAL
open science

Détermination de la sensibilité potentielle des roches cristallophylliennes à l'altération chimique à partir de leur composition chimique

Claude Martin

► To cite this version:

Claude Martin. Détermination de la sensibilité potentielle des roches cristallophylliennes à l'altération chimique à partir de leur composition chimique. *Etudes de Géographie Physique*, 2010, XXXVII, pp.3-11. <hal-00531070>

HAL Id: hal-00531070

<https://hal.science/hal-00531070v1>

Submitted on 1 Nov 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

DÉTERMINATION DE LA SENSIBILITÉ POTENTIELLE DES ROCHES CRISTALLOPHYLLIENNES À L'ALTÉRATION CHIMIQUE À PARTIR DE LEUR COMPOSITION CHIMIQUE

Claude MARTIN ⁽¹⁾

(1) : UMR 6012 "ESPACE" du CNRS, Département de Géographie, Université de Nice-Sophia-Antipolis, 98 Boulevard Édouard Herriot, BP 3209, 06204 NICE cedex 03.
Courriel : claude.martin0156@orange.fr

RÉSUMÉ : La sensibilité potentielle des roches cristallines à l'hydrolyse dépend très fortement de leur composition minéralogique. Un indice d'altérabilité (Ia) calculé à partir de la composition chimique globale des matériaux non altérés permet de prendre indirectement en compte le facteur minéralogique. Cet indice est particulièrement utile dans le cas des roches cristallophylliennes, pour lesquelles l'observation des lames minces renseigne mal sur la composition modale. Un indice de sensibilité à la décohésion chimique (Id), au caractère plus empirique, intègre l'influence de l'agencement des minéraux.

MOTS-CLÉS : altération chimique, hydrolyse, composition minéralogique, composition chimique, indices d'altérabilité, roches cristallophylliennes, massif des Maures.

ABSTRACT : The potential vulnerability of the crystalline rocks to hydrolysis is for a large part under the dependence of their mineralogical composition. A weatherability index (Ia) calculated using the chemical composition of rocks takes indirectly in consideration the mineralogical parameter. This index is particularly useful in the case of metamorphic rocks for which the observation of thin sections gives insufficient information on the modal composition. An index of sensibility to the chemical decohesion (Id), more empiric, takes into account the arrangement of minerals.

KEY-WORDS : chemical weathering, hydrolysis, mineralogical composition, chemical composition, weatherability index, metamorphic rocks, massive of Maures.

I - INTRODUCTION

Jusque dans les années 1990, les géomorphologues français ont consacré de nombreux travaux à l'altération des roches cristallines. Ce sujet est largement passé de mode, après que beaucoup de résultats aient été compilés.

Cette note reprendra les résultats obtenus dans le massif des Maures (C. MARTIN, 1973, 1986), où affleurent des roches métamorphiques variées allant de phyllades plus ou moins quartzeux à des gneiss parfois migmatitiques, en passant par des micaschistes, des leptynites et des amphibolites. En effet, même s'ils ont été repris par J.J. LAGASQUIE *et al.* (1994, 2001) et s'ils témoignent d'une problématique maintenant un peu datée (mais que je ne dirai pas dépassée), ces résultats méritent bien que nous les diffusions enfin largement sous notre signature.

De façon synthétique, la résistance d'une roche cristalline à l'hydrolyse dépend de celle de

ses minéraux (essentiellement en fonction de leur nature, mais aussi de leur taille), de la manière dont les éléments fragiles et résistants sont agencés les uns par rapport aux autres et de la possibilité offerte à l'eau de pénétrer dans les volumes rocheux (porosités de fissures et d'interstices).

Nous ne traiterons ici que de l'établissement d'une échelle de résistance des roches à partir de leur composition chimique, celle-ci étant bien sûr sous la dépendance de leur composition minéralogique.

II - LE FACTEUR MINÉRALOGIQUE

L'étude du comportement des différents minéraux à l'altération a suscité une multitude d'observations sur le terrain et en laboratoire. Il ne nous appartient pas de reprendre dans le détail toutes ces recherches (A. RONDEAU, 1961 ; A. GODARD, 1965 ; M. PETIT, 1971 ; R. COIN-

ÇON, 1972 ; J.C. FLAGEOLLET, 1977 ; B. COQUE-DELHUILLE, 1981, 1987 ; J.J. LAGASQUIE, 1980 ; J.P. PEULVAST, 1985 ; Y. LAGEAT, 1987 ; M.J. PENVEN, 1988). Elles sont d'ailleurs parfaitement résumées dans des ouvrages de synthèse, notamment ceux de J. DEJOU *et al* (1977), de P. BIROT (1981) et les textes de J.J. LAGASQUIE *et al.* (1994, 2001). Il suffit pour nous d'en retenir ici les informations majeures :

- Le quartz et, dans une moindre mesure, les micas blancs et les feldspaths sodi-potassiques constituent les principaux éléments de résistance d'une roche.
- La fragilité des plagioclases dépend de leur composition chimique. Ainsi les termes calciques sont très sensibles à l'hydrolyse, alors que les termes sodiques y résistent beaucoup mieux.
- La dégradation des micas noirs se manifeste nettement dès le début de l'altération des roches. L'évolution de ces minéraux se traduit alors, généralement, par de simples transformations plutôt que par une véritable destruction. Mais les modifications subies, fussent-elles légères, s'accompagnent d'efforts mécaniques qui affaiblissent les roches, en ouvrant de nouvelles fissures pour la pénétration de l'eau (P. BIROT, 1962). Dans une optique strictement géomorphologique, il faut donc admettre que les micas noirs constituent un facteur de fragilité plus important que les plagioclases calciques, lesquels atteignent pourtant, très souvent, dans les arènes, des stades d'évolution plus poussés.

Fort de ces informations, et afin d'apprécier les possibilités de résistance des roches à

$$C = \frac{\text{(Somme des valences des ions } K^+, Na^+ \text{ et } Ca^{2+}) \times 10}{\text{Nombre d'ions silicium}} \quad (1)$$

- En ce qui concerne les phyllosilicates, le problème s'avère plus complexe. Certes, des cations extérieurs (K^+) peuvent également assurer la neutralité de l'édifice quand l'aluminium se substitue au silicium au centre de certains tétraèdres. Mais surtout, il existe entre deux couches de tétraèdres pointant l'une vers

$$C = A + B \quad (2)$$

où

$$A = \frac{\text{(Somme des valences des cations extérieurs)} \times 10}{\text{Nombre d'ions silicium}} \quad (3)$$

et

l'altération en fonction de leur composition minéralogique, A. GODARD (1965) affecte aux minéraux, en se fondant sur l'échelle de S.S. GOLDICH (1938), un coefficient d'autant plus élevé qu'ils sont plus altérables : quartz = 1 ; muscovite = 1,5 ; orthoclase = 2,5 ; plagioclase = 4 ; biotite = 8 ; amphibole et pyroxène = 9. Cette échelle, déduite de la comparaison entre les roches saines et les manteaux d'altération, a été appliquée par la plupart des chercheurs.

En reprenant la même idée, une autre approche est cependant possible. En effet, les coefficients d'altérabilité peuvent être déterminés à partir de la composition chimique des minéraux et de leur structure cristalline (C. MARTIN, 1973). Dans la constitution d'un minéral, entrent différents éléments chimiques, qui représentent soit des facteurs de résistance (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+}), soit des facteurs de faiblesse (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , K^+ , Na^+). L'agencement de ces différents éléments détermine en grande partie la résistance potentielle du minéral :

- Dans le quartz, uniquement formé de tétraèdres SiO_4^{4-} , il n'existe que des éléments de résistance. Nous avons donc adopté le coefficient 0.

- Les tectosilicates sont également formés de tétraèdres. Mais la substitution d'un Al^{3+} à un Si^{4+} au centre de certains d'entre eux provoque un déficit de charge positive qui est compensé par des cations extérieurs (K^+ , Na^+ ou Ca^{2+}). Si les tétraèdres de silice forment une trame résistante, ceux d'alumine sont au contraire des facteurs de faiblesse, en raison des cations extérieurs compensateurs de charge. Nous avons donc calculé le coefficient d'altérabilité (C) des tectosilicates en appliquant l'équation :

l'autre, une couche d'octaèdres dont le centre est occupé soit par des éléments de faiblesse (Mg^{2+} , Fe^{2+}), soit par des éléments de résistance (Al^{3+} , Fe^{3+}). Aussi avons-nous calculé le coefficient d'altérabilité (C) des phyllosilicates de la manière suivante :

$$B = \frac{\text{(Somme des valences des éléments faibles de la couche octaédrique)} \times 10}{\text{Somme des valences positives de la couche octaédrique}} \quad (4)$$

Mais le centre des octaèdres de la muscovite reçoit uniquement des ions aluminium, ce qui augmente évidemment la résistance de l'ensemble du minéral. En effet, le départ d'un cation métallique externe n'a pas de répercussion sur

le comportement de la couche octaédrique et, par conséquent, sur la stabilité des feuillets. Dans ce cas, il faut corriger le coefficient d'altérabilité (C), en lui retranchant le terme (D) :

$$D = \frac{A \times \text{(Somme des valences des ions Al}^{3+} \text{ de la couche octaédrique)}}{\text{Somme des valences positives}} \quad (5)$$

- Enfin, pour les inosilicates, le coefficient d'altérabilité se calcule ainsi :

$$C = \frac{\text{(Somme des valences des éléments faibles)} \times 20}{\text{Somme des valences positives des couches intermédiaires}} \quad (6)$$

Finalement, on obtient les résultats suivants :

Quartz	: 0
Muscovite	: 2,4
Microlite	: 3,3
Albite An 0	: 3,3
Phengite	: 3,9
Chlorite	: 7 (4 à 10)
Anorthite An 100	: 10
Biotite	: 13,3
Hornblende	: 16,3 (12,5 à 20)

Ces valeurs rendent bien compte du rôle des différents minéraux dans les étapes préliminaires de la météorisation des roches sous l'effet de l'hydrolyse. Elles peuvent servir à calculer un indice d'altérabilité potentielle des roches, suivant une démarche semblable à celle d'A. GODARD (1965). L'indice s'obtient en multipliant la teneur de la roche en chacun des minéraux constitutifs par le coefficient d'altérabilité correspondant, puis en effectuant la somme des résultats partiels.

III - INTERPRÉTATION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES ROCHES

En pétrologie métamorphique, et principalement pour les ectinites, la détermination de la composition minéralogique modale se révèle d'une extrême imprécision. Or la reconstitution de la composition minéralogique à partir de la composition chimique pose toujours des problèmes très délicats. Il faut donc rechercher une méthode simple permettant de déterminer directement l'indice d'altérabilité d'une roche à partir de sa composition chimique.

A. RONDEAU (1961) explore le premier

cette voie, en synthétisant les observations présentées par différents chercheurs travaillant sur les modifications chimiques des roches soumises à l'altération hydrolytique. Cette approche le conduit à souligner les faits suivants :

- Les éléments les plus stables sont l'alumine, qui augmente dans les roches altérées, et la silice, qui diminue légèrement.
- Le potassium est également un élément stable.
- Le fer ferrique augmente le plus souvent, mais surtout aux dépens du fer ferreux.
- Les éléments les moins résistants sont, dans l'ordre de mobilisation croissante, le magnésium, le sodium et le calcium. Ces éléments et le fer ferreux servant généralement à compenser le déficit de charge cationique occasionné par la substitution d'un Al^{3+} à un Si^{4+} au centre de certains tétraèdres, l'alumine ne peut pas être considérée comme un facteur de résistance des roches.

Ces premiers résultats seront confirmés par de nombreux travaux traitant de l'altération des roches cristallines. Cependant la démarche adoptée par A. RONDEAU (1961), en vue d'aborder le problème des relations entre la composition chimique des roches et leur résistance à l'altération, conduit son auteur à une impasse. Certes, il constate justement que la silice est un facteur de résistance, alors que le sodium, le magnésium et le calcium sont au contraire des facteurs de faiblesse. Mais il reconnaît aussi son incapacité à interpréter la composition chimique d'une roche sans tenir compte de la structure des minéraux. En conséquence, il renonce à poursuivre dans cette voie de recherche, pour s'intéresser uniquement à l'influence de la composition minéralogique.

Pourtant, si l'on veut établir une équation qui fournisse l'indice d'altérabilité d'une roche à partir de sa composition chimique, il suffit de rechercher un moyen permettant de retrouver l'échelle de résistance potentielle des minéraux en

partant du seul critère chimique, donc sans considérer leur structure. Ce faisant, on s'aperçoit que le coefficient d'altérabilité des minéraux correspond aux rapports ci-dessous :

- Pour l'anorthite :

$$\frac{(\text{Valences des Ca}^{2+}) \times 80}{\text{Somme des valences positives}} \quad (7)$$

- Pour la muscovite, l'albite et les feldspaths sodi-potassiques :

$$\frac{(\text{Valences des K}^{\pm} \text{ ou Na}^{\pm}) \times 53,3333}{\text{Somme des valences positives}} \quad (8)$$

- Pour les micas noirs :

$$\frac{[(\text{Valences des K}^{\pm}) \times 53,3333] + (\text{Valences des Mg}^{2+} \text{ et Fe}^{2+}) \times 36,6666}{\text{Somme des valences positives}} \quad (9)$$

En définitive, on peut aisément calculer leur composition chimique : l'indice d'altérabilité des roches (Ia) à partir de

$$Ia = \frac{(A + B + C) \times 100}{\text{Somme des valences positives (sauf H}^{\pm})} \quad (10)$$

où

$$A = (\text{Valences des Ca}^{2+}) \times 80 \quad (11)$$

$$B = (\text{Valences des K}^{\pm} \text{ et Na}^{\pm}) \times 53,3333 \quad (12)$$

$$C = (\text{Valences des Mg}^{2+} \text{ et Fe}^{2+}) \times 36,6666 \quad (13)$$

Cette expression, de par son dénominateur, tient approximativement compte de la densité des minéraux. Elle paraît satisfaisante pour les roches pauvres en chlorites, y compris les amphibolites et les micaschistes à minéraux. Toutefois, comme il est exceptionnel de rencontrer des roches absolument saines, dans lesquelles le fer ferreux n'a pas au moins subi une oxydation partielle, nous l'avons toujours utilisée après avoir exprimé

le fer total sous forme ferreuse.

D'autre part, lorsqu'une roche contient des chlorites, la présence dans ces minéraux de couches d'hydroxydes de fer et de magnésium fausse les calculs. En effet, dans ce cas, on ne connaît pas avec précision le terme C de l'équation. On a alors :

$$C = r \times (\text{Valences des Mg}^{2+} \text{ et Fe}^{2+}) \quad (14)$$

où $r = 12,444$ à $23,333$. Cependant, si la roche ne contient pas de biotites, il est possible d'estimer le coefficient multiplicateur (r) de la manière suivante :

$$r = 23,333 - (10,889 X) \quad (15)$$

avec :

$$X = [\text{Al}^{3+} - (\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^{\pm} + 9 \text{K}^{\pm})] / (\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}) \quad (16)$$

où toutes les teneurs sont exprimées en méq/100 g de roche. Ajoutons que, si X dépasse 1, le coefficient vaut toujours 12,444.

Le tableau I synthétise les résultats obtenus dans le massif des Maures à partir des analyses présentées par différents auteurs (S. GUEIRARD,

1957 ; Y. MASUREL, 1964 ; M. SEYLER, 1975 ; M. SEYLER et M. BOUCARUT, 1979 ; C. CARU-BA et G. TURCO, 1976 ; P. CONTI, 1978 ;

J.O. BANOS, 1979 ; C. MARTIN, 1986). Pour cette note à caractère méthodologique, nous n'avons pas jugé utile d'intégrer d'autres données (C. CARUBA, 1983 ; G. CREVOLA, 1985 ; M. SEYLER, 1986).

Tableau I - Indices d'altérabilité (Ia) des roches métamorphiques du massif des Maures. Les roches sont classées par ordre d'altérabilité croissante de haut en bas.

	n	Moy	Méd	Max
Quartzites	4	62	65	92
Quartzo-phyllades	1	103		
Schistes	14	185	179	238
Phyllades du Bénat *	4	187 à 307	173 à 295	238 à 358
Leptynites du Cap Nègre	5	216	224	228
Leptynites des Berles	4	320		425
Gneiss de la Malière	1	269		
Gneiss du Cap Nègre	2	284		285
Gneiss de Bormes	23	295	293	379
Micaschistes des Berles	7	319	280	525
Micaschistes du Cap Nègre	13	350	336	472
Migmatites du Cap Nègre	6	401	381	511
Amphibolites	12	995	1049	1132

La dénomination des roches est celle de la carte géologique au 1/50000 Collobrières (P. BORDET, 1969), sauf pour les phyllades du Bénat (L. LUTAUD, 1951), à la distinction desquels une approche géomorphologique oblige à rester attaché.

* : Les phyllades du Bénat, à caractère schisteux, se distinguent des phyllades détritiques (alternance de bancs schisteux et quartzitiques) des Sauvettes, auxquels ils ont été rattachés par P. BORDET ; en outre, ils renferment à la fois des chlorites et des biotites. n : nombre d'échantillons analysés. Moy : moyenne des valeurs calculées. Méd : médiane des valeurs. Max : valeur maximale.

IV - ESSAI DE PRISE EN COMPTE DE L'ARRANGEMENT DES MINÉRAUX

L'arrangement des minéraux détermine en partie les possibilités offertes à l'altération chimique de progresser rapidement à l'intérieur d'une roche cristalline. Ainsi, dans les roches isotropes, comme les granitoïdes, la trame des minéraux résistants peut assurer une certaine protection aux minéraux fragiles, si ceux-ci ne sont pas trop nombreux. Mais, au contraire, dans les roches anisotropes très redressées, comme les roches métamorphiques du massif des Maures, les minéraux résistants protègent généralement très mal les minéraux altérables, et en particulier les biotites groupées en lits continus. À cet égard, J. DEJOU *et al.* (1971), travaillant dans le Massif Central français, montrent parfaitement combien le pendage de la foliation des micaschistes joue un rôle considérable dans l'approfondissement des profils d'altération.

Dans les micaschistes et les gneiss du massif des Maures, qui possèdent par définition une

structure nettement foliée, l'altération progresse d'abord par les lits phylliteux, dans lesquels les muscovites ne sont jamais en quantité suffisante pour protéger les biotites. Pour ces roches, la concentration des micas noirs constitue un handicap d'autant plus grand que l'ouverture des feuillets lors des premières étapes de l'altération provoque des contraintes mécaniques importantes. Toutefois la désagrégation granulaire des gneiss, pauvres en micas, passe toujours par l'altération des plagioclases. Il en va évidemment de même de celle des leptynites.

Dans les phyllades, si les micas blancs sont en général largement dominants, ils n'arrivent tout de même pas à protéger efficacement les chlorites. En effet, d'après les analyses chimiques des roches et le calcul des compositions minéralogiques qu'elles permettent, le rapport micas blancs / chlorites avoisine le plus souvent 2,5 ; alors qu'il faudrait une valeur supérieure à 3,3 pour que la protection soit réelle.

En conclusion, dans la plupart des roches métamorphiques à pendage très incliné, beaucoup

plus encore que dans la plupart des roches granitoïdes, l'altération progresse surtout par les minéraux les plus altérables. Il apparaît donc clairement que l'indice d'altérabilité des roches (Ia) sous-estime l'influence de ces minéraux. C'est pourquoi nous lui préférons un autre indice, l'indice de sensibilité des roches à la décohé-

sion par voie chimique (Id), qui reconnaît aux minéraux très altérables une influence plus forte. Cet indice est calculé à partir de la composition chimique des roches, après avoir exprimé le fer total sous forme ferreuse, en appliquant l'équation suivante :

$$Id = \frac{(3C + 2A + B) \times 100}{\text{Somme des valences positives (sauf H}^+)}$$
 (17)

où

$$C = (\text{Valences des Mg}^{2+} \text{ et Fe}^{2+}) \times 36,666$$
 (18)

$$A = (\text{Valences des Ca}^{2+}) \times 80$$
 (19)

$$B = (\text{Valences des K}^+ \text{ et Na}^+) \times 53,333$$
 (20)

J.J. LAGASQUIE *et al.* (1994, 2001) soulignent, à juste titre, que l'introduction des coefficients (3, 2 ou 1 selon l'élément chimique) introduit une part d'empirisme. Mais la démarche n'en permet pas moins d'approcher de plus près la réalité du comportement des roches.

d'altérabilité (Ia), à savoir la très grande résistance potentielle des quartzites et des phyllades, ainsi que l'extrême fragilité des amphibolites. Mais elles mettent également en lumière, d'une part, la résistance des leptynites et des gneiss, y compris les migmatites de la Malière, et, d'autre part, la fragilité de tous les micaschistes *sensu stricto* et des micaschistes migmatitiques du Cap Nègre.

Les données présentées dans le tableau II confirment les indications fournies par l'indice

Tableau II - Indices de sensibilité à la décohé- sion par voie chimique (Id) des roches métamorphiques du massif des Maures. Les roches sont classées par ordre d'altérabilité croissante de haut en bas.

	n	Moy	Méd	Max
Quartzites	4	124	143	157
Quartzo-phyllades	1	171		
Schistes	14	332	326	464
Leptynites du Cap Nègre	5	302	305	323
Leptynites des Berles	4	522		736
Phyllades du Bénat (1)	4	349 à 708	316 à 685	464 à 824
Gneiss de la Malière	1	515		
Gneiss du Cap Nègre	2	539		573
Gneiss de Bormes	23	551	525	769
Micaschistes des Berles	7	690	640	1 198
Micaschistes du Cap Nègre	6	749	690	1 040
Migmatites du Cap Nègre	6	808	706	1 070
Amphibolites	12	2 720	2 891	3 186

Légende : voir tableau I.

V - CONCLUSION

L'établissement de l'indice d'altérabilité (Ia) s'est révélé un exercice passionnant pour un tout jeune chercheur (du moins à l'époque du 3^{ème} cycle), puisqu'il s'agissait de résoudre un

problème théorique qui n'avait pas encore trouvé le moindre début de solution.

L'indice de sensibilité à la décohé- sion par voie chimique (Id) inspire moins de fierté, car il représente un simple ajustement rendu nécessaire par le fait que l'altérabilité potentielle d'une roche

ne peut pas être seulement appréhendée par l'altérabilité moyenne de ses minéraux, les plus fragiles d'entre eux jouant un rôle déterminant, en particulier dans le cas des roches cristallophylliennes. Toutefois l'approche minéralogique nécessiterait le même prolongement (B. COQUE-DELHUILLE, 1981).

D'autres facteurs interviennent dans l'altération chimique différentielle des roches. À cet égard, rappelons que le terme de porosité recouvre deux notions complémentaires : d'une part, celle de porosité de fissures et, d'autre part, celle de porosité d'interstices. Selon B. COQUE-DELHUILLE (1981) la porosité d'interstices est en général plus important que le facteur de diaclasage. Mais, de toute façon, il semble que ces facteurs n'interviennent que secondairement, introduisant seulement des nuances entre les roches pétrographiquement voisines (A. GO-

DARD, 1972), sauf localement le long des zones de tectonisation. En fait, dans les roches cristallophylliennes, quelle que soit la fracturation, les plans de stratification, de foliation et de schistosité prennent largement le pas sur les diaclases. Les plans de faiblesse peuvent se trouver révélés par la décompression des roches, tout particulièrement en relation avec le creusement des vallées. Or les tensions horizontales sont extrêmement fortes dans ces roches ayant subi un plissement isoclinal. Avec L. VOISIN (1978), soulignons que les effets de la décompression sur les versants sont surtout sensibles lorsque les plans de faiblesse ont une direction parallèle à celle de la vallée et que leur inclinaison épouse le sens de la pente topographique. Ce phénomène intervient du reste dans l'évolution dissymétrique de certaines vallées (C. MARTIN, 1972, 1973, 1986 – voir C. MARTIN, 2010).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BANOS J.O. (1979) - *Géologie des terrains paléozoïques dans le sud-ouest du massif des Maures (Var, France)*. Thèse de Docteur Ingénieur, Université Aix-Marseille III, Travaux des Laboratoires des Sciences de la Terre, série B, n° 14, 122 p.
- BIROT P. (1962) - *Contribution à l'étude de la décomposition des roches*. Édit. CDU, Paris, 232 p.
- BIROT P. (1981) - *Les processus d'érosion à la surface des continents*. Édit. MASSON, Paris, 607 p.
- BORDET P. (1969) - *Carte géologique Collobrières au 1/50000, avec notice explicative*. Feuille XXXIV-45 (couverte en collaboration avec G. MENNESSIER), Édit. BRGM, Orléans.
- BORDET P. (1976) - *Carte géologique Collobrières au 1/50000, avec notice explicative*. Feuille XXXIV-46-47 (couverte en collaboration avec H. CHAMLEY, J. BLANC et A. JEUDY-DE-GRISSAC), Édit. BRGM, Orléans.
- CARUBA C. (1983) - *Nouvelles données pétrographiques, minéralogiques et géochimiques sur le massif métamorphique hercynien des Maures (Var, France) : comparaison avec les segments varisques voisins et essais d'interprétation géotectonique*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Nice, 359 p.
- CARUBA C. et TURCO G. (1976) - Étude lithostratigraphique du massif du Fenouillet : corrélations lithostratigraphiques à l'échelle des Maures (Var, France). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, série D, vol. 283, p. 1473-1476.
- COINÇON R. (1972) - *La bordure orientale de la Margeride de Neussargues à Saint-Alban : étude géomorphologique*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Clermont-Ferrand, 187 p.
- CONTI P. (1978) - *La chaîne de La Verne (Maures, Var, France) : lithostratigraphie et pétrologie des formations cristallophylliennes*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Nice, 146 p.
- COQUE-DELHUILLE B. (1981) - Indice d'altérabilité potentielle approchée des roches granitoïdes. *Physio-Géo*, vol. 2, p. 59-70.
- COQUE-DELHUILLE B. (1986) - *Le massif du Sud-Ouest anglais et sa bordure sédimentaire : étude géomorphologique*. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris I, Édit. EDITEC, 1987, 987 p.
- CREVOLA G. (1985) - Les orthomicaschistes du massif des Maures (France) : produits ultimes du tectonométamorphisme d'anciens granites. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, vol. 301, série 2, n° 2, p. 99-104.
- DEJOU J., GUYOT J., PÉDRO G. et CHAUMONT C. (1971) - Étude sur le rôle du pendage dans l'évolution superficielle des

- roches schisteuses. Cas de l'altération des micaschistes dans le Massif Central français. *Pédologie*, vol. XXI, n° 3, p. 343-359.
- DEJOU J., GUYOT J. et ROBERT M. (1977) - *Évolution superficielle des roches cristallines et cristallophylliennes dans les régions tempérées*. Édit. INRA, Paris, 464 p.
- FLAGEOLLET J.C. (1977) - *Origine des reliefs, altérations et formations superficielles : contribution à l'étude géomorphologique des massifs anciens cristallins du Limousin et de la Vendée du nord-ouest*. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris VII, Sciences de la Terre, Mémoire 35, 461 p.
- GODARD A. (1965) - *Recherches de géomorphologie en Écosse du Nord-Ouest*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Paris, Édit. Presses universitaires de Strasbourg, 701 p.
- GODARD A. (1972) - Quelques enseignements apportés par le Massif Central français dans l'étude géomorphologique des socles cristallins. *Rev. Géog. phys. Géol. dyn.*, volume XIV, fasc. 3, p. 265-296.
- GOLDICH S.S. (1938) - A study in rock weathering. *Journal of Geology*, vol. 46, p. 17-23.
- GUEIRARD S. (1957) - *Description pétrographique et zonéographique des schistes cristallins des Maures*. Thèse de Doctorat d'État, Université d'Aix-Marseille, Trav. Labo. Géol. Marseille, vol VI, 1959, p. 71-264.
- LAGASQUIE J.J. (1984) - *Géomorphologie des granites. Les massifs granitiques de la moitié orientale des Pyrénées françaises*. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris I, Édit. CNRS, Toulouse, 374 p.
- LAGEAT Y. (1987) - *Géomorphologie des roches basiques et ultrabasiques : le relief du Bushveld (Afrique du Sud)*. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris I, 1 110 p.
- LAGASQUIE J.J. et LAGEAT Y., avec la collaboration d'A. GODARD (1994) - Chapitre IV : Le potentiel d'inégale résistance. In : *Les régions de socle. Apports d'une école française de Géomorphologie*, Publications de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université Blaise PASCAL, Clermont-Ferrand, fascicule 43, A. GODARD, J.J. LAGASQUIE et Y. LAGEAT édit., p. 105-135.
- LAGASQUIE J.J., LAGEAT Y. et A. GODARD (2001) - Chapter 4: Rock resistance and its influence on landforms in basement terrains. In : *Basement regions*, Édit. SPRINGER, Berlin-Heidelberg, A. GODARD, J.J. LAGASQUIE et Y. LAGEAT édit., p. 93-116.
- LUTAUD L. (1951) - *Carte géologique Toulon au 1/80000*. Feuille 248 (couverte en collaboration – le massif des Maures a été cartographié par L. LUTAUD), Édit. BRGM, Orléans.
- MARTIN C. (1972) - L'érosion différentielle dans la région de Collobrières. Massif des Maures - Var. *Méditerranée*, n° 3-4, p. 159-170.
- MARTIN C. (1973) - *Études de géographie physique dans la partie nord-occidentale du massif des Maures*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Nice, 453 p.
- MARTIN C. (1986) - *Contribution à l'étude de la dynamique des versants en roches métamorphiques ; l'exemple du massif des Maures*. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris I, 935 p.
- MARTIN C. (2010) - Les grands traits du relief de la partie occidentale du massif des Maures (Var, France) : formation et évolution. *Ét. Géogr. Phys.*, vol. XXXVII, p. 13-40.
- MASUREL Y. (1964) - *La Provence cristalline et ses enveloppes sédimentaires. Essai de Géographie Physique*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Paris, Édit. Ophrys (1965), Paris, 418 p.
- PETIT M. (1971) - *Contribution à l'étude géomorphologique des reliefs granitiques à Madagascar*. Thèse de Doctorat d'État, Université Aix-Marseille 2, Édit. Imprimerie centrale, Tananarive, 308 p.
- PENVEN M.J. (1988) - *Altérations et formes de relief dans les ensembles cristallins tardifs : l'exemple de la Kabylie de Collo*. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris I, 743 p.
- PEULVAST J.P. (1985) - *Relief, érosion différentielle et morphogénèse dans un bourrelet montagneux de haute latitude : Lofoten, Vesterålen et Sogn-Jotun (Norvège)*. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris I, 1 642 p.
- RONDEAU A. (1961) - *Recherches géomorphologiques en Corse*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Paris, Édit Armand COLIN, Paris, 586 p.
- SEYLER M. (1975) - *Pétrologie et lithostratigraphie de formations cristallophylliennes dans la chaîne de la Sauvette (Maures, Var, France)*. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Nice, 184 p.
- SEYLER M. (1986) - *Magmatologie des séries*

-
- volcaniques métamorphiques. L'exemple des métavolcanites cambro-ordoviciennes, en particulier alcalines, du socle provençal (France).* Thèse de Doctorat d'État (1984), Université Lyon I, Docum. Labo. Géol. Lyon, n° 96, 1986, 371 p.
- SEYLER M. et BOUCARUT M. (1979) - Existence d'un paléovolcanisme alcalin et transitionnel dans le massif hercynien des Maures (Var). Étude géochimique des amphibolites et résultats préliminaires concernant la chimie des leptynites. *Bull. Soc. Géol. France*, vol. XXI, n° 1, p. 11-20.
- VOISIN L. (1978) - *Le modelé schisteux en zone froide et tempérée, mécanismes générateurs et formes essentielles. Analyse géomorphologique d'une région type, l'Ardenne occidentale.* Thèse de Doctorat d'État, Université Paris IV, Service de reprographie des thèses de l'Université Lille III, 2 tomes (parus en 1979 et 1981), 883 p.