



Stratigraphie, sédimentologie

Analyse hyperspectrale des carbonates jurassiques dans le Haut Atlas atlantique marocain : exemple du Lias inférieur de la formation d'Arigh Ouzla (bassin d'Essaouira)

Hyperspectral analysis of Jurassic carbonates in the Moroccan Atlantic High Atlas: Example of Lower Liasic formation of Arigh Ouzla (Essaouira basin)

Rachid Baissa ^{a,*}, Kamal Labbassi ^{a,*}, Patrick Launeau ^b, Brahim Ouajhain ^a, Anne Gaudin ^b

^a Laboratoire de géosciences et environnement, faculté des sciences, université Chouaib Doukkali, BP 20, 24000 El Jadida, Maroc

^b UMR-CNRS 6112, laboratoire de planétologie & géodynamique, université de Nantes, BP 92209, 44322 Nantes cedex 3, France

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 30 juillet 2009

Accepté après révision le 5 octobre 2010

Disponible sur internet le 16 novembre 2010

Présenté par Jean Auboin

Mots clés :

Spectroscopie de réflectance

Carbonate

Haut Atlas atlantique

Maroc

Keywords:

Reflectance spectroscopy

Carbonate

Atlantic High Atlas

Morocco

RÉSUMÉ

La télédétection hyperspectrale constitue aujourd'hui, à travers la spectrométrie du terrain, un outil puissant pour la discrimination et l'identification précise et rapide des surfaces minérales. L'objectif de ce travail est l'identification spectrale des faciès carbonatés dans le Haut Atlas atlantique marocain, afin de mettre en place une librairie spectrale régionale préparatoire à la réalisation de cartes régionales à haute résolution spatiale. Les spectres acquis dans le visible-Infrarouge (0,4–2,5 μm) ont été utilisés pour la caractérisation et le suivi de l'évolution de l'état diagénétique des dolomies du Lias inférieur de la coupe d'Arigh Ouzla, dans l'anticlinal du Jbel Amsittène. La séparation des faciès et la prise en compte de la diversité des phénomènes d'altération ont imposé la normalisation de retrait des effets superficiels de dissolution et la restriction de la fenêtre spectrale pour éviter la superposition d'information. Les bandes d'absorption caractéristiques varient entre 2,319 et 2,323 μm et ne changent pas entre surfaces de dissolution et cassures fraîches. Ces valeurs reflètent le caractère totalement dolomitique des faciès et permettent d'estimer le degré de diagenèse, d'où des précisions par rapport aux descriptions pétrographiques et sédimentologiques précédentes. L'analyse des spectres a montré qu'une relation entre degré de cristallinité et profondeur de la bande d'absorption pouvait être établie.

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

ABSTRACT

Nowadays, hyperspectral remote sensing is a powerful tool for discrimination and accurate and rapid identification of mineral surfaces, due to the new technique of ground spectrometry. The objective of this article is the spectral identification of carbonate facies that exist in the Moroccan Atlantic High Atlas mountains, to establish a regional spectral library in order to prepare the implementation of regional maps with high spatial resolution. The spectra acquired in the visible-infrared (0.4 to 2.5 μm) were used for characterizing and monitoring the evolution of diagenetic dolomite from the Lower Lias of the Arigh Ouzla formation that exists in the anticline Jbel Amsitten. The separation of

* Auteurs correspondants.

Adresses e-mail : rbaissa@yahoo.fr (R. Baissa), Kamal_labbassi@yahoo.fr (K. Labbassi).

facies, and the taking into account of the diversity in alteration phenomena, have imposed the normalization of the withdrawal of surface effects of dissolution and the restriction of the spectral window to avoid overlap of information. The characteristic absorption bands vary between 2.319 and 2.323 μm and do not change between patina surface and fresh fractures. These values reflect the character totally dolomitic of the facies and can be used to estimate the degree of diagenesis, which gives more details with respect to previous sedimentological and petrographic descriptions. Analysis of the spectra has shown a relationship between the degree of crystallinity and depth of the absorption band could be established.

© 2010 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Abridged English version

Nowadays the development of sensors for acquiring hyperspectral images contributes greatly to the identification of different constituents of the earth's surface and therefore to the improvement of cartographic products. The spectral signature of rocks and soils has been widely discussed by several authors to identify minerals contained by these materials (Crowley, 1986, 1991; Gaffey, 1986; Hunt, 1970; Hunt and Salisbury, 1970; Lagacherie et al., 2008; Salisbury et Eastes, 1985; Van der Meer, 1995, 1996, 1997).

The applications are obvious to the geological mapping of mineral abundance, but the complexity of the overlapping parameters to the origin of the spectral signatures of petrological facies remains a barrier to its systematic development at all scales of observation that requires a classic geological analysis.

The aim of this work is to show what are the relevant parameters in hyperspectral remote sensing for the production of geological maps from field spectrometry, going beyond conventional studies of detection of mineralogy, to address the notion of facies. It is also about testing the potential of field spectrometry as a quantitative method for identifying different stages of diagenesis of carbonate microfacies of the Essaouira Basin of western High Atlas of Morocco.

To achieve this goal, we adopted a methodology that is based on two different and complementary approaches: petrological and spectrometric analysis.

The petrological analysis is based on a description of textures according to the classification of Dunham (1962), observed in thin sections. To facilitate its correlation with their optical properties governing spectrometry, these textures are analyzed by the scanning of thin sections under identical conditions of shots (fixed gain) and searching for maximum illumination of the image histograms of gray levels (Fig. 3). More crystalline a facies, the higher its histogram maximum occurs at high values of gray level. Conversely, the more micritic facies tend to have a maximum at lower levels of gray (Figs. 2 and 3).

The reflectance spectra of the different facies of the Arigh Ouzla formation were acquired directly on the ground with an ASD FieldSpec 3 spectroradiometer. Three detectors covering the wavelength range between 0.35 and 2.5 μm with a spectral resolution of 3 to 10 nm give spectra in luminance. The reflectance is given by the ratio between the target and a Spectralon.

Several measures of spectral signature have been done on different types of surface (patina (P), lichen (V), fresh

fracture (C) and plating (R)) for each level of the stratigraph (Fig. 7). The comparison of spectra within the same bank revealed differences between them. It seems they are related to the effects of surface roughness. A part of this can be removed by a normalization of the spectra, facilitating their comparison (Dunham, 1962). Basically this involves the division of a spectrum by its trend obtained by a large low-pass filter (Fig. 4). The normalized spectra retain information specific to mineralogy and petrographic facies without being altered by the information related to shadowing due to common surface roughness. However, particular diffusions due to the interaction between light and geometric roughness, like cutting-lines, remain. Therefore, normalized spectra keep information on the continuum (the general shape of the spectrum) related petrographic facies (Fig. 5) but cutting-lines still alter their shape in the short wavelength range.

The main information about the mineralogy is given by the analysis of characteristic absorption features, independent of the continuum, using an index. We build an index similar to the NDVI (Asrar et al., 1989; Baret and Guyot, 1991; DeFries et Townshend, 1994; Friedl et al., 1995; Wang et al., 2004) for the chlorophyll but, instead of measuring a red edge, we calculate the normalized difference between the well of the carbonate absorption feature and its right shoulder (long wavelength side) (Fig. 6). We name this index the Normalized Difference Carbonate Index or NDCI. Since these carbonates can be either calcite or dolomite, the procedure begins by finding the wavelength λ_{Bmin} of minimum reflectance ρ_B of the carbonate absorption band sought and the wavelength (λ_{Bmax}) of maximum reflectance ρ_E to the right of the minimum, in the wavelength interval 2.1 to 2.4 μm . When the minimum ρ_B and maximum ρ_E reflectances are found with sufficient difference in reflectance and within a 10 nm interval (Fig. 6), the depth of the absorption band is calculated (NDCI equation, see text).

At the scale of the Arigh Ouzla Formation samples, the distribution of wavelength centres of primary carbonates' absorption bands (λ_{Bmin}) varies between 2.319 and 2.323 μm (Fig. 2). All samples are therefore dominated by dolomite. The NDCI intensity can estimate the degree of diagenesis, but only when considering similar surfacic states. Such findings, considering carbonate's absorption feature depth, have been verified in other parts of the world (Clark and Roush, 1984; Gaffey, 1986; Hunt and Salisbury, 1970), but not on crude samples in their natural outcrop. In addition, we show that the texture of the carbonates is also reflected by a significant petrological

component of the continuum which can be used to confirm the determination of the relative grain size. The increase in grain size increases the depth of the absorption bands as expected (Clark, 1999; Cooper and Mustard, 1999; Ghrefat et al., 2007), but it is also accompanied by a curvature of the continuum between 1 and 2.5 μm without the need to use another mineralogy to explain that curvature (Fig. 9).

The availability of airborne platforms with spectral resolutions of 5 to 10 nm should soon allow us to perform this type of study.

1. Introduction

Lorsqu'un rayonnement atteint un objet (roche ou minéral), il peut en absorber une partie et en réfléchir une autre. Un spectre de réflectance se définit comme la fraction de radiation solaire incidente, réfléchi par une surface ou un objet en fonction de la longueur d'onde. La forme des spectres varie d'une surface à une autre, ce sont les variations spectrales. Elles se traduisent par des changements dans les creux (bandes d'absorption), les épaulements, la pente, etc. La spectroscopie de réflectance est l'ensemble des méthodes permettant la détermination du comportement de ces spectres et leur analyse.

Les spectres de réflectance des minéraux, des roches et des sols ont été largement discutés dans plusieurs travaux (Crowley, 1986, 1991 ; Gaffey, 1986 ; Hunt, 1970 ; Hunt et Salisbury, 1970 ; Van der Meer, 1995, 1996, 1997). Les

applications sont évidentes en cartographie géologique et minéralogique, mais la complexité de l'imbrication des paramètres à l'origine des signatures spectrales de faciès pétrologiques reste un frein à son développement systématique, à toutes les échelles d'observation que requière une analyse géologique classique. Le but de ce travail est de montrer quels sont les paramètres pertinents en télédétection hyperspectrale pour la réalisation de cartes géologiques à partir d'une spectrométrie de terrain, en allant au-delà des études classiques de détection d'une minéralogie, pour aborder la notion de faciès. Il est aussi question de tester les potentialités et l'apport de la spectrométrie de terrain en tant que méthode quantitative et d'identification des différents stades de diagenèse des microfaciès carbonatés du bassin d'Essaouira du Haut Atlas occidental marocain. L'identification spectrale de ces faciès permettra de mettre en place une librairie spectrale régionale préparatoire à la réalisation d'une campagne de télédétection aéroportée, nécessaire à la réalisation de cartes régionales à haute résolution spatiale.

2. Contexte géologique

Le bassin d'Essaouira constitue la partie occidentale du système atlasique marocain (Fig. 1). Il fait partie de la marge passive est-atlasique, dont l'histoire a débuté au Trias supérieur au cours du *rifting* de l'Atlantique central. La série sédimentaire, pendant le Jurassique, est très

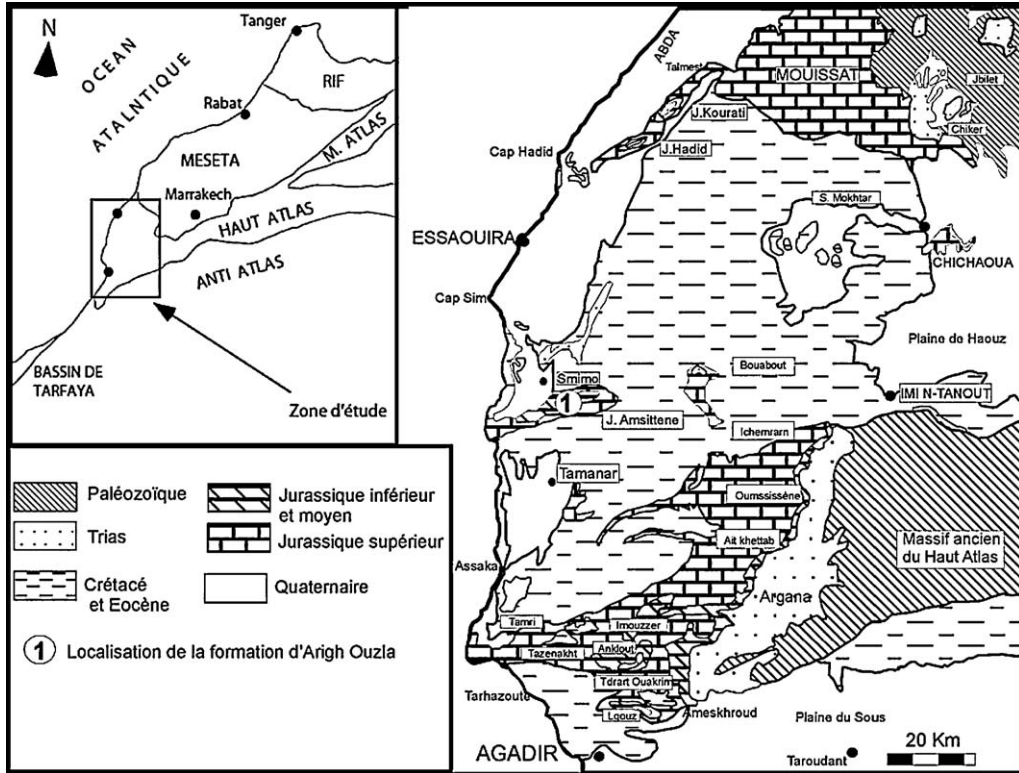


Fig. 1. Esquisse géologique de la région étudiée.

Fig. 1. Geological map of the studied region.

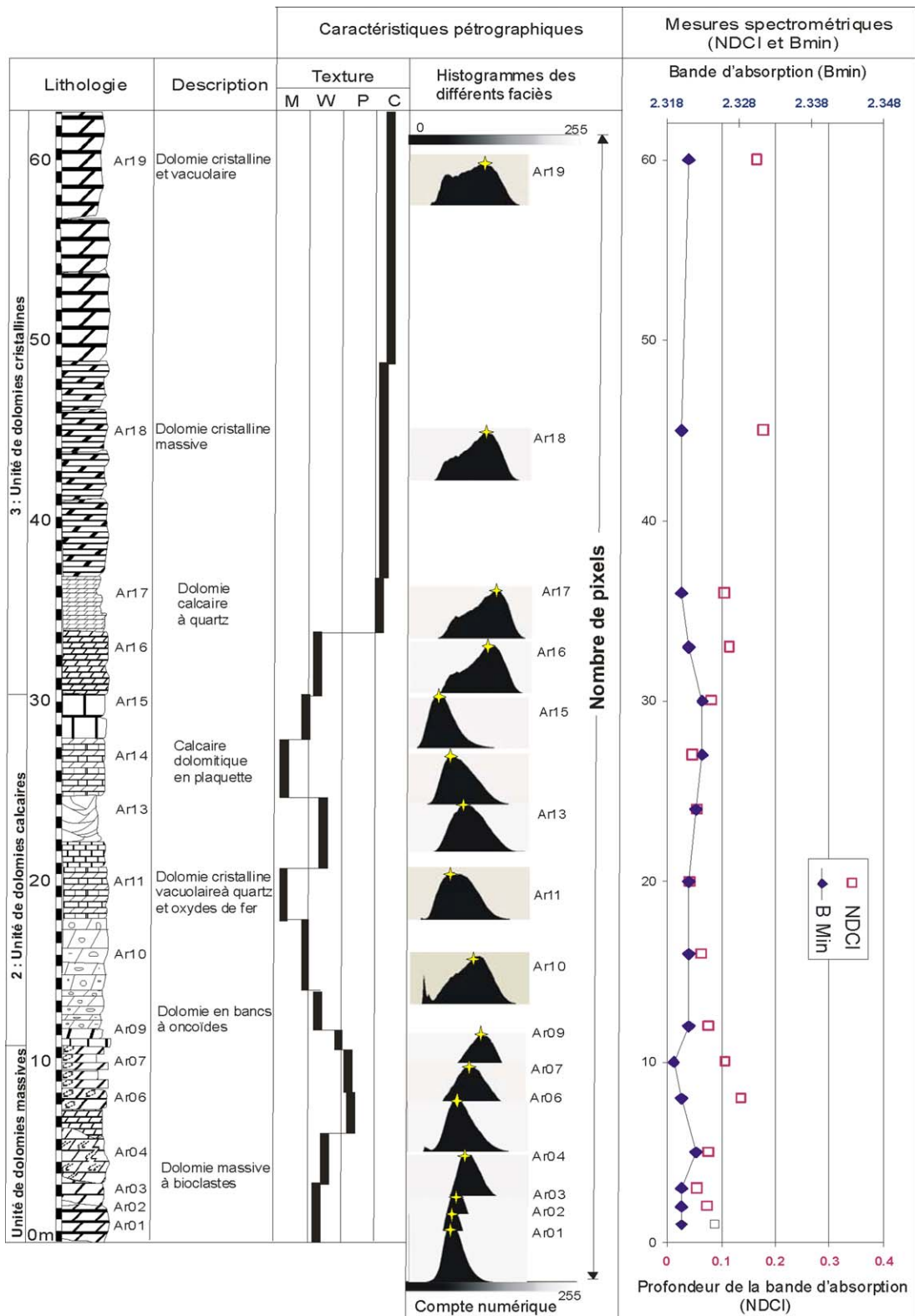


Fig. 2. Les éléments d'analyse pour la caractérisation sédimentologique et spectrométrique de la coupe d'Arigh Ouzla.

Fig. 2. Analytic elements for sedimentological and spectrometry characterisation of Arigh Ouzla section.

épaisse et caractérisée par un remplissage évaporitique et carbonaté (Fig. 1). Au cours du Lias et du Dogger, la sédimentation est constituée par des dépôts détritiques et évaporitiques passant à des calcaires dolomitiques, à l'ouest du bassin. Au Callovien-Oxfordien se développe une plate-forme carbonatée ; les dépôts sont des dolomies gréseuses, des calcaires argileux et des argiles. Du Kimméridgien au Berriasien, la sédimentation est surtout évaporitique (dolomie et anhydrite, calcaire dolomitique).

Le bassin d'Essaouira a fait l'objet de plusieurs études géologiques (Adams et al., 1980 ; Amrhar, 1995 ; Bouaouda, 2006 ; Bouaouda et al., 2007 ; Du Dresnay, 1988 ; Duffaud et al., 1966 ; Labbassi, 1998 ; Labbassi et al., 2000 ; Medina, 1994 ; Roch, 1950), mais aucune étude utilisant les techniques de la télédétection hyperspectrale n'y avait été entreprise. La formation d'Arigh Ouzla, représente les premiers dépôts marins dans le bassin d'Essaouira, attribuées au Lias moyen (Bouaouda et al., 2007). Elle affleure au cœur de l'anticlinal du Jbel Amssitène (Fig. 1). D'un point de vue sédimentologique, les dépôts commencent par des faciès formés par des bancs métriques massifs de dolomies noires. Ce sont des dolosparites à oncoïdes fortement poreuses, à texture *mudstone* à *wackstone*. Cet ensemble est surmonté par des calcaires et des dolomies calcaires en bancs décimétriques, riches en quartz et organisés en texture *wackstone* à *packstone*. La série se termine par des dolosparites cristallines correspondant à un faciès avec un stade de diagenèse très avancée (AR19, Fig. 2).

3. Méthodologie de travail

La méthodologie adoptée est basée sur deux approches différentes et complémentaires, à savoir l'analyse pétrologique et spectrométrique des faciès carbonatés.

L'analyse pétrologique repose sur une description des textures, selon la classification de Dunham (1962), observées en lames minces. Pour faciliter sa corrélation avec les propriétés optiques gouvernant leur spectrométrie, ces textures sont analysées par numérisation des lames minces dans des conditions de prises de vue rigoureusement identiques (à gain fixe) et par recherche des maximums d'éclaircissement des histogrammes de niveaux de gris (Fig. 3). Plus le faciès est cristallin, plus le maximum apparaît à de fortes valeurs de niveaux de gris. Inversement, plus il est micritique, plus il a tendance à présenter un maximum aux plus bas niveaux de gris (Fig. 2 et 3).

Les spectres de réflectance des différents faciès de la formation d'Arigh Ou Zella ont été acquis directement sur le terrain par le biais d'un spectromètre de terrain ASD FiedSpec 3, équipé d'une sonde qui contient à la fois la source d'éclaircissement artificielle (e.g., lampe halogène) et la fibre optique. Sur le terrain on a plaqué cette sonde à la surface de chaque banc de la formation d'Arigh Ou Zella pour analyser sa composition. En effet, après l'interaction de la lumière avec la surface analysée, le rayonnement électromagnétique est récupéré et dirigé vers trois détecteurs couvrant la gamme de longueurs comprises entre 0,35 et 2,5 μm , avec une résolution spectrale de 3 à

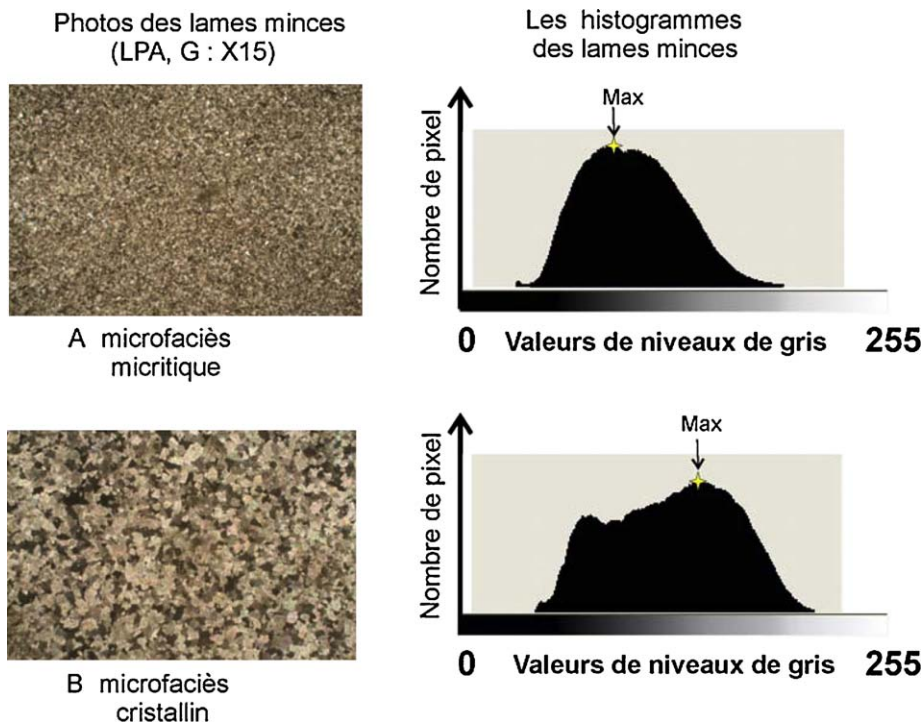


Fig. 3. Méthode d'analyse pétrologique : à gauche la photo de la lame mince et à droite l'histogramme correspondant.

Fig. 3. Petrological analysis method, on the left shows the photo of the thin section, and on the right the corresponding histogram.

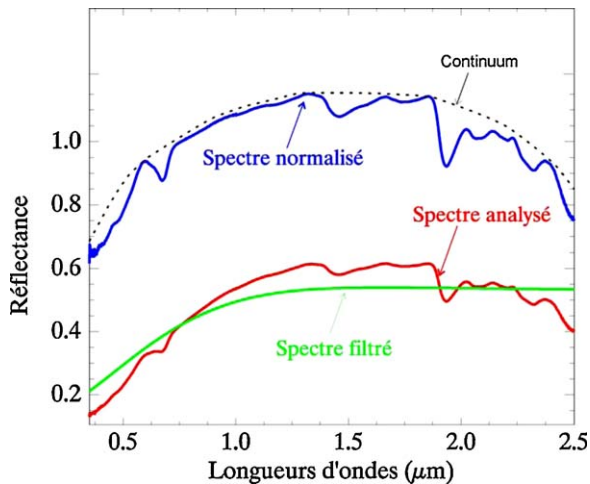


Fig. 4. Spectre analysé, spectre filtré, spectre normalisé et continuum d'une surface carbonatée recouverte par des lichens.

Fig. 4. Spectrum analyzed, filtered spectrum, normalized spectrum and continuum of a surface carbonate covered by lichens.

10 nm. Pratiquement, l'acquisition des spectres en réflectance se fait en deux étapes. La première consiste à acquérir la mesure d'un panneau de référence, constitué d'un matériau (le Spectralon) qui est un réflecteur diffus parfait réfléchissant 99 % du rayonnement dans toutes les directions. La deuxième mesure consiste à examiner la cible. Les spectres de ces deux surfaces sont acquis en luminance, puis les données sont exportées en réflectance de manière automatique par le calcul du rapport entre cible et Spectralon par le logiciel intégré à cet instrument (ASD).

Sur chaque banc, plusieurs mesures de la signature spectrale ont été effectuées sur différents types de surface (patine (P), lichen (V), cassure fraîche (C) et placage (R)).

D'après l'analyse visuelle des signatures spectrales, on a constaté une divergence entre les spectres caractéristiques des différentes surfaces d'un même banc ou faciès (e.g., patine et cassure), ce qui pourrait s'expliquer par les effets de dissolution superficielle et de rugosité. L'analyse de cette divergence montre que l'effet lié à la rugosité se traduit par un bombement général de leur forme.

L'utilisation d'un simple filtre passe-bas, à moyenne mobile, permet d'extraire l'information sur ce « bombement ». Les coefficients gaussiens du filtre sont donnés par l'équation suivante (Roy et al., 2009) :

$$A(\lambda) = 0,5 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\tau} \right)^2$$

avec A : amplitude, λ_0 : centre de la bande, λ : longueur d'onde, τ : largeur à mi-hauteur (FWHM).

Plus la largeur à mi-hauteur de la gaussienne est faible (e.g., FWHM = 0,20 μm), plus le spectre filtré sera proche du spectre examiné. Dans ce cas, la tendance contiendra une partie de l'information liée à la composition minéralogique, car certaines absorptions sont encore trop larges et n'arrivent pas à être filtrées. Au contraire, plus la largeur à mi-hauteur est grande (e.g., FWHM = 1,2 ou 1,4 μm), plus le spectre filtré sera assimilé à une tendance dépourvu des bandes d'absorption et contiendra une partie de l'information liée à la rugosité de surface. Pour construire le spectre filtré, on a utilisé la valeur 1,4 μm pour la largeur à mi-hauteur.

Le retrait de la tendance consiste tout simplement à diviser le spectre analysé (ρ_{sa}) par le spectre filtré (ρ_{sf}) pour toutes les longueurs d'onde (λ), afin d'obtenir un spectre normalisé (ρ_n) (Fig. 4), comme le montre l'équation suivante :

$$\rho_n(\lambda) = \frac{\rho_{sa}(\lambda)}{\rho_{sf}(\lambda)}$$

Les spectres normalisés conservent une information propre à la minéralogie et au faciès pétrographique, sans être altérés par l'information liée à la rugosité de surface. Ceci permet de comparer les spectres entre eux en conservant l'information sur le continuum (forme générale du spectre), liée au faciès pétrographique (Fig. 5). Cette information est complétée par l'analyse des bandes d'absorption caractéristiques, indépendante du continuum, à l'aide d'un indice. Celui que nous avons choisi est similaire au NDVI (Asrar et al., 1989 ; Baret et Guyot, 1991 ; DeFries et Townshend, 1994 ; Friedl et al., 1995 ; Wang et al., 2004), mais construit sur le saut brutal des réflectances entre ces bandes et leur épaulement (côté grande longueur d'onde) (Fig. 6). Cet indice nommé NDCI pour « Normalized Difference Carbonate Index » s'ajuste

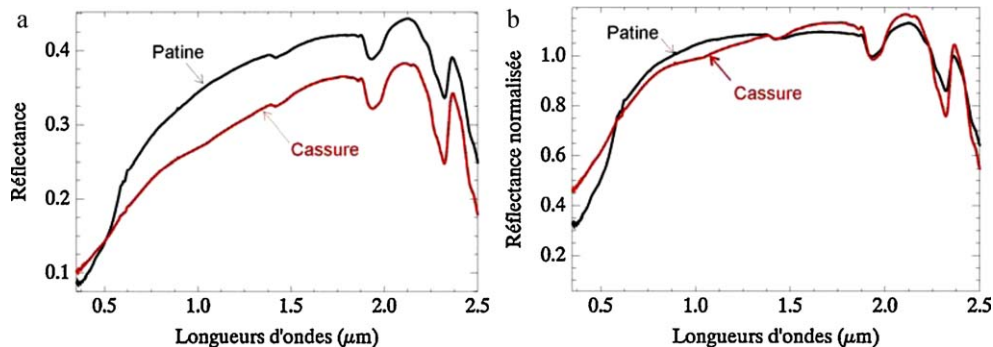


Fig. 5. (a) spectres de la patine et de la cassure d'un échantillon de dolomie, (b) même spectres après normalisation.

Fig. 5. (a) spectra of the patina and the fracture of a sample of dolomite, (b) same spectra after normalization.

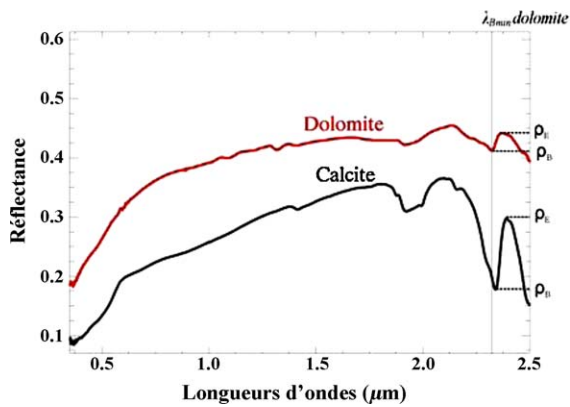


Fig. 6. Exemple de calcul de l'indice NDCI sur les deux spectres de réflectance de calcite et de dolomite.

Fig. 6. Example of calculating the NDCI index of two minerals: calcite and dolomite.

entre dolomite et calcite par une procédure automatique de recherche du minimum (fond de bande) et du maximum (épaule droite) sur l'intervalle 2,1–2,4 μm .

La procédure de calcul commence par rechercher la longueur d'onde $\lambda_{B\text{min}}$ du minimum réflectance ρ_B de la bande d'absorption du carbonate recherché et la longueur d'onde ($\lambda_{B\text{max}}$) de la réflectance ρ_E du maximum de réflexion à droite du minimum, dans l'intervalle de la longueur d'onde compris entre 2,1 et 2,4 μm (Fig. 6).

Lorsque cette succession de réflexions minimum ρ_B et maximum ρ_E est trouvée dans le bon ordre, à moins de 10 nm de distance et avec un écart en intensité suffisant, la profondeur de la bande d'absorption est calculée à l'aide l'équation suivante :

$$\text{NDCI} = \frac{\rho_E - \rho_B}{\rho_E + \rho_B}$$

L'écart moyen en longueur d'onde entre maximum et minimum de réflectance étant le plus souvent de 5 nm, seules les données de télédétection hyperspectrale, de résolution spectrale suffisante, permettent de détecter correctement la position exacte de ces deux paramètres. Si l'interpolation peut permettre cette détection à 10 nm de résolution (Van der Meer, 1995), une résolution au moins égale à 5 nm semble requise.

4. Résultats et discussions

4.1. Étude des patines de dissolution

La patine des carbonates est surtout marquée par des figures de dissolution qui changent les propriétés de microrugosité de surface, accentuant ainsi la diffusion de la lumière et rendant la roche plus claire. La normalisation à un spectre (spectre filtré) construit par l'application d'un filtre passe-bas corrige cet effet de diffusion de surface et permet la superposition presque parfaite des spectres de la patine et de la cassure (Roy et al., 2009) (Fig. 5). L'efficacité de cette superposition indique que l'accumulation de matériel non dissous est faible, non détectable, et que l'altération géochimique du faciès y est tout aussi faible.

Les bandes d'absorption détectées aux alentours de 1 μm reflètent la présence de très fines croûtes d'oxydes de fer, liées à la circulation des eaux météoriques. C'est un phénomène courant dans la coupe d'Arigh Ouzla.

4.2. Analyse des formes générales des spectres normalisés et bandes d'absorption principales

De façon générale, en faisant abstraction des bandes H_2O à 1,4 μm et 1,9 μm (liées à la présence de l'eau interstitielle et, par ailleurs, inexploitable en télédétection aéroportée à cause de l'opacité de la vapeur d'eau à 1,4 μm et 1,9 μm), les spectres de réflexion croissent régulièrement en intensité de 0,4 à 1,4 μm selon deux modes (Fig. 7). Le premier présente une forme convexe de type logarithmique, avec asymptote entre 1,4 et 1,9 μm , alors que le second est une quasi ligne droite avec point d'inflexion à 1,4 μm . La convexité des spectres sur cet intervalle de longueur d'onde semble caractéristique des carbonates observés sur leurs cassures fraîches (classe C Fig. 7). Sur les patines, la préservation de cette convexité est corrélée à la présence de bioclastes. L'aspect rectiligne trahit la présence de couvertures partielles en lichen ou micro-algues, attestée par une inflexion des spectres à 0,7 μm , en raison d'une présence de chlorophylle en très faible quantité. Celle-ci est plus abondante (classe V), lorsque cette couverture s'épaissit, mais disparaît lorsque les lichens meurent, pour ne plus être détectés que par des bandes d'absorption caractéristiques de la cellulose à 1,76, 2,09 et 2,20 μm . On peut remarquer que, malgré leur abondance, la signature des carbonates y reste visible tant que la couverture n'est pas complète (Fig. 7). Ce n'est qu'entre 2,1 μm et 2,5 μm , que nous trouvons une information minéralogique caractéristique des carbonates, essentiellement en raison de la présence de bandes d'absorption asymétrique de Mg et CaCO_3 à 2,32 μm pour la dolomite et à 2,34 μm pour la calcite. C'est pour cette raison que l'étude se focalise ensuite sur cet intervalle.

4.3. Analyse de la bande d'absorption principale des carbonates (entre 2,1 et 2,4 μm)

La position en longueur d'onde du maximum d'absorption des spectres de tous les faciès de la coupe d'Arigh Ouzla varie entre 2,319 et 2,323 μm (Fig. 2). Ils sont donc tous à dominance dolomitique. Dans l'optique de vérifier ces résultats, on a fait appel à l'utilisation d'une autre méthode semi-quantitative d'analyse au laboratoire, notamment la méthode d'analyse par diffraction des rayons X (DRX), qui nécessite au préalable la préparation des échantillons en poudre. L'échantillon AR14 est broyé dans un mortier en agate, jusqu'à l'obtention d'une poudre fine et homogène. La poudre est ensuite analysée par DRX et par le spectromètre ASD. Les résultats obtenus par DRX confirment l'abondance de la dolomite dans l'échantillon AR14 (Fig. 8). L'abondance de la dolomite est donnée en DRX par la surface des pics de diffraction, caractéristiques de ce minéral. Ce n'est pas le cas en spectrométrie, puisque la taille de grain change la profondeur des bandes d'absorption. L'information est cependant utile pour justement étudier ces tailles de grain.

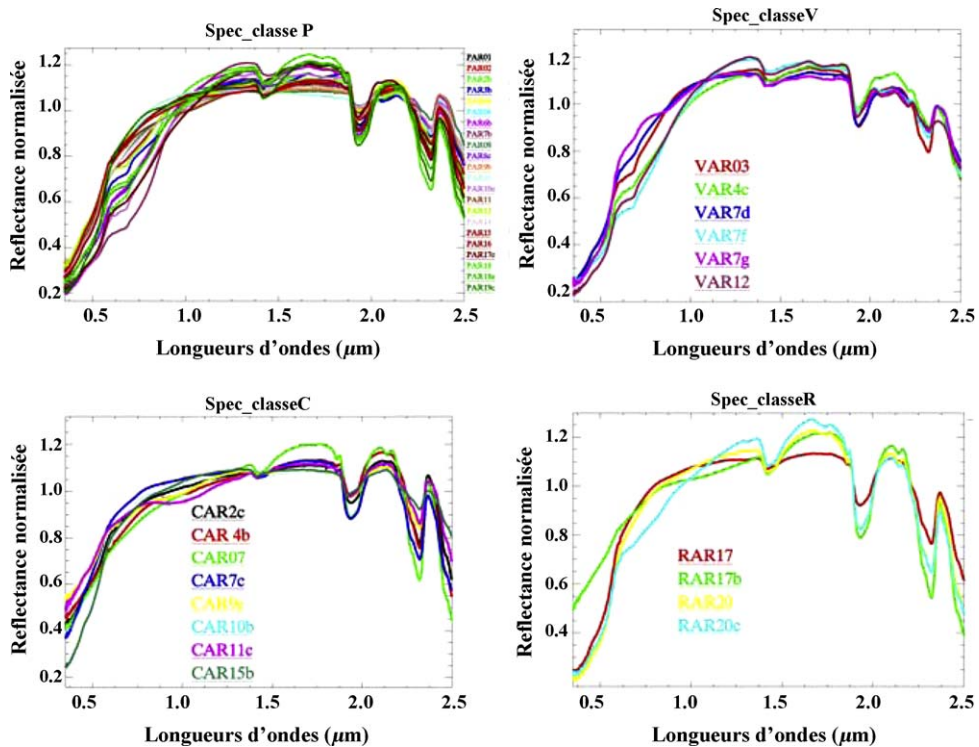


Fig. 7. Les spectres de réflectance dans le visible et le proche infrarouge de différentes lithologies de la coupe d'Arigh Ouzla : pour les classes patine (P), lichens (V), cassure (C) et Placage (R).

Fig. 7. Visible and near-infrared reflectance spectra of different lithologies of the Arigh Ouzla section: for different classes patina (P), lichen (V), crack (C), facing (R).

L'indice NDCI montre une évolution verticale indépendante de la position du centre de la bande d'absorption (Fig. 2) ; il varie entre 0,041 et 0,175, avec une moyenne de 0,108. Cependant, une bonne corrélation avec la texture de faciès et l'état de cristallinité des minéraux est observée. Deux groupes de faciès peuvent être dégagés : (i) cristallin, à histogramme clair avec des valeurs de NDCI supérieures à

la moyenne et (ii) micritique, à histogramme sombre et valeurs de NDCI inférieures à la moyenne (Fig. 2 et 9).

La Fig. 9 montre que les spectres des deux groupes dans l'intervalle de la longueur d'onde de 1 à 2,5 μm . Cet intervalle est choisi pour éliminer les variations provenant des encroûtements d'oxydes de fer déposés par l'eau de ruissellement et des accumulations de matière organique,

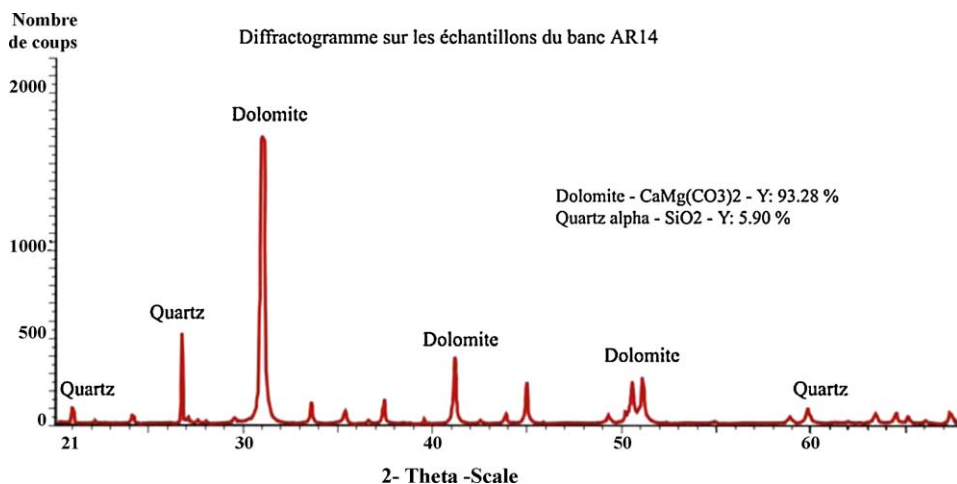


Fig. 8. Résultat de l'analyse minéralogique du faciès AR14 obtenu par la méthode de diffraction des rayons X.

Fig. 8. Result of mineralogical analysis of faciès AR14 obtained by the method of X-ray diffraction.

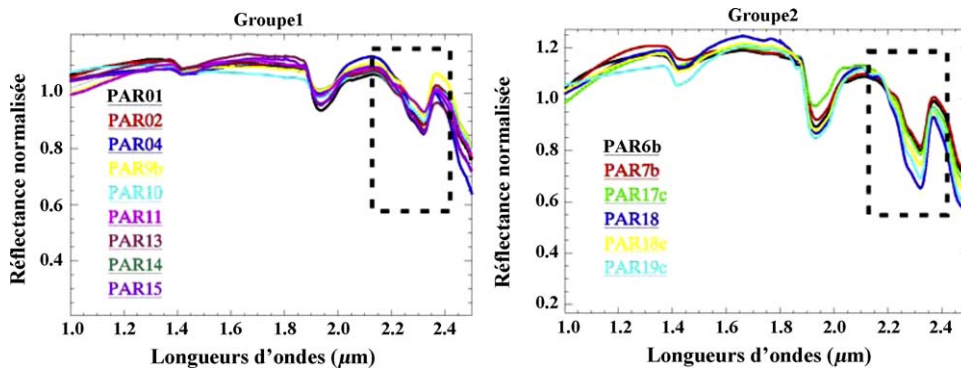


Fig. 9. Spectres normalisés des deux groupes de faciès : 1 et 2.

Fig. 9. The normalized spectra of two facies groups: 1 and 2.

sans relation avec la diagenèse des roches. La normalisation sert ensuite à annuler les variations de rugosité de surface, liées aux processus de dissolution des carbonates. Le groupe 1 montre alors en général des spectres normalisés ayant une enveloppe (ou continuum) plate décrivant un palier caractérisant les faciès de la moitié inférieure de l'unité des dolomies massives, ainsi que les faciès de l'unité des dolomies calcaires de la coupe d'Arigh Ouzla. Les spectres normalisés du groupe 2 présentent un continuum d'allure convexe, caractéristique des faciès de la moitié supérieure des dolomies massives et de l'unité des dolomies cristallines du sommet de la coupe d'Arigh Ouzla. Cette distinction se complète par la présence de bandes d'absorption de carbonates, de profondeurs plus prononcées dans le groupe 2 que dans le groupe 1 (Fig. 9, encadré). L'augmentation de taille des grains augmente donc bien la profondeur des bandes d'absorption comme attendu (Clark et al., 1990 ; Cooper et Mustard, 1999 ; Ghrefat et al., 2007), mais elle s'accompagne aussi d'une courbure du continuum entre 1 et 2,5 μm , sans qu'il soit nécessaire de faire appel à une autre minéralogie pour expliquer cette courbure (Fig. 9).

5. Conclusions et perspectives

La diversité des phénomènes d'altération perturbe l'observation des carbonates. Leur prise en compte et leur séparation, par : (i) normalisation de retrait des effets superficiels de dissolution ; et (ii) restriction de la fenêtre spectrale d'étude, pour éviter la superposition d'informations provenant de circulation d'eau sans rapport avec la formation des faciès, permettent d'arriver à distinguer entre eux les principaux faciès de la coupe d'Arigh Ouzla.

Les bandes d'absorption caractéristiques des carbonates varient entre 2,319 et 2,323 μm et ne changent pas entre surfaces de dissolution et cassures fraîches. Ces valeurs reflètent le caractère totalement dolomitique et permettent d'estimer le degré de diagenèse. L'apport de la spectrométrie apporte ainsi des précisions par rapport aux descriptions pétrographiques et sédimentologiques précédentes (Bouaouda, 2006 ; Bouaouda et al., 2007 ; Du Dresnay, 1988 ; Peybernès et al., 1987).

L'analyse des spectres a montré qu'une relation entre degré de cristallinité et profondeur de la bande d'absorption pouvait être établie. De telles conclusions ont déjà été vérifiées dans d'autres régions du monde (Clark et Roush, 1984 ; Gaffey, 1986 ; Hunt et Salisbury, 1970), mais pas sur des échantillons bruts dans leur état naturel d'affleurement. En plus de l'étude classique des bandes d'absorption, nous avons montré que la texture des carbonates se traduisait aussi par une composante pétrologique non négligeable du continuum qui peut ainsi être utilisé pour confirmer la détermination relative de la taille de grain. La mise à disposition de plates-formes aéroportées avec des résolutions spectrales de 5 nm devrait bientôt permettre de réaliser ce type d'étude.

Remerciement

Ce travail est réalisé dans le cadre du programme Volubilis, Action Intégrée n° MA/07/171.

Références

- Adams, E.A., Ager, D.V., Harding, A.G., 1980. Géologie de la région d'Imouzzer des Ida ou Tanane (Haut-Atlas occidental). Notes Mem. Serv. Geol. Maroc 41, 59–80.
- Amrhar, M., 1995. Tectonique et inversions géodynamiques post-rift dans le Haut Atlas occidental : structures, instabilités tectoniques et magmatisme liés à l'ouverture de l'Atlantique central et à la collision Afrique–Europe. Thèse d'État, Univ. Cadi Ayyad, Maroc, pp. 253.
- Asrar, G., Myneni, R.B., Kanemasu, E.T., 1989. Estimation of plant canopy attributes from spectral reflectance measurements. Chapter 7. In: Asrar, G. (Ed.), Theory and applications of optical remote sensing. Wiley Publishers, New York, pp. 252–296.
- Baret, F., Guyot, G., 1991. Potentials and limits to vegetation indices for LAI and APAR assessments. Remote Sensing of Environment 35, 161–173.
- Bouaouda, M.S., 2006. Découverte de *Thyrsoporella pseudoperplexa* Granier & Braik, 2002 (algue dasycladale) dans le Kimméridgien inférieur du Bassin d'Essaouira (marge atlantique marocaine). Rev. Micropal. 49 (1), 1–10.
- Bouaouda, M.S., Barattolo, F., Kharrim, M.R., El Kamar, A., 2007. Distribution of *Megaporella boulangeri* Deloffre and Beun, 1986, (dasycladale alga) in the Jurassic of the Moroccan Atlantic basin. Rev. Micropal. 47, 13–27.
- Clark, R.N., 1999. In: Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. Manual of remote sensing, New York, pp. 3–58.
- Clark, R.N., Roush, T.L., 1984. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. J. Geophys. Res. 89, 6329–6340.

- Clark, R.N., King, T.V., Kleijwa, M., Swayze, G.A., Vergo, N., 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *J. Geophys. Res.* 91, 12653–12680.
- Cooper, C.D., Mustard, J.F., 1999. Effects of very fine particle size on reflectance spectra of smectite and palagonitic soil. *Icarus* 142 (2), 557–570.
- Crowley, J.K., 1986. Visible and near-infrared spectra of carbonate rocks: reflectance variations related to petrographic texture and impurities. *J. Geophys. Res.* 91, 5001–5012.
- Crowley, J.K., 1991. Visible and near-infrared (0.4–2.5 μm) reflectance spectra of playa evaporate minerals. *J. Geophys. Res.* 96, 16231–16240.
- DeFries, R.S., Townshend, J.R.G., 1994. NDVI-derived land cover classifications at a global scale. *International Journal of Remote Sensing* 15, 3567–3586.
- Du Dresnay, R., 1988. Répartition des dépôts carbonatés du Lias inférieur et moyen le long de la côte atlantique du Maroc : conséquences sur la paléogéographie de l'Atlantique naissant. *J. Afr. Earth Sci.* 7 (2), 385–396.
- Duffaud, F., Brun, L., Planchut, B., 1966. Le bassin du Sud-Ouest marocain. In: Reyre, D. (Ed.), Bassins sédimentaires du littoral africain, 1^{re} partie. Assoc. Serv. Geol. Africains 5–12.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture "classification of carbonate rocks" (W.E. Ham, Ed.). *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.* 1, 108–121.
- Friedl, M.A., Davis, F.W., Michaelsen, J., Moritz, M.A., 1995. Scaling and uncertainty in the relationship between the NDVI and land surface biophysical variables: an analysis using a scene simulation model and data from FIFE. *Remote Sens. Environ.* 54, 233–246.
- Gaffey, S., 1986. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35–2.55 microns): calcite, aragonite, and dolomite. *Am. Miner.* 71 (1–2), 151–162.
- Ghrefat, H.A., Goodell, P.C., Hubbard, B.E., Langford, R.P., Aldouri, R.E., 2007. Modeling grain-size variations of aeolian gypsum deposits at White Sands, New Mexico, using AVIRIS imagery. *Geomorphology* 88 (1–2), 57–68.
- Hunt, G.R., 1970. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near-infrared. *Geophysics* 42, 501–513.
- Hunt, G.R., Salisbury, J.W., 1970. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. I. Silicate minerals. II. Carbonates. *Modern Geol.* 1, 283–300.
- Labbassi, K., 1998. Subsidence et évolution thermique du bassin d'El Jadida-Agadir : implications géodynamiques dans le cadre de la cinématique de l'Atlantique, Thèse d'État, Univ. Chouaib Doukkali, El Jadida. Maroc, 207 p.
- Labbassi, K., Medina, F., Rimi, A., Mustaphi, H., Bouatmani, R., 2000. Subsidence history of the Essaouira basin (Morocco). In: Crasquin-Soleau, S., Barrier, E. (Eds.), Peri-Tethys Memoir 5: New data on Peri-Tethyan sedimentary basins. *Mémoire du Muséum national d'Histoire naturelle*, Paris, (182), pp. 129–142.
- Lagacherie, P., Baret, F., Feret, J.B., Netto, J.M., Masson, J.M.R., 2008. Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements. *Remote Sens. Environ.* 112, 825–835.
- Medina, F., 1994. Évolution structurale du Haut Atlas occidental et des régions voisines du Trias à l'Actuel, dans le cadre de l'ouverture de l'Atlantique central et de la collision E. A. Afrique-Europe, Thèse d'État, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, pp. 272.
- Peybernès, B., Bouaouda, M.S., Alméras, Y., Ruget, C., Cuny, P., 1987. Stratigraphie du Lias et du Dogger du bassin côtier d'Essaouira (Maroc) avant et pendant le début de l'expansion océanique dans l'Atlantique central. Comparaison avec le bassin d'Agadir. *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 305, 1449–1455.
- Roch, E., 1950. Histoire stratigraphique du Maroc. *Notes Mem. Serv. Geol. Maroc* 80, 1–435.
- Roy, R., Launeau, P., Carrère, V., Pinet, P., Ceuleneer, G., Clénet, H., Daydou, Y., Girardeau, J., Amri, I., 2009. Geological mapping strategy using visible near-infrared-hortwave infrared hyperspectral remote sensing: application to the Oman ophiolite (Sumail Massif). *Geochim. Geophys. Geosyst.* 10, Q02004 (doi:10.1029/2008GC002154).
- Salisbury, J.W., Eastes, J.W., 1985. The effect of particle size and porosity on spectral contrast in the mid-infrared. *Icarus* 64 (3), 586–588.
- Van der Meer, F., 1995. Spectral reflectance of carbonate mineral mixture and bidirectional reflectance theory: quantitative analysis techniques for application in remote sensing. *Rem. Sens. Rev.* 13, 67–94.
- Van der Meer, F., 1996. Spectral mixture modelling and spectral stratigraphy in carbonate lithofacies mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sens.* 51, 150–162.
- Van der Meer, F., 1997. Classification of remotely-sensed imagery using an indicator kriging approach: application to the problem of calcite-dolomite mineral mapping. *Int. J. Remote Sens.* 1–17.
- Wang, Q., Tenhunen, J., Granier, A., Reichstein, M., Bouriaud, O., Nguyen, D., et al., 2004. Long-term variations in leaf area index and light extinction in a *Fagus sylvatica* stand as estimated from global radiation profiles. *Theoretical and Applied Climatology* 79, 225–238.