

Société
Géologique du
Nord

ANNALES

Tome 11 (2^{ème} série), Fascicule 1
parution 2004

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

Extraits des Statuts

Article 2

- Cette Société a pour objet de concourir à l'avancement de la géologie en général, et particulièrement de la géologie de la région du Nord de la France.
- La Société se réunit de droit une fois par mois, sauf pendant la période des vacances. Elle peut tenir des séances extraordinaires décidées par le Conseil d'Administration.
- La Société publie des Annales et des Mémoires. Ces publications sont mises en vente selon un tarif établi par le Conseil. Les Sociétaires bénéficient d'un tarif préférentiel (1).

Article 5

Le nombre des membres de la Société est illimité. Pour faire partie de la Société, il faut s'être fait présenter dans l'une des séances par deux membres de la Société qui auront signé la présentation, et avoir été proclamé membre au cours de la séance suivante.

Extraits du Règlement Intérieur

§ 7. - Les Annales et leur supplément constituent le compte rendu des séances.

§ 13. - Seuls les membres ayant acquitté leurs cotisations et abonnement de l'année peuvent publier dans les Annales. L'ensemble des notes présentées au cours d'une même année, par un auteur, ne peut dépasser le total de 8 pages, 1 planche simili étant comptée pour 2 p. 1/2 de texte.

Le Conseil peut, par décision spéciale, autoriser la publication de notes plus longues.

§ 17. - Les notes et mémoires originaux (texte et illustration) communiqués à la Société et destinés aux Annales doivent être remis au Secrétariat le jour même de leur présentation. A défaut de remise dans ce délai, ces communications prennent rang dans une publication postérieure.

§ 18. - Les Mémoires sont publiés par fascicule après décision du Conseil.

Avertissement

La Société Géologique du Nord ne peut en aucun cas être tenue pour responsable des actes ou des opinions de ses membres.

Tirages à part

Conformément au paragraphe 14 du Règlement Intérieur (Tome LXXXI, p. 12), les tirages à part sont à la charge des auteurs qui doivent en faire par écrit la déclaration expresse du bon à tirer.

Cotisations et Abonnements (à la date du 1/1/2001)

	QUALITÉ	COTISATION	ABONNEMENT aux Annales	TOTAL
FRANCE et C.E.E.	Personnes physiques (2) (3)	7,62 €	25,92 € T.T.C.	33,54 €
AUTRES PAYS	Personnes physiques	7,62 €	28,98 € T.T.C.	36,60 €

Abonnement des non-membres : FRANCE et C.E.E. : 55,60 € H.T. — ÉTRANGER : 64,00 €

ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

La vente des Annales s'effectue par tomes entières aux prix suivants. Exceptionnellement, et jusqu'à épuisement du stock, certains fascicules sont en vente séparément.

Tomes I à LXXIX (manquent I, II, V à IX, XVI, XXII, XXXIV à XXXVI, XXXIX à XLIII, XLV, XLVII à LVIII).....	30,50 € H.T.
Tomes LXXX à XCV (manque XCI).....	41,20 € H.T.
Tomes XCVI à CV.....	50,30 € H.T.
Tome CVI.....	58,70 € H.T.

TABLES GÉNÉRALES DES ANNALES

Table 1 (Tomes I à XX) - Table 2 (Tomes XX à XXX) - Table 3 (Tomes XXXI à XL) - Table 4 (Tomes XLI à LXXIX)	7,65 € H.T.
Table 5 (Tomes LXXX à CIX).....	par table

Esquisse géologique du Nord de la France, par J. GOSSELET, Fascicule IV (Terrains quaternaires).....	4,40 € H.T.
Ecorché géologique infra mésozoïque (extrait de "Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France", présentée par C.F.P. (M), COPESEP et S.N.P.A.).....	7,65 € H.T.

FASCICULES SPÉCIAUX

"Géologie du Nord de la France" (T. LXXXIX, fasc. 1).....	13,00 € H.T.
"Rupture des roches et massifs rocheux" (T. XCV, fasc. 3).....	10,65 € H.T.
"Données nouvelles sur le Paléozoïque de l'Europe occidentale" (T. XCVI, fasc. 4 et T. XCVII, fasc. 1).....	30,50 € H.T.
"Apports récents à la Géologie du Gondwana" (T. XCVII, fasc. 4).....	23,00 € H.T.
"Géologie de l'Europe, du Précambrien aux bassins sédimentaires post-hercyniens" (T. XCIX, fasc. 1).....	23,00 € H.T.
"Géologie appliquée aux problèmes d'énergie et de matières premières" (T. CII, fasc. 2).....	23,00 € H.T.
"Tectonique cassante en distension et coulissement" (T. CIII, fasc. 2-3).....	38,10 € H.T.
"Aspect de la Géologie de l'Ardenne, hommage au Professeur Beugnies" (T. CV, fasc. 2).....	19,00 € H.T.
"Paléozoïque supérieur continental" (T. CVI, fasc. 2).....	45,75 € H.T.
"Actualisation de quelques thèmes géologiques" (T. CVI, fasc. 4).....	19,00 € H.T.
"Géologie et aménagement régional" (T. CIX, fasc. 2).....	38,10 € T.T.C.
"Le Nord et son environnement géologique." (T. 2, 2 ^{me} série, fasc. 1).....	26,70 € H.T.

(1) Modification adoptée lors de l'Assemblée Générale du 10 janvier 1974.

(2) Les étudiants qui en font la demande annuelle peuvent, par décision du Conseil, bénéficier d'un tarif préférentiel sur l'abonnement (12,20 €), soit un total de 19,85 €.

(3) Les membres de l'APBG peuvent bénéficier d'un tarif préférentiel sur l'abonnement (18,30 €), soit un total de 25,95 €.

Société
Géologique du
Nord

ANNALES

Tome 11 (2^{ème} série), Fascicule 1
parution 2004

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

CONSEIL D'ADMINISTRATION

— 2004 —

<i>Président</i>	M. N. TRIBOVILLARD
<i>Premier Vice-Président</i>	M. A. BLIECK
<i>Seconds Vice-Présidents</i>	M. F. ROBAZYNSKI
	M. O. AVERBUCH
<i>Conseillers</i>	M. F. AMEDRO
	M ^{me} B. VANVLIET-LANOE
	M ^{me} S. BECKARY
	M ^{me} C. DERYCK
	M. J-L. MANSY
	M. B. MISTIAEN
<i>Secrétaires</i>	M ^{lle} C. CRONIER
	M. A. GAUTHIER
<i>Trésorier</i>	M. J.M. DÉGARDIN
<i>Déléguée aux Publications</i>	M ^{mc} Paule CORSIN
<i>Bibliothécaire</i>	M. A. TRENTESAUX

CONSEIL SCIENTIFIQUE

— 2004 —

MM. W. CHRISTENSEN (Copenhague), A. DELMER (Bruxelles), W. KUNHT (Kiel),
B. PEYBERNES (Toulouse), M. PRICE (Reading) et H. ZIJLSTRA (Utrecht).

CONSEIL ÉDITORIAL

— 2004 —

MM. A. BLIECK, J.F. DECONINCK, J. FERRIÈRE, B. MISTIAEN et J. SOMMÉ
M^{mc} Ch. VINCHON.

ANALYSE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DU PISE DANS LES REMPARTS DE MARRAKECH. MARRAKECH, MAROC.

Geological and geotechnical analysis of the Pise on the ramparts of Marrakesh. Marrakesh, Morocco.

par M. IBNOUSSINA (*), F. CHERRADI(**), O. WITAM(*), Z. SEKKAT(***) et M. AYEB(***)

Résumé. — Marrakech, ville impériale, dont l'enceinte fut construite au douzième siècle, remonte à la période almoravide (1061-1147).

Riche en histoire et en patrimoine, elle est inscrite, depuis 1985, sur la liste du patrimoine mondial. Son classement marque le début d'une politique d'intervention et de restauration motivée par l'état dégradé de ses monuments, et plus particulièrement ses remparts construits en pisé de terre.

L'identification des matériaux de ces édifices est basée sur les analyses chimiques, pétrographiques, granulométriques et sur les essais géotechniques. Les résultats obtenus constitueront les éléments d'un projet de réparation des « pathologie » dont ils souffrent.

L'origine des matériaux ayant servi pour la construction de ces édifices est dictée par la présence de deux tendances lithologiques différentes :

- Une tendance nord dans la quelle dominant des matériaux calcaireux terrigènes à fragments de schistes et nodules de calcaires attribués aux dépôts encroûtés quaternaires
- Une tendance sud avec surtout prédominance des matériaux argilo-conglomératiques d'âge Permo-triasique.

La détermination de l'origine des matériaux servira de base pour d'éventuelles réparations et réfections de ces édifices.

Abstract. — Marrakesh, the imperial city built in the 12th century, dates back to the Almoravid period (1061 – 1147).

Rich in history and patrimony, Marrakesh is included in the world patrimony since 1985. This classification marks the beginning of a policy of intervention and restoration motivated by a state deprived of its monuments, particularly its ramparts built with adobe.

The identification of the materials of these edifices is based on the chemical, petrographical, granulometrical analyses and the geotechnical tests. The obtained results will form the elements of a restoration project of the pathologies from which suffers this patrimony.

The origin of the materials used in the construction of these edifices is marked by the presence of two different lithological tendencies :

A north tendency in which dominate some calcareous materials with fragments of schist and calcareous nodules attributed to the crusted quaternary deposits.

A south tendency with the predominance of some clayey conglomeratical materials from the Permo-triassic age.

The determination of the origin of the materials will be useful to some eventual reparations and repairs of these edifices.

I. — INTRODUCTION

La terre est une ressource naturelle locale, elle a toujours été l'un des principaux matériaux de construction utilisés par l'Homme depuis des millénaires.

Les Almoravides (1061-1147) ont utilisé le pisé de terre pour ériger les remparts. Ces édifices ont subi des agressions dues à l'assaut du temps.

La caractérisation géologique des matériaux, du pisé, utilisés dans la construction de ces remparts, servira de base pour d'éventuelles restaurations afin que ces fortifications retrouvent leur état initial d'équilibre.

La nécessité d'une telle étude alliant à la fois, la connaissance de la géologie à celle de la pathologie, permet de proposer un projet de restauration afin de remédier aux processus de dégradation.

(*) Laboratoire de stratigraphie, département de géologie, faculté des sciences Semlalia. BP 2390, Marrakech. E-mail : ibnoussina@ucam.ac.ma, witam@ucam.ac.ma

(**) Inspection des monuments historiques, Marrakech.

(***) Laboratoire d'Expertise, d'Etudes et d'Essais (L3E). Quartier Marrakech. Marrakech.

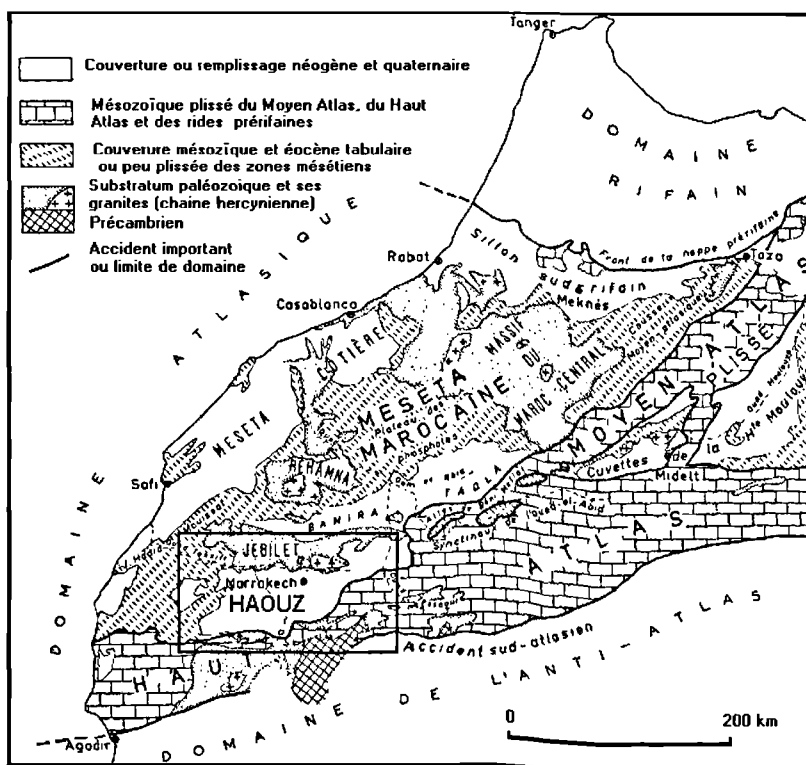


Fig. 1. — Répartition des terrains géologiques aux alentours de la ville de Marrakech (D'après Choubert et Marçais, 1952).

Fig. 1. — Distribution of the geological fields in the vicinity of the Marrakech city (Adapted from Choubert and Marçais, 1952).

* II. — CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

1) Cadre géographique

Marrakech fait partie de la vaste dépression qu'est la plaine du Haouz (fig. 1). Cette dépression fermée, large de 40 km, s'étire d'Est en Ouest sur plus de 150 km. Elle est limitée au Nord par les Chaînons des Jbilet dont les collines ne dépassent guère 1000m d'altitude et au Sud par les versants du Haut Atlas qui, culminent à 4165 m (Jbel Toubkal).

La plaine est bordée à l'Est par les premiers contreforts du Moyen Atlas et à l'Ouest par le bassin d'Essaouira-Chichaoua.

C'est une dépression tectonique de bordure de chaîne (Dutour et Ferrandini, 1985) dans laquelle le socle paléozoïque émerge localement pour former les massifs du Jbel Guéliz et de Guemassa.

2) Cadre géologique

La morphologie de la plaine du Haouz est due non seulement aux événements tectoniques mais aussi à la nature lithologique hétérogène de ses faciès. Au niveau de cette zone, le socle schisteux primaire, est recouvert par des formations triasiques, crétacées et éocènes qui sont antérieures aux premiers mouvements atlasiques. Ensuite, viennent s'accumuler au Néogène et au Quaternaire, des formations alluviales constituées de galets, de graviers et de sable plus ou moins grossier.

La surrection du Haut Atlas sous l'effet de l'orogénèse tertiaire s'est accompagnée d'une légère subsidence de cette plaine, où se sont accumulées les formations détritiques continentales issues du démantèlement de la chaîne atlasique, depuis l'Eocène jusqu'à l'actuel (Dutour et Ferrandini, 1985).

Une étude cartographique et pédologique réalisée par la direction de l'agriculture du commerce et des forêts (Bryssine, 1951) dans la plaine du Haouz révèle l'existence de quatre types de sols, présentant des textures limono-argileuse, limoneuse ou limono-sableuse.

Les termes carbonatés des environs de Marrakech correspondent à des sédiments quaternaires lacustres et palustres.

III. — APERCU HISTORIQUE

L'histoire de Marrakech commence en 1062, lorsque le Saharien almoravide Abou Bckr, à la tête d'une puissante armée, pénétra dans la plaine du Haouz, aux pieds du Haut Atlas. Il établit son campement à proximité d'une butte rocheuse du Guéliz, susceptible de fournir les pierres nécessaires à l'édification de sa future ville.

La vieille ville fut fondée par Youssef Ben Tachfine, en 1070 (Brignon *et al.*, 1967). Souverain de la dynastie almoravide, il entreprit d'en faire sa capitale. Sous son règne, les constructions en pisé se substituèrent aux tentes sahariennes. Après sa mort, son fils Ali Ben Youssef devint l'un des plus grands souverains du Maroc. Il dresse les

remparts en 1126 ainsi que sept somptueuses portes et alimente la ville en eau grâce à un système de Khettara. Ce système traditionnel, consiste en un creusement de galeries souterraines aménagées pour assurer le drainage de l'eau, de la nappe vers la surface (Pascon, 1977).

IV. — ETUDE DES REMPARTS

1) Description

Les remparts de Marrakech forment une imposante enceinte en pisé d'argile et de chaux. Haute de 7 à 10 m, la muraille est percée d'une dizaine de portes monumentales permettant l'accès à la médina.

Ce mur d'enceinte élevé au début du XII^e siècle, fut élargi lors des agrandissements successifs de la médina, à la fin du XII^e siècle, puis au XVII^e siècle.

Il s'étend sur une longueur de 15 km avec une épaisseur moyenne de 0,60 m, et peut atteindre par endroits 2m. Ces murailles se caractérisent par un grand nombre (202) de tours carrées (Borj) reliées entre elles par un chemin de ronde de 0,60 m de largeur, et quelques tours à cinq ou à six côtés (Sqala). Ces tours sont des structures de garde et ont un rôle de défense.

2) Les matériaux utilisés dans la construction

La construction de ces remparts a été réalisée à partir des matériaux traditionnels de l'époque, à savoir la brique de terre cuite, le pisé et les schistes du Jbel Guéliz. Une grande partie des édifices de l'époque almoravide utilisèrent les ressources naturelles des montagnes situées à proximité. L'argile riche en fer, est à l'origine des colorations ocre et rouges des matériaux de construction de ces célèbres remparts.

Un enduit à base d'argile et de chaux recouvre les parements de ces murailles, comme nous pouvons l'observer encore sur les murs d'enceintes de la plupart des médinas du Maroc (Fès, Rabat, Salé, Meknès, Taroudant,...). Dans ces médinas, les matériaux de construction et les techniques d'appareillage présentent des caractéristiques semblables.

Dans certains endroits, les enduits sont presque intacts et même très durs à détacher. Ces enduits ont fait preuve de durabilité durant neuf siècles d'existence, d'où la légitimité du choix.

Sur le terrain, l'identification des matériaux de construction de ces édifices montre que, selon l'orientation de la muraille, la terre utilisée présente deux tendances lithologiques différentes :

a) Muraille nord (enceinte de la vieille médina)

Le matériau, essentiellement calcaire, présente une granulométrie grossière. Il est constitué de nodules de calcaire (calcrètes), de schistes, de fragments de briques de terre cuites et de fragments de charbon. On note aussi la présence d'une faible proportion de carbonate de chaux utilisé comme stabilisant.

b) Muraille sud (enceinte du jardin d'Agdal)

Alluvions à dominance de roches basiques (rhyolites, diorites, andésites...) de la plaine quaternaire.

V. — IDENTIFICATION DES MATERIAUX DU PISE

L'identification des matériaux a été faite à partir d'échantillons de pisé soigneusement prélevés dans plusieurs localités de la muraille. Une cinquantaine d'échantillons ont été analysés mais ne sont présentés, dans cette note, que deux échantillons représentatifs de l'ensemble (E11 et F2).

Les analyses chimiques, pétrographiques, granulométriques et les essais géotechniques effectués sur ces deux échantillons nous permettent de les caractériser et de les classer.

1) Analyses chimiques

Les analyses chimiques ont porté sur deux principaux composants à savoir : le carbonate de chaux et la matière organique (fig. 2). Elles ont été réalisées dans le but d'identifier les matériaux et d'estimer le taux de stabilisant utilisé dans l'édification de ces bâtis historiques anciens.

a) Analyse du carbonate de chaux

La terre étant le matériau de base utilisé dans la construction des remparts, les argiles sont ses principaux liants. Elle présente l'inconvénient majeur qu'est la rapide dégradation sous l'action des intempéries. Pour remédier à cette action, la terre est stabilisée par un supplément de chaux destiné à améliorer ses performances.

La méthode d'analyse utilisée pour la détermination du pourcentage du carbonate de chaux est la calcimétrie (Vatan, 1967). Elle consiste à introduire dans un erlenmeyer, une fraction de 0,50 à 1g de l'échantillon broyé et un petit tube à essai contenant de l'acide chlorhydrique à 30%. L'erlenmeyer est ensuite bouché par un bouchon relié à un tube gradué, lui même relié à une ampoule par un tuyau en caoutchouc. Le liquide du tube doit être amené au même niveau que celui de l'ampoule, qui correspond au niveau initial (D1). L'acide chlorhydrique est ensuite renversé sur l'échantillon, cette attaque de l'échantillon se manifeste par un dégagement de CO₂. Pour activer la réaction, on agite l'erlenmeyer de temps en temps tout en gardant le liquide du tube au même niveau que celui de l'ampoule. A l'arrêt du dégagement de CO₂, Le liquide s'immobilise à un niveau D2 qui correspond à la fin de la réaction.

Le volume de CO₂ dégagé est donné par la formule $V = D2 - D1$, qui doit être multiplié par un coefficient de correction pour avoir le pourcentage du carbonate de chaux.

L'échantillon E11 (muraille sud) présente un taux de carbonate de chaux de 11% par contre l'échantillon F2 (muraille nord) a un taux de 25%. L'état de dégradation très avancé de la muraille dans la localité E s'explique par le faible pourcentage de carbonate de chaux dans la terre ayant servi de pisé.

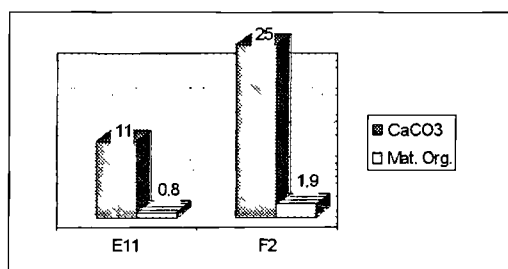


Fig. 2. — Pourcentages de la matière organique et du carbonate de chaux.

Fig. 2. — Percentages of the organic matter and the calcium carbonate.

Au niveau de la localité F, on constate une nette amélioration due à la richesse en carbonate et à l'état de compactage du matériau.

b) Analyse de la matière organique

La détermination du pourcentage de la matière organique a été réalisée par élimination de celle-ci à l'aide de l'eau oxygénée (Rivière, 1977). En effet, l'absorption par la fraction fine du matériau de cette matière organique, peut modifier profondément ses propriétés physiques. Elle peut neutraliser l'action du liant ou ralentir sa prise et abaisser la résistance du matériau stabilisé (Houben et Guillaud, 1989).

Une quantité suffisante de sédiment (10g pour un sédiment argileux, 50g ou plus pour un sédiment très sableux) est dispersée par agitation dans de l'eau distillée. On y ajoute ensuite 50 cm³ d'eau oxygénée à 10 volumes. L'action de l'eau oxygénée se traduit par la formation de mousse due au dégagement d'oxygène et la disparition progressive de la matière organique. Suivant la richesse en matière organique, on verse goutte à goutte et c'est la décoloration de la suspension et l'absence de dégagement de mousse qui indiquent la fin de la réaction. Le culot est ensuite rincé et séché à l'étuve, la masse restante permet de calculer le pourcentage de la matière organique contenue dans le matériau. L'attaque est en général très longue et demande 48 à 72 heures.

Sur les deux échantillons examinés, la quantité de matière organique varie de 0.8 % (E11) à 1,9 % (F2). Houben et Guillaud, (1989) proposent 2% comme teneur à ne pas dépasser dans le cas du pisé.

Le pourcentage de la matière organique détectée est très faible. Son absorption par la fraction fine du matériau, ne peut en aucun cas modifier les propriétés physiques des terres utilisées dans la construction des murailles. Ces propriétés peuvent être améliorées, par ajout de chaux comme stabilisant, et le risque de perturbation des échanges ioniques est minime voire même nul (Bernich, 2001).

2) Analyses pétrographiques

Nous avons prélevé des échantillons dans plusieurs localités de la muraille, l'étude minéralogique de ces échantillons appelle à quelques remarques :

Dans le tronçon sud de la muraille, la fraction grossière est composée principalement de galets (dolérite, rhyolite, microgranite, andésite, gabbro, basalte vacuolaire, basalte, quartz...), ils sont prélevés dans la plaine alluviale au Sud du jardin de l'Agdal (localité E). L'origine de ces galets est à chercher dans le massif précambrien de l'Ourika (Aarab, 1995).

La fraction fine est représentée surtout par des silts et des argiles. Dans cette fraction, le quartz devient de plus en plus abondant dans les tamis les plus fins pour lesquels le diamètre des mailles est inférieur à 80µm.

Dans la partie Nord de la muraille, la fraction grossière correspond à un mélange de calcrètes et de galets déjà mentionnés mélangés à de rares fragments de schistes du massif des Jbilet. Dans cette partie de la muraille, la fraction fine est plutôt limoneuse carbonatée. L'ensemble est issu probablement des croûtes calcaires quaternaires.

a) Echantillon E11

Limons argileuses légèrement graveleuses avec fragments de roches basiques (rhyolites, diorites, basaltes...). La fraction silteuse est très riche en fins minéraux ferromagnésiens et en fragments de chaux. Notons que le pourcentage des particules dont le diamètre (Ø) est supérieur à 80 µm est très important par rapport aux fines (particules dont le diamètre (Ø) est inférieur à 80 µm).

Microscopiquement, il s'agit d'un microconglomérat à fragments de roches de différentes natures (andésite, basalte,.....) avec une matrice argileuse.

Les détritons sont plus abondants que le ciment. La matrice est argileuse de couleur rouge brique à grains de quartz, de feldspath et oxydes noirs.

b) Echantillons F2

Il est composé d'une fraction grossière constituée de fragments de roches carbonatées d'aspect noduleux et de couleur saumon à laquelle sont associés des silts et des limons. Ces derniers ont une tendance ferromagnésienne, avec fragments de roches basiques (basalte, diorite...). On note une abondance de granulats basiques.

Au microscope polarisant, cet échantillon correspond à une micrite à texture mudstone.

De nature argilo-micritique, la matrice contient les éléments suivants :

- 5% de minuscules grains de quartz de taille comprise entre 50 et 250 µm.
- 1% de feldspaths plagioclases.
- 5% d'oxydes de fer.
- 10% de feldspaths altérés et de rares fragments de roches volcaniques (andésites) composées d'un fond oxydé noir et de microlites de feldspaths.

3) Analyses granulométriques

L'essai granulométrique a pour but de déterminer la répartition granulaire (Ngoc Lan et Barbaras, 1982) et de

comparer les différents échantillons analysés. Les résultats de l'essai permettent de tracer la courbe granulométrique sur un diagramme comportant en abscisse les dimensions des tamis, soit (20mm, 2mm, 0,2mm, 80µm, 20µm, 2µm), et en ordonnée les pourcentages des tamisats cumulés. Cet essai est effectué en deux phases :

a) *Granulométrie par tamisage*

La granulométrie par tamisage est effectuée sur la fraction granulaire dont le diamètre (\emptyset) est supérieur à 80µm.

Les échantillons étudiés sont tamisés sous courant d'eau, après immersion dans l'eau pendant 24h. Les refus sont séchés à l'étuve jusqu'à masse constante. Ensuite, on procède au pesage du refus de chaque tamis.

Le tableau I rend compte des proportions des différentes fractions granulaires des échantillons analysés.

Diamètre des particules	Graviers $\emptyset > 2$ (mm)	Sables grossiers $2 > \emptyset > 0.2$ (mm)	Sables fins $0.2 > \emptyset > 0.08$ (mm)	Silts et argiles $\emptyset < 0.08$ (mm)
Echantillon E11	23	29	27	21
Echantillon F2	37	12	8	43

Tabl. I. — Pourcentages cumulés d'éléments constituant les échantillons étudiés

Table I. — Cumulative percentages of elements constituting the studied samples.

b) *Granulométrie par sédimentométrie*

Cet essai complète le premier et permet de quantifier les fractions de particules dont le diamètre est inférieur à 80 µm et pour lesquelles le tamisage devient impossible.

Le principe de la sédimentation utilise la différence de chute des particules, dans une éprouvette de 2 litres d'eau distillée. Il consiste à laisser les particules en suspension se déposer au fond de l'éprouvette, selon leurs diamètres.

A l'aide d'un densimètre on mesure, régulièrement dans le temps et à hauteur donnée, la densité. Ces mesures permettent de calculer les proportions des particules de chaque diamètre.

Les proportions des différentes fractions granulaires des échantillons analysés sont consignées dans le tableau II.

Diamètre des particules	$\emptyset < 0.08$ (mm)	$80 < \emptyset < 20$ (µm)	$20 < \emptyset < 2$ (µm)	$\emptyset < 2$ (µm)
Echantillon E11	21	14	5	2
Echantillon F2	43	12	16	15

Tabl. II. — Pourcentage des fractions granulaires inférieures à 80 µm

Table II. — percentage of the granular fractions inferior to 80 µm

c) *Résultats des essais*

Le fuseau théorique CRATerre (Centre international de la construction en terre) préconisé par (Houben et Guillaud, 1989) pour le pisé, est présenté sur les graphiques (fig. 3 et fig. 4) afin de permettre la comparaison avec les courbes des deux échantillons étudiés. Ces graphiques illustrent la répartition détaillée selon les différents diamètres de particules de chaque échantillon.

La courbe de l'échantillon F2 s'inscrit presque entièrement dans le fuseau. Sa fraction supérieure à 10 mm ne l'est pas. La fraction inférieure à 2 µm ou argileuse disponible est suffisante pour assurer la cohésion des particules du matériau étudié. On constate une bonne répartition des constituants. Les graviers et les sables forment le squelette, les argiles en revanche assurent la cohésion du matériau.

La bonne répartition des constituants est due probablement au compactage par damage au moment de l'édification de ces murailles.

La courbe de l'échantillon E11, sort du fuseau au niveau de sa partie basale. En effet, la fraction inférieure à 80 µm est très faible et la fraction argileuse (< 2 µm) est de l'ordre de 2%. Ce pourcentage est très faible pour assurer la cohésion

des autres fractions. La très mauvaise répartition des différentes fractions augmentera les risques de désordre et de dégradations.

4) *Analyses géotechniques*

a) *Essai de plasticité ou limites d'Atterberg.*

Cet essai permet de prévoir le comportement des matériaux. Il est réalisé sur la fraction inférieure à 400 µm et consiste à faire varier le teneur en eau du matériau afin d'évaluer sa consistance (Costet et Sanglerat, 1981). L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque celle-ci et son contenu sont soumis à des chocs répétés.

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée est confectionné manuellement, se fissure.

Les limites d'Atterberg correspondent aux seuils de passage de l'état solide à l'état plastique (limite de plasticité L_p) et de l'état plastique à l'état liquide (limite de liquidité L_l). L'intervalle entre ces deux limites définit l'étendue du domaine de la plasticité (indice de plasticité I_p). Le tableau III, regroupe l'ensemble des résultats obtenus.

Sur l'abaque de plasticité de Casagrande (fig. 5), on constate que l'échantillon E11 ($I_p=11$) se place au dessus de la ligne A, dans la zone à argiles peu plastiques (A_p). L'échantillon F2 ($I_p=19$), par contre, se place au dessus de cette même ligne mais dans la zone à argiles moyennement plastiques (A_p - A_t).

Les deux échantillons sont placés de part et d'autre de la ligne de liquidité à 30%, qui sépare deux zones de plasticité différente, ce qui plaide en faveur des deux tendances lithologiques sus citées.

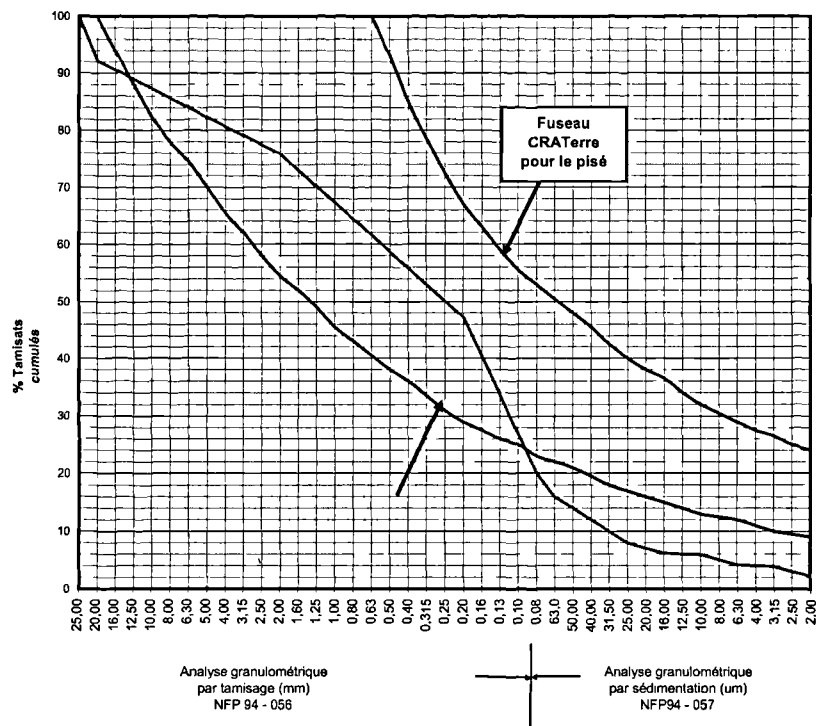


Fig. 3. — Courbe granulométrique de l'échantillon E11.

Fig. 3. — Grain size curve of the E11 sample

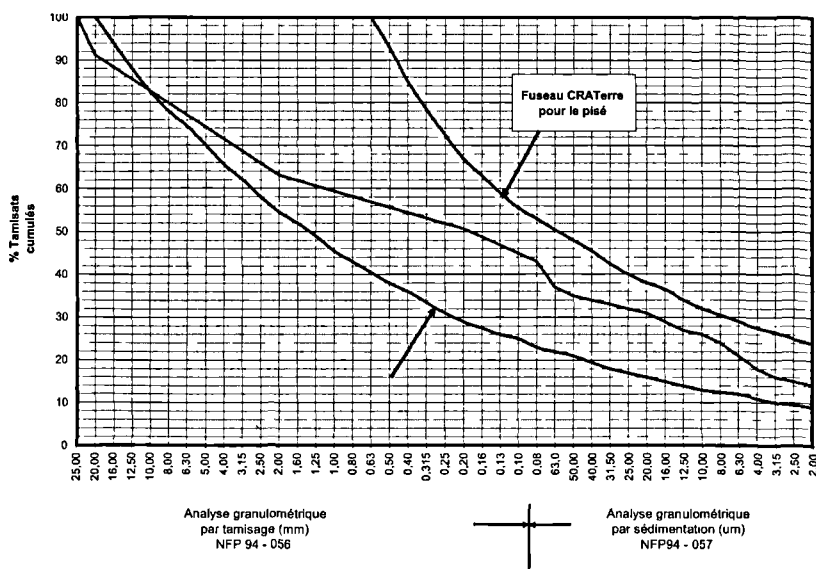


Fig. 4. — Courbe granulométrique de l'échantillon F2.

Fig. 4. — Grain size curve of the F2 sample

b) Essai au Bleu de Méthylène

Le but de cet essai est de caractériser la surface spécifique de la fraction argileuse d'un matériau et donc d'estimer ses activités physico-chimiques d'échanges interfaciaux. Le résultat de l'essai dépend directement de la nature et de la quantité de ces argiles dans le matériau, il nous renseigne sur

Echantillon	Limite de liquidité WL %	Limite de plasticité WP %	Indice de plasticité IP %
E11	28	17	11
F2	45	26	19

Tabl. III. — Plasticité des échantillons étudiés.

Table III. — Plasticity of the studied samples

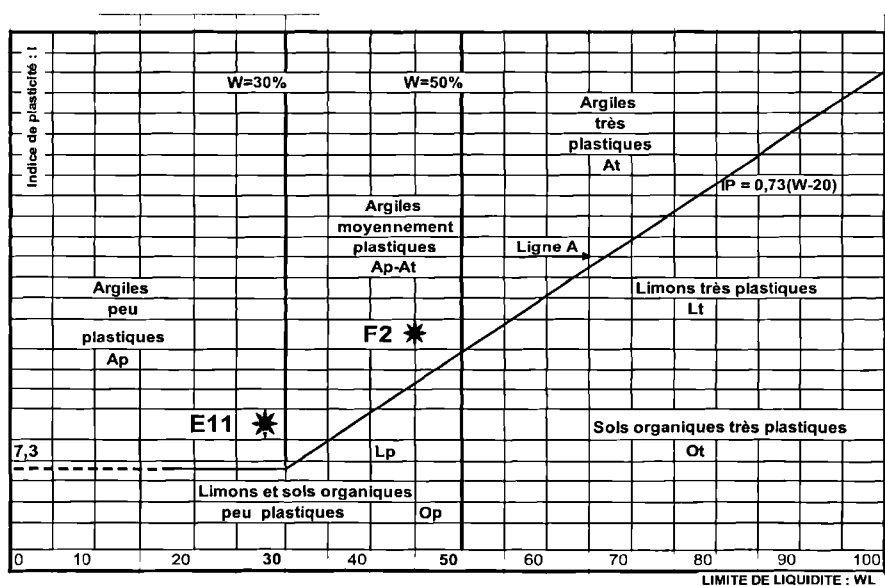


Fig. 5. — Abaque de plasticité de Casagrande (in Philipponnat, 1979).

Fig. 5. — Diagram of plasticity of Casagrande (in Philipponnat, 1979).

résultat de l'essai dépend directement de la nature et de la quantité de ces argiles dans le matériau, il nous renseigne sur la sensibilité de l'argile à l'eau et par conséquent sur ses propriétés de retrait gonflement.

L'essai s'effectue sur la fraction de particules de diamètre inférieur à 50 μm . IL consiste à mesurer, par dosage, la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par un matériau mis en suspension dans l'eau et sous agitation permanente.

La méthode consiste en une injection, dans le bain aqueux contenant la prise d'essai, de doses élémentaires de 5 cm^3 d'une solution de bleu de méthylène. L'adsorption du bleu est contrôlée 1 minute après chaque ajout, en effectuant une tâche à l'aide d'une baguette de verre sur un papier filtre. La tâche obtenue est constituée d'un noyau bleu sombre et d'une auréole transparente, ce qui indique que le bleu injecté est entièrement adsorbé et le test est négatif. Lorsque l'auréole commence à se colorer en bleu, on laisse s'opérer l'adsorption. Si au bout de cinq minutes le bleu de l'auréole persiste, le degré de saturation d'adsorption est atteint et le test est positif. On relève la quantité totale de solution de bleu de méthylène utilisée.

Les échantillons qu'on a analysés présentent des valeurs de bleu comprises entre 0.4 et 0.8 de bleu de méthylène adsorbé par 100g de matériau sec.

Echantillon E11 : VBS = 0.4g de bleu de Méthylène pour 100g de matériau sec.

Echantillon F2 : VBS = 0.8g de bleu de Méthylène pour 100g de matériau sec.

Ces valeurs sont relativement faibles et indiquent que la fraction argileuse des échantillons analysés est inactive, ce qui est en accord avec Philipponnat, (1979). En effet, le pourcentage de la fraction argileuse est très faible (2 à 15%)

et la plasticité est faible à moyenne. Ces argiles restent donc insensibles à l'eau.

VI. — CONCLUSION

L'analyse géologique et géotechnique du pisé des murailles de Marrakech nous a permis de mettre en évidence les caractéristiques spécifiques (texture, qualité des particules fines...) de chaque échantillon.

Les échantillons étudiés présentent une texture majoritairement à base de graviers, de sable et de silt avec très peu d'argile.

La diversité des terres utilisées dans la construction des murailles (terre graveleuse, terre sableuse, terre argileuse...) a une importance extrême quant au maintien de l'équilibre de ces bâtis, en effet nous avons vu que ces matériaux ont deux origines différentes :

- Une origine sud avec des matériaux détritiques issus du démantèlement de la chaîne atlasique.
- Une origine nord où dominent des matériaux carbonatés de milieux lacustres ou palustres.

Ces remparts et en général les constructions en terre résistent au temps mais comportent des faiblesses réelles et restent sensibles à l'eau. Pour parer ce danger, un ajout de stabilisant tel que la chaux est nécessaire afin d'améliorer considérablement l'imperméabilité et donc la résistance.

Nous avons vu que dans la partie sud, la muraille présente un taux de stabilisant (chaux) faible par rapport à la muraille nord pour laquelle le carbonate est apporté aussi bien par la terre elle-même que par le carbonate de chaux. Ceci explique l'état de dégradation avancé observé dans ce tronçon de muraille.

Cette étude, basée sur les analyses chimiques, pétrographiques, granulométriques et les essais géotechniques, constitue une première phase indispensable pour tout projet de restauration.

Les résultats obtenus peuvent être exploités dans le domaine de la préservation de ce patrimoine en pisé de terre afin de le revaloriser sans le dénaturer, car dans la plupart du temps, les interventions se heurtent au manque d'identification et de diagnostic scientifiques.

BIBLIOGRAPHIE

- AARAB El. M., (1995). — Genèse et différenciation d'un magma tholeitique en domaine extensif intracontinental : l'exemple du magmatisme pré-orogénitique des Jbilet (Maroc hercynien). Thèse d'état. Univ. Cadi Ayyad, Marrakech. 253 p.
- BERNICH M., (2001). — La construction en terre : Essais d'identification des sols. Publication de l'institut Terre, E.R.A.C. Tensift. 59 p.
- BRIGNON J., AMINE A., BOUTALEB B., MARTINET G., ROSENBERGER B. et TERRASSE M. (1967). — Histoire du Maroc. Edition Hatier. Paris. 415 p.
- BRYSSINE G., (1951). — Premières réflexions sur la mise en valeur de la plaine du Haouz. DACF SRAEA, Rabat, Maroc, p. 1-69.
- CHOUBERT G. et MARCAIS J. (1952). — Aperçu structural, in : Géologie du Maroc. Notes et Mémoires Serv. Géol. Maroc, n° 100, fasc. 1, 1ère partie et 19ème Congr. Géol. Inter., Alger, Monogr. Région., 3ème sér. Maroc, n°6, p. 9-73.
- COSTET J. et SANGLERAT G. (1981). — Cours pratiques de mécanique des sols. Tome1 : Plasticité et calcul des tassements, édition Dunod, Paris. 339 p.
- DUTOUR A. et FERRANDINI J. (1985). — Nouvelles observations néotectoniques dans le haut atlas de Marrakech et le Haouz central. (Maroc). Apports sur l'évolution récente d'un segment du bâti atlasique. Revue de géologie dynamique et de géographie physique vol. 26, fasc. 5, p. 285-297, paris.
- HOUBEN H. et GUILLAUD H. (1989). — CRATerre - Traité de construction en terre- encyclopédie de construction en terre. Editions parenthèses, Marseille. Volume 1, 353 p.
- NGOC LAN T. et BARBARAS R. (1982). — Essai granulaire rapide pour sols peu argileux et granulats. Bull. liaison Labo. P & Ch. - 120- Réf. 2730, p. 40-47.
- PASCON P. (1977). — Le Haouz de Marrakech. CURS, Rabat, CNRS, Paris. T. 1, 37p.
- PHILIPPONNAT G. (1979). — Fondations et ouvrages en terre. Edition Eyrolles, p. 1-393
- RIVIERE A. (1977). — Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations. Edition Masson, 170 p., paris.
- VATAN A. (1967). — Manuel de sédimentologie. Editions Technip, paris, 397 p.

ETUDE DE LA VULNERABILITE ET DE LA SENSIBILITE DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DE LA MAMORA COTIERE (MAROC) : APPLICATION DE LA METHODE DRASTIC

Understanding of groundwater resources vulnerability and susceptibility of the coastal Mamora (Morocco): DRASTIC method application

par Brahim BEN KABBOUR (*), Lahcen ZOUHRI (**), Jean-Pierre COLBEAUX (***),
Jacky MANIA (****), Christian GORINI (***)

Résumé. – Dans les systèmes aquifères hétérogènes, les polluants d'origine agricole et industrielle constituent un problème environnemental complexe. Le présent article a pour objectif d'identifier les zones vulnérables à la pollution en utilisant la méthode DRASTIC. Sept couches ont été prises en compte : i) la profondeur de la nappe, ii) l'infiltration effective, iii) la texture du sol, iv) la pente topographique, v) le milieu aquifère, vi) la zone vadose et vii) la conductivité hydraulique. Pour chaque zone, une note DRASTIC est multipliée par un poids relatif à chaque type de couche. Leur sommation permet de déterminer l'indice DRASTIC final. Une carte de sensibilité est ensuite élaborée en superposant la carte de vulnérabilité obtenue à la carte d'occupation du sol. Les cartes de vulnérabilité et de sensibilité montrent que les sites les plus vulnérables et les plus sensibles à la pollution sont généralement localisés le long de la route menant de Rabat à Kénitra (Maroc).

Abstract. — In the heterogeneous aquifer systems, the agricultural and industrial pollutions constitute a complex environmental problem. This paper aims to identify the vulnerable zones to pollution by using DRASTIC method. Seven layers were taken into account: i) the aquifer depth, ii) effective rainfall, iii) the texture of the ground, iv) the topographic slope, v) the lithology of the aquifer vi) of the vadose zone, vii) the hydraulic conductivity. For each zone, a DRASTIC note is multiplied by a weight relative to each type of layer. Their summation makes it possible to determine the final DRASTIC index. A map of the sensibility is elaborate thereafter by superimposition of the vulnerability map resulting from the ground occupation. Sensibility and vulnerability maps show that the most vulnerable and sensible sites to the pollution are generally localised along the road leading from Rabat to Kénitra cities (Morocco).

I. — INTRODUCTION

La région étudiée est comprise entre deux domaines structuraux : la Méséta et la chaîne Rifaine (fig. 1). Plusieurs secteurs sont alimentés par les eaux souterraines du bassin de la Mamora : notamment l'alimentation en eau potable des principales villes de la région (AEP) et les secteurs industriels et agricoles. Le climat est de type méditerranéen avec des températures moyennes de 13°C en hiver et 27°C en été. La recharge de la nappe s'effectue principalement à partir

des précipitations, qui sont de l'ordre de 560 mm/an, avec un taux d'infiltration qui se situe entre 16% et 25%. La croissance des activités industrielles et agricoles a contribué fortement à une contamination des eaux souterraines, par de nombreux polluants organiques et inorganiques. L'hétérogénéité des faciès composant l'aquifère (sables, calcaires, conglomérats, grès) rend difficile le suivi et le contrôle des contaminants. Afin de prévoir les zones les plus vulnérables et les plus susceptibles d'être contaminées, des cartes de vulnérabilité et de sensibilité ont été réalisées.

(*) Université Cadi Ayyad, FST Beni Mellal, Département de Géologie, Laboratoire d'Aménagement du Territoire (Maroc)

(**). Ecole Polytechnique de Lille, UMR CNRS 8107, LML, Avenue Paul Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex (France). Email : lahcen.zouhri@laposte.net

(***) UFR de Géologie, Bât SN5, Université de Lille I, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex (France)

(****) Laboratoire des Processus et Bilans des Domaines Sédimentaires. UMR PBDS, UFR Sciences de la Terre, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex (France)

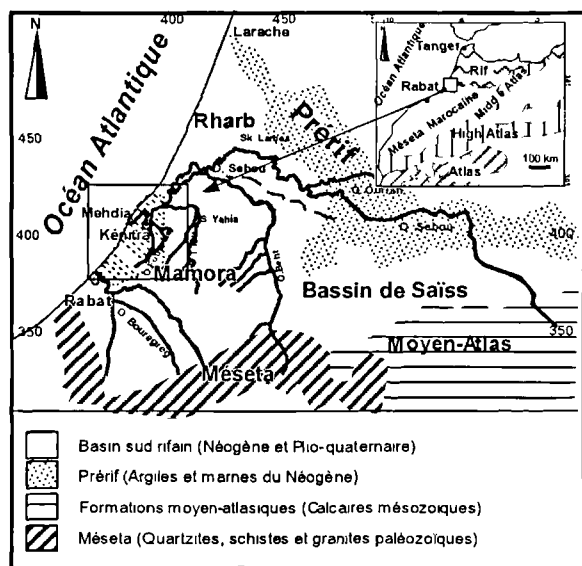


Fig. 1. — Géologie et localisation du secteur étudié.

Fig. 1. — Geology and location of the studied area.

II. — METHODE UTILISEE

La méthode DRASTIC a été utilisée pour détecter les sites potentiellement menacés par les pollutions superficielles, qui sont transférées par les eaux d'infiltration pluvieuses (Aller *et al.*, 1987 ; Nachtblum *et al.* 1993, Merchant, 1994 ; Tsihrintzis *et al.*, 1996, Sakho, 1998 ; Al-Zabet, 2002). L'acronyme DRASTIC correspond aux initiales de sept paramètres hydrogéologiques : profondeur de la nappe, recharge pluvieuse effective, lithologie de l'aquifère (zone saturée et non saturée), type de sol, pente topographique, conductivité hydraulique. Ce sont les principaux éléments cartographiables, utilisés par cette méthode, pour définir le potentiel de contamination des eaux souterraines.

Le système de cartographie DRASTIC est réalisé en deux étapes : i) l'identification des données relatives aux sept paramètres utilisés sur toute l'étendue de la région ii) l'élaboration de sept couches de données ; chaque couche est composée d'unités hydrogéologiquement homogènes. Cette deuxième étape, consiste à mettre en place un schéma DRASTIC de notation et de pondération de chacune de ces unités. Il permet l'attribution d'une note subjective, de 1 à 10, à chacune des unités homogènes, et d'un poids variable de 1 à 5 à chacune des 7 couches hydrogéologiques élaborées. Les notes pondérées sont par la suite sommées pour obtenir l'indice DRASTIC final (**Id**). La superposition des sept couches donne une carte thématique finale composée d'unités polygonales constituant chacune une aire d'un même indice DRASTIC.

$$Id = Dn * Dp + Rn * Rp + An * Ap + Sn * Sp + Tn * Tp + In * Ip + Cn * Cp$$

Avec, Dn : note relative à la profondeur de la nappe ; Dp : poids relatif à la profondeur de la nappe ; Rn : note relative à la recharge pluvieuse effective ; Rp : poids relatif à la recharge pluvieuse effective ; An : note relative à la tranche saturée ; Ap : poids relatif à la tranche saturée ; Sn : note relative au milieu sol ; Sp : poids relatif

au milieu sol ; Tn : note relative à la pente topographique ; Tp : poids relatif à la pente topographique ; In : note relative à la lithologie de la tranche saturée ; Ip : poids relatif à la pente topographique ; Cn : note relative à la conductivité hydraulique ; Cp : poids relatif à la conductivité hydraulique.

Les unités, qui traduisent un indice DRASTIC (**Id**) plus élevé, sont considérées comme les sites où les conditions intrinsèques sont les plus favorables à une contamination superficielle.

La méthode DRASTIC est utilisée en tenant compte des hypothèses suivantes :

- les polluants sont introduits par la surface du sol,
- les polluants sont transférés à l'aquifère par infiltration efficace,
- les polluants ont la mobilité de l'eau,
- les aires évaluées sont de 40 ha ou plus.

L'indice du risque effectif ou de sensibilité effective (**Ir**) est calculé comme la somme entre l'indice DRASTIC (**Id**) et de l'indice d'occupation du sol (**Is**). L'indice d'occupation du sol varie de 1 à 9 selon le type d'activité anthropique.

$$Ir = Id \times Is$$

La cartographie de l'indice **Ir** permet d'élaborer la carte du risque effectif ou de la sensibilité effective, ou encore la carte de risque anthropique. L'unité d'indice **Ir** le plus élevé est considérée comme le site où les conditions intrinsèques et les activités anthropiques sont les plus favorables à la contamination de la nappe.

III. — DONNEES REQUISES ET SOURCES DE DONNEES

1) Profondeur de la nappe

La profondeur de la surface piézométrique est importante. Elle est mesurée comme la distance séparant la surface libre de la nappe et celle du sol. Cette profondeur est variable de 2 m à 70 m avec une moyenne de 25 m.

2) Recharge effective

La recharge effective est la quantité d'eau pluvieuse qui s'infiltré effectivement vers l'aquifère. Ce paramètre est quantifié comme une lame d'eau d'épaisseur millimétrique calculée sur la base du taux d'infiltration du sol, qui dépend de la capacité de drainage de ce dernier. Dans la méthode DRASTIC, la quantification de ce paramètre ne tient compte ni de la distribution, ni de l'intensité, ni de la durée des précipitations. La pluviométrie moyenne annuelle de la région est calculée sur la base d'une série de données de trente années correspondant à trois stations climatiques répartie sur l'ensemble de la région. La distribution spatiale des coefficients d'infiltration des sols est déduite des résultats des travaux antérieurs et de l'étude du bilan hydrique de la nappe. Pour une partie de la région, caractérisée par un même coefficient d'infiltration (**I**), la recharge effective moyenne annuelle (**Re**) est calculée en multipliant la pluviométrie moyenne (**Pm**) par le coefficient d'infiltration (**I**) tel que :

$$Re = (Pm \times I)/100$$

Re : recharge effective moyenne annuelle (mm) ;

Pm : pluviométrie moyenne annuelle (mm) ;

I : coefficient d'infiltration (%).

3) Milieu aquifère :

Le milieu aquifère correspond aux roches consolidées et meubles. L'aquifère étudié est constitué généralement par des dépôts hétérogènes : calcarénites, grès, sables, graviers et conglomérats, argiles. Dans la notation DRASTIC, ce type de milieu a une note de 4 à 10. Or, le degré de vulnérabilité va être différent d'un point à un autre selon l'épaisseur de cette couche. Un site avec une tranche saturée plus épaisse va être moins vulnérable qu'un milieu où cette tranche est mince. Par conséquent, il apparaît judicieux de noter les sites aussi bien en s'appuyant sur la nature lithologique de cette couche que sur son épaisseur. Un site possédant une tranche saturée de plus de 20 m est donc considéré, comme le moins vulnérable avec une note de 4, et les sites avec une tranche de moins de 5 m sont les plus vulnérables avec une note de 10.

4) Milieu sol

Les différents types de sols prospectés sont : (i) des argiles, des marnes et limons sur les berges de l'oued Sebou et dans le sud-ouest de la région ; (ii) des sables argileux et limoneux ; et (iii) des sables et des grès (grès de la Mamora) couvrant plus de 70 % de la région.

5) Pente topographique

La cartographie des pentes est basée sur les cartes topographiques à 1/50000. Ces pentes sont variables de moins de 1% à plus de 10%. Plus de 70% de la région présente des pentes entre 5% et 10%. Les plus faibles se trouvent sur les berges de l'oued Sebou, alors que les plus élevées affectent les dunes du sillon côtier.

6) Conductivité hydraulique

Ce paramètre est important puisqu'il reflète le degré de transmission des polluants d'un point à l'autre de l'aquifère. Ce paramètre est évalué sur la base des données de forages hydrogéologiques, et sur la base d'une modélisation numérique des écoulements dans l'aquifère étudié. Elle varie entre $3,3 \times 10^{-5}$ et $9,4 \times 10^{-4}$ m/s.

IV. — TRAITEMENT DES DIFFERENTES COUCHES DE DONNEES DRASTIC

1) Conversion, geo-referencing et liens avec des fichiers de données

Après la préparation des couches correspondantes aux sept paramètres hydrogéologiques, ces dernières sont digitalisées et converties sous format vectoriel et projetées dans le système de coordonnées géo-référencées latitude-longitude (Geodetic Coordinates System, Eastman, 1997). La grille ainsi obtenue est de 400 colonnes et 400 lignes avec une superficie d'un km² pour chaque maille.

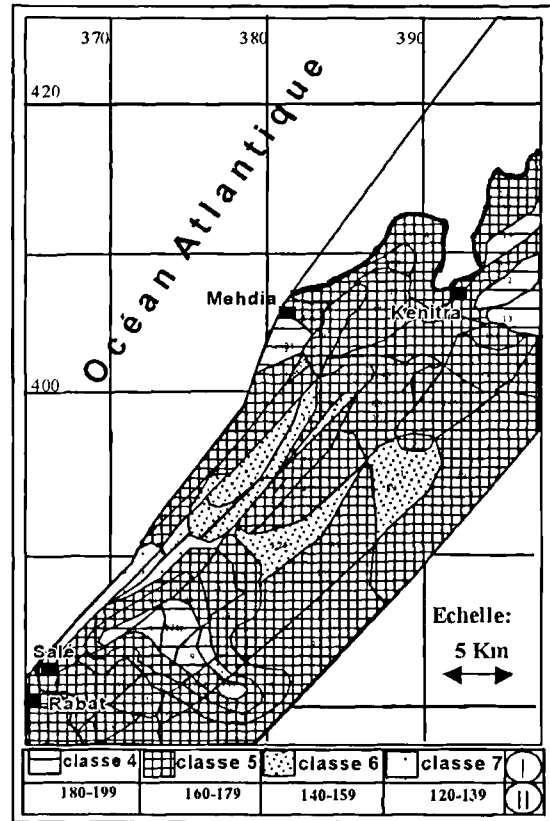


Fig. 2. — Carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC [I. Classes de vulnérabilité (Aller *et al.*, 1987), II. Intervalles de valeurs de Id].

Fig. 2. — Vulnerability map according to the DRASTIC method [I. vulnerability classes (Aller *et al.*, 1987), II. Values intervals of Id].

2) Notation et pondération des vecteurs

Pour chaque couche de données hydrogéologiques, chaque vecteur est donc noté et pondéré selon la méthode DRASTIC. Une carte vectorielle thématique est ensuite élaborée en cartographiant l'indice DRASTIC obtenu. Cette carte vectorielle est liée à un fichier de 256 couleurs qui a permis de visualiser les différentes zones selon leur degré de vulnérabilité.

La carte d'occupation des sols est introduite sous format vectoriel, et projetée dans le même système de coordonnées. Un indice, variable de 1 pour la forêt à 9 pour les cultures intensives, est attribué à chaque vecteur. La multiplication de l'indice DRASTIC et de celui d'occupation des sols conduit à l'obtention de l'indice de risque anthropique. La cartographie de ce dernier permet la réalisation d'une carte de risque effectif de pollution anthropique.

V. — RESULTATS ET DISCUSSION

1) Carte de vulnérabilité

La carte finale de vulnérabilité indique que les sites les plus vulnérables s'étendent de la région de Sidi Bouqnadel

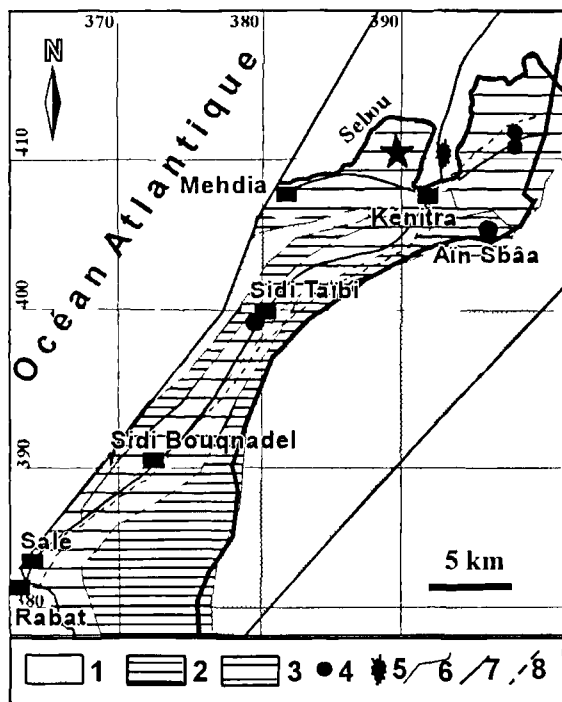


Fig. 3. — Carte de l'occupation du sol de la zone côtière de la Mamora (1. Forêt, 2. Agriculture, 3. Habitations et industries, 4. Stations de pompage, 5. Base militaire, 6. Autoroute, 7. Route, 8. Réseau ferroviaire).

Fig. 3. — Map of the Coastal Mamora land use (1. Forest, 2. Extensive agriculture, 3. Habitation and industries, 4. Intensive Agriculture, 5. Military base, 6. Nuclear reactor, 7. Municipal landfill, 8. Pumping station, 9. Cities, 10. Highway, 11. Road, 12. Railway).

jusqu'à la ville de Salé (fig. 2), avec des valeurs de l'indice DRASTIC maximales de 189. Le site, distingué comme le moins vulnérable, est celui de Sidi Boughaba avec un indice DRASTIC de 122. La forte vulnérabilité dans la partie sud ouest de la région (Bouqnadel) est due à la fois aux faibles profondeurs de l'aquifère, aux faibles pentes topographiques, à la nature sableuse des sols, à la recharge pluvieuse relativement importante, aux conductivités hydrauliques élevées, et à la nature gréseuse et calcarénitique de la tranche saturée et non saturée.

En général, cet aquifère peut être considéré comme très vulnérable puisque plus de 90 % de son étendue a un indice DRASTIC supérieur à 140 (degrés 5/7, 6/7 et 7/7).

VI. — CARTOGRAPHIE DE L'INDICE DU RISQUE ANTHROPIQUE OU CARTE DE SENSIBILITE

Après avoir élaboré et introduit la carte d'occupation du sol dans le SIG (fig. 3), la procédure suivie, pour l'élaboration de la carte de sensibilité, est basée sur une pondération de

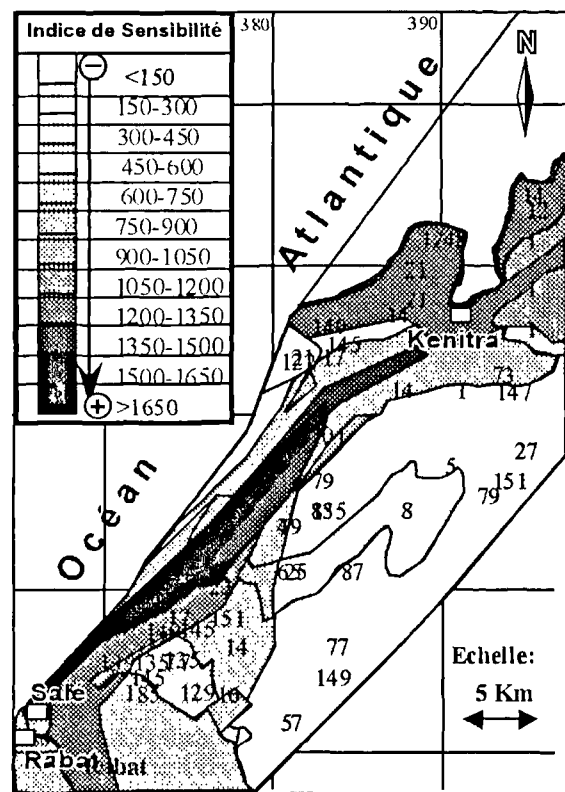


Fig. 4. — Carte de sensibilité selon la méthode DRASTIC et l'analyse de l'occupation du sol.

Fig. 4. — Sensibility map according to the DRASTIC method and land use analysis.

l'indice DRASTIC par une multiplication par l'indice d'occupation du sol (variable de 1 à 9). L'indice de sensibilité ainsi obtenu est variable de moins de 150 à plus de 1605. La carte de l'indice de sensibilité (fig.4) montre que le site le plus sensible est situé au sud ouest de Sidi Bouqnadel, avec un indice de sensibilité $I_s = 1701$ ($I_d = 189$, $I_r = 9$). Le site le moins sensible est localisé aux environs de la lagune de Sidi Boughaba, avec un indice de sensibilité de 123.

VII. — CONCLUSION

La cartographie de l'indice de vulnérabilité par la méthode DRASTIC a permis de déduire la vulnérabilité et la sensibilité des sites exposés à l'activité anthropique. La zone de recharge à l'amont de la nappe est vulnérable, mais elle est moins sensible à cause de l'occupation du sol par la forêt de la Mamora. La préservation de cette dernière, avec sa biodiversité animale et végétale, dépend de la qualité des ressources souterraines de la région. Une réglementation est indispensable afin de maîtriser le flux polluant issu de l'activité anthropique et de renforcer la législation dans ce sens.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLER L., BENNETT T., LEHR J.H., HACKETT G. (1987). — DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. EPA-600/2-87-035, 455 p.
- AL-ZABET T. (2002). — Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environmental Geology*, Vol. 43, n° 1 and 2, pp. 203-208.
- EASTMAN J.R. (1997). Idrisi for Windows user's guide. IDRISI Production. Clark University, USA. 300 p.
- MERCHANT W. J. (1994). — GIS-Based Groundwater Pollution Hazard Assessment: a critical Review of the DRASTIC Model. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60, 9, 1117-11127.
- NACHTNBEL H.-P., FURST J., HOLZMANN H. (1993). — Application of geographical systems to support groundwater modelling. HydroGIS 93, *IAHS*, 653-663.
- SAKHO A..M. (1998). — Le Système d'Information Géographique (SIG), l'hydrologie et la gestion des ressources en eau. World meteorological organisation. *Technical reports in hydrology and water resources*, 59, 14 p.
- TSIHRINTZIS V.A., HAMID R., FUENTES H.R. (1996). — Use of Geographic Information Systems (GIS) in Water Resources: A Review, *Water Resources Management*, EWRA, Vol. 10, No. 4, August, pp. 251-277.

COMPORTEMENT GEOTECHNIQUE DES ARGILES BRUNES DE LALLA FATNA (SAFI, MAROC)

Geotechnical behaviour of *Lalla Fatna* brown clays (*Safi, Morocco*)

par M. IBNOUSSINA (*), M. ZAMAMA (**), Z. SEKKAT (***), M. AYEB (***), F. FRÖHLICH (****) et O. WITAM (*).

Résumé — Constituant le substratum du Calcaire de Dridrat d'âge Hautérvien supérieur, les argiles brunes (Valanginien supérieur Hautérvien inférieur) contribuent à la dégradation de l'espace servant de support à l'installation de l'infrastructure routière et à la création de nouveaux aménagements. Dans le présent travail, nous nous proposons d'étudier le comportement géotechnique de ces argiles. Les investigations entreprises permettent de caractériser la rhéologie de la formation en présence et renseignent, en tant que source d'information aux laboratoires d'essais et d'études, sur le comportement des sols comme assise de fondations.

Ces argiles présentent des propriétés géotechniques essentiellement contrôlées par la minéralogie et par la granulométrie. Les analyses par DRX montrent que la fraction argileuse contient de la smectite et de l'illite qui participent activement à l'instabilité géotechnique de l'unité lithostratigraphique. L'importance de la fraction argileuse dont le diamètre est inférieur à 2 μ m est en partie responsable de l'instabilité de la formation. Le comportement gonflant de ces argiles est essentiellement

Abstract — Constituting the substratum of higher Hautérvien Limestone of Dridrat, the Brown Clays (higher Valanginien lower Hautérvien) contribute to the degradation of the space being used as support for substructure and for new installations creation. In this work, we propose to study the geotechnical behavior of these clays. The investigations undertaken make it possible to characterize the unity rheology and inform, as information source at the tests and studies laboratories, on the behavior of the grounds as sat foundations.

These clays present the geotechnic properties mainly controled by mineralogy and grain size distribution. The analysis by DRX show that the clay fraction contains smectite and illite which contribute to the geotechnical instability of the lithostratigraphic unit. The importance of the clay fraction with a particle size smaller than 2 μ m is partially responsible for this instability. The inflating behavior of these clays is essentially governed by smectite presence.

I. — INTRODUCTION

Les argiles ont fait l'objet de nombreuses études depuis plusieurs années et présentent toujours un grand intérêt, non seulement par leur nature minéralogique, mais aussi à cause de leurs propriétés physico-chimiques et géotechnique très particulières (Locat, 2002, Debrabant *et al.*, 1994, Holtz et Kovacs, 1991). En effet, le comportement de ces matériaux reste très sensible à l'hydratation en raison de leur activité très importante vis-à-vis de l'eau. Ils manifestent alors des cycles de gonflement-retrait occasionnant des variations de volume parfois conséquentes. Dans les régions à climat aride ou semi-aride, ce phénomène peut engendrer des désordres très marqués dans les ouvrages de génie civil ce qui peut constituer une menace réelle pour l'homme et pour son environnement (Alonso *et al.*, 2003).

C'est dans ce contexte que nous nous proposons d'analyser le comportement géotechnique d'un cortège argileux, d'âge Valanginien supérieur - Hautérvien inférieur, de la série sédimentaire mésozoïque du bassin de Safi et plus précisément celle de la plage de Lalla Fatna (LF).

II. — CONTEXTE GEOLOGIQUE

Au Nord de la ville de Safi, affleure une série sédimentaire d'âge Jurassique-Crétacé. La stratigraphie de cette série a fait l'objet d'une étude fondamentale réalisée par Witam, (1988) sur la base des travaux antérieurs (Roch, 1930; Gigout, 1951; Ambroggi et Neltner, 1952; Canerot *et al.*, 1982; Jaffrezo *et al.*, 1985 et Taj-Eddine *et al.*, 1985).

(*) Laboratoire de Stratigraphie, Faculté des sciences Semlalia Marrakech, BP.23.90

E-mail : ibnoussina@ucam.ac.ma et Witam@ucam.ac.ma

(**) Département de Chimie, Faculté des sciences Semlalia Marrakech, BP.23.90. zamama@ucam.ac.ma

(***) Laboratoire d'Etudes, d'Essais et d'Expertises (L3e), Marrakech. E-mail : L3e@iam.net.ma.

(****) Laboratoire de spectrométrie infrarouge, Muséum d'Histoire Naturelle, Paris.

La formation des Argiles Brunes apparaît dans plusieurs affleurements au nord de Safi le long du littoral. Cette unité argilo-marneuse est comprise entre deux formations calcaires: le Calcaire Inférieur et le Calcaire de Dridrat (fig. 1).

1) Calcaire inférieur (6m. d'épaisseur)

C'est un calcaire gréseux jaune bioclastique à stratification horizontale onduleuse, localement associé à des calcaires noduleux à Bryozoaires. Il est composé de deux bancs d'égale épaisseur et débute par un niveau de condensation à Brachiopodes (*Térébratula sp.*). Ces calcaires sont riches en Echinides, Ammonites, Brachiopodes, Lamellibranches et Serpules et sont attribués au Berriasien supérieur – Valanginien inférieur (Witam, 1988).

2) Argiles brunes (60m. d'épaisseur)

Au dessus d'une surface durcie à encroûtements d'oxydes de fer, se développe la formation des argiles brunes. Elle est composée de deux ensembles:

Ensemble 1: Epais de 70 cm., il est composé de deux bancs calcaires de plus en plus riches en faune (Plicatules, Ammonites et Serpules). Cet ensemble s'achève par une surface durcie et oxydée.

Ensemble 2: Epais de 59.30 m, il s'agit d'une alternance de marnes grises gypsifères d'environ 15 m. d'épaisseur et de calcaires gréseux roux 50 cm. bioturbés à *Exogyra couloni*, Plicatules et Serpules. Une barre calcaro-gréseuse au milieu de la formation a livré des Brachiopodes et des Ammonites. Cette formation est rapportée au Valanginien supérieur - Hautérivien inférieur (Gigout, 1951).

Le niveau marneux supérieur montre plusieurs intercalations de lentilles gréseuses à litage oblique entrecroisé.

3) Calcaire de Dridrat (10m. d'épaisseur)

Datée par des Brachiopodes d'âge Hautérivien supérieur, cette formation est constituée d'un calcaire gréseux à Madréporaires, Brachiopodes et Bryozoaires (Gigout, 1951).

III. — ANALYSE GEOTECHNIQUE ET MINERALOGIQUE DES ARGILES BRUNES

Afin de cerner le comportement des argiles brunes dans la région de Safi, deux séries d'analyses ont été effectuées sur trois échantillons prélevés dans trois horizons de la formation argileuse :

Essais géotechniques (granulométrie, teneur en eau, limites d'Atterberg et essais oedométriques)

Analyses par interaction matière-rayonnement: spectrométrie infrarouge (IR) et diffractométrie aux rayons X (DRX), de la fraction inférieure à 50µm permettant la détermination des assemblages argileux.

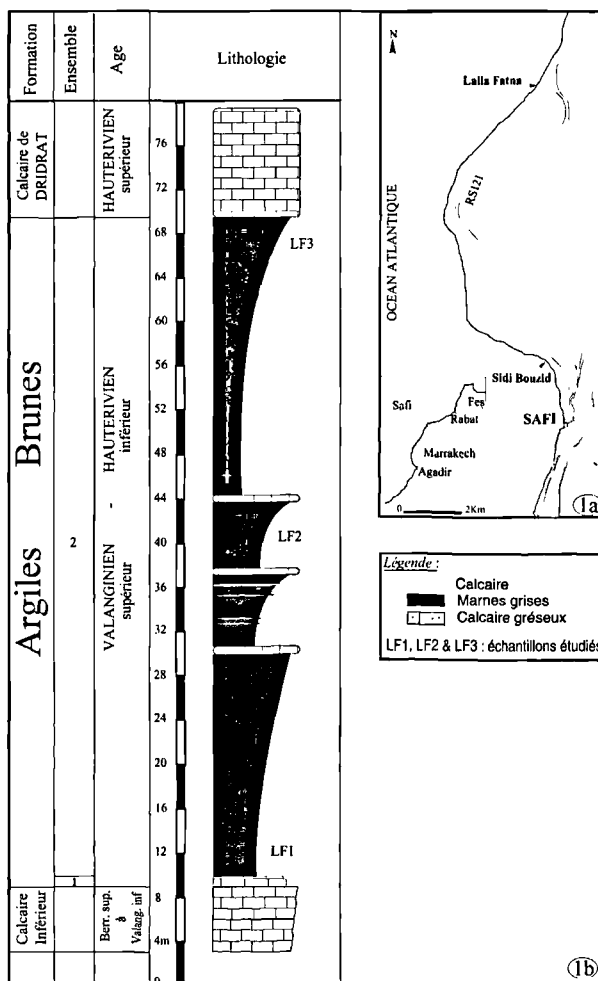


Fig. 1. — Localisation de la coupe étudiée (a) et colonne stratigraphique (b).

Fig. 1. Localization of the studied cut (a) and stratigraphic column (b).

1) Analyse granulométrique

Les échantillons provenant des trois horizons étudiés à savoir LF1, LF2 et LF3, ont fait l'objet d'analyses granulométriques et sédimentométriques. La figure 2 montre la répartition détaillée selon les différents diamètres de grains et représente une synthèse des principales caractéristiques granulométriques et sédimentométriques de chaque échantillon. Nous avons regroupé les résultats de cette analyse dans le tableau I.

Les résultats des analyses granulométriques, montrent que le matériau étudié est constitué de particules très fines. Le pourcentage de la fraction dont le diamètre (ϕ) est supérieur à 2mm est quasi nul alors que le pourcentage des particules de $\phi < 80\mu\text{m}$ varie de 95 à 99%. La fraction argileuse pure (% d'éléments de $\phi < 2\mu\text{m}$) varie de 48% à 94%.

Pour les échantillons LF1 et LF2, l'écart à 100% peut être expliqué par la présence d'une fraction silteuse riche en quartz et fossiles avec prédominance de gypse. L'échantillon LF3 n'en contient qu'une très faible proportion.

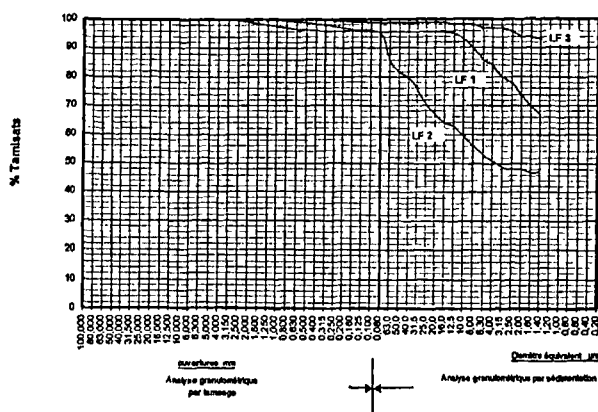


Fig. 2. — Courbes de répartition des différentes fractions granulaires

Fig. 2. — Curved of various granular fractions distribution

Echantillon	$\varnothing < 80 \mu\text{m}$ (%)	$\varnothing < 63 \mu\text{m}$ (%)	$\varnothing < 50 \mu\text{m}$ (%)	$\varnothing < 2 \mu\text{m}$ (%)
LF1	95.6	95.6	95.6	74
LF2	95.2	86	82	48
LF3	99	99	99	94

Tabl. I. — Pourcentage des différentes fractions granulaires

Table I. — Various granular fractions percentage

L'importance de la fraction argileuse, déterminée par analyses granulométriques et sédimentométriques, laisse supposer un comportement instable de cette formation fine très argileuse (Philipponnat, 1979).

2) Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg constituent des mesures normalisées de teneur en eau permettant de distinguer l'état liquide, plastique et solide de la formation testée (Holtz et Kovacs, 1991). Les résultats des essais sur les échantillons sont résumés dans le tableau II.

Les résultats montrent que nous avons affaire à des argiles moyennement plastiques. Elles sont classées en At, Lp, selon la nomenclature de classification des sols fins du laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) (Houben et Guillaud, 1989). Quant à leur activité selon Skempton, (1953) ($A_c = I_p / \% < 2\mu\text{m}$), elle varie de 0.23 à 0.33. Les valeurs affichées permettent d'affirmer l'inactivité de ces argiles et confirment l'homogénéité minéralogique de cette formation.

3) Essais Oedométriques

L'essai de compressibilité à l'oedomètre a pour objet essentiel d'étudier la consolidation d'échantillons intacts soumis à des charges verticales et de suivre son évolution au cours du temps, en mesurant les tassements sous charge verticale ou le gonflement sous l'eau (Holtz et Kovacs, 1991).

Il consiste à placer un échantillon de sol dans une boîte cylindrique rigide de section circulaire entre deux pierres

poreuses assurant son drainage. Un piston coulissant dans le cylindre, permet d'appliquer sur l'échantillon une contrainte verticale uniforme constante pendant un temps déterminé. Le processus de l'essai comprend trois phases :

a) une phase de saturation au cours de laquelle tout gonflement de l'échantillon est empêché.

b) une phase de chargement au cours de laquelle est appliquée, par paliers, une contrainte dont la valeur croît d'un palier à l'autre.

c) une phase de déchargement : au cours de cette phase, la contrainte est ramenée à une valeur nulle en passant par deux paliers intermédiaires de 24 heures. Tous les paliers de chargement, y compris sous une charge nulle, doivent être maintenus pendant une durée au moins égale à 24 heures.

Trois essais ont été réalisés sur des échantillons intacts. Les résultats sont consignés dans le tableau III. Les courbes (fig. 3) se présentent sous forme de deux branches dont l'une représente le tassement lors du chargement. L'autre branche matérialise le gonflement lors du déchargement. Ces courbes permettent de déterminer l'indice de compression et sont caractéristiques des argiles gonflantes (Boumaïz, 1998) : la branche de déchargement recoupe celle de chargement.

Ces essais ont permis de mettre en évidence une forte compaction et surconsolidation des échantillons argileux étudiés. En effet, les valeurs du poids volumique sec varient de 17.6 à 19.2 KN/m³. La pression de gonflement obtenue sur les trois essais est de 300 KPa (3 bars).

Les résultats de ces essais confirment le caractère surconsolidé de la formation étudiée, ainsi que son caractère gonflant et expansif (Ayebe et Sekkat, 1996).

La surconsolidation peut être due à plusieurs facteurs notamment : à une dessiccation par dessèchement de la surface, à la végétation, à un changement de niveau de la nappe phréatique, à l'érosion naturelle ou à l'intervention humaine (Holtz et Kovacs, 1991).

L'ensemble des caractéristiques géotechniques obtenues confirme l'existence d'un potentiel de gonflement et d'instabilité forts présents.

4) Minéralogie des argiles

a) Analyse par diffractométrie des rayons X (DRX)

L'analyse des diagrammes de diffraction des rayons X (fig. 4) montrent l'existence de minéraux à 7 Å probablement de type kaolinite. Les pics d_{001} révèlent la présence d'un faible pourcentage de la fraction micacée avec des distances variant de 9,9 à 10,2 Å ainsi que la smectite et l'illite dont les pics caractéristiques sont situés entre 13 et 14 Å. En outre, nous avons noté la présence du quartz en forte quantité. Quant aux carbonates, les diffractogrammes montrent la présence de calcite et de dolomite avec des pourcentages variables d'un échantillon à l'autre.

Sur la base des analyses minéralogiques, la présence de smectite dans le cortège argileux pourrait participer activement à son instabilité en présence d'eau. Les argiles brunes renferment aussi du gypse, minéral déstabilisant générateur d'anions bivalents (SO_4^{2-}) peptiseurs connus pour

Echantillon	Teneur en eau Wn (%)	Limite de liquidité Wl (%)	Limite de plasticité Wp (%)	Indice de plasticité Ip (%)	Activité Ac	Classe LCPC
LF1	21	43	23	20	0.27	At
LF2	12.9	40	24	16	0.33	Ap-At
LF3	16.7	49	27	22	0.23	Lp

Tabl. II. — Résultats des essais de plasticité et classification
(At : Argiles très plastiques, Ap : Argiles peu plastiques à très plastique Lp : Limons peu plastiques, LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées)

Table II. — Plasticity test results and classification

Echantillon	Masse volumique Sèche T/m ³	Contrainte de consolidation KPa	Indice de compression	Contrainte de gonflement KPa	Indice de gonflement
LF1	1.76	400	0.110	300	0.073
LF2	1.88	200	0.168	300	0.060
LF3	1.92	350	0.182	300	0.070

Tabl. III. — Résultats des essais oedométriques

Table III. — Oedometric test results

leurs propriétés défloculantes (Yariv et Cross, 1979) et (Bell, 1983) ainsi que l'association gypse - dolomite habituellement métastable (Blatt *et al.*, 1980).

b) Analyse par spectroscopie infrarouge

Les spectres de la figure 5, ont été enregistrés à l'aide d'un spectromètre IRTF, OPUS-NT. L'enregistrement a été effectué en mode donnant une résolution de 2 cm⁻¹ sur des échantillons sous forme de disque en KBr. Les pastilles de KBr ont été obtenues en broyant 3 à 4mg, de l'échantillon total tamisé à 50µm, dans 250mg de KBr. Afin d'éliminer toute trace de matière organique, le bromure de potassium a été préalablement desséché dans une étuve à 250°C. Le broyat a été mis dans un moule puis pressé à 2.5t/cm².

L'analyse générale des spectres infrarouges des trois échantillons étudiés montre l'existence de bandes dans la région d'élongation des hydroxyles caractéristiques de plusieurs minéraux argileux. La présence des carbonates dans les trois échantillons est mise en évidence par la présence des bandes situées à 1436 cm⁻¹ pour LF1 et LF2 et 1457 cm⁻¹ pour LF3. Ces fréquences sont caractéristiques des groupements CO₃²⁻. Le profil de ces bandes et leur glissement vers les basses fréquences d'un échantillon à l'autre peut être expliqué par la présence de plusieurs structures de carbonates notamment les formes calcite et dolomite ce qui est en accord avec les diagrammes DRX.

Pour les échantillons non traités thermiquement, les spectres infrarouges dans la région des vibrations des hydroxyles sont caractérisés par plusieurs bandes dont les plus résolues sont situées entre 3700 et 3600 cm⁻¹. Les bandes situées à 3697, 3672 et 3620 cm⁻¹ sont caractéristiques d'une Kaolinite. Les travaux fructueux de Farmer et Russell, (1967) entrepris sur ces minéraux démontrent qu'une kaolinite bien cristallisée est caractérisée par un spectre infrarouge constitué de quatre bandes, dans la région d'élongation des hydroxyles, situées à 3695, 3672, 3654 et 3621 cm⁻¹.

La variation des intensités de la bande d'absorption située à 3654 cm⁻¹ a été attribuée aux défauts de structure qui

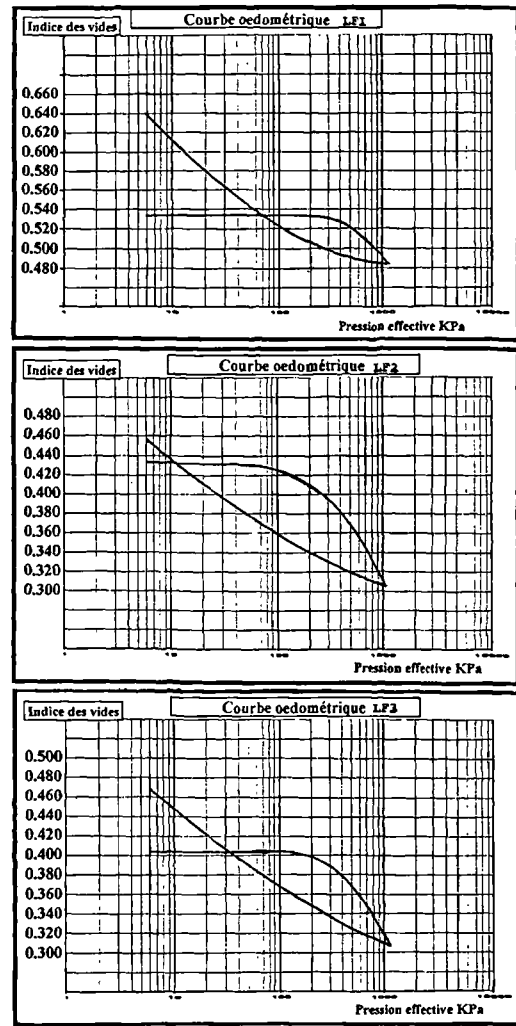


Fig. 3. — Courbes de compressibilité oedométrique des échantillons analysés

Fig. 3. — Oedometric compressibility curves of the analyzed samples

peuvent altérer les feuillets d'une kaolinite (Cases *et al.*, 1982). D'autres auteurs utilisent cette bande comme traceur de degré de cristallinité. Sur la base de ces résultats, on peut avancer que la kaolinite présente dans nos échantillons est mal cristallisée.

Les bandes situées du côté de la bande de basse fréquence (3620 cm⁻¹) de la kaolinite peuvent être attribuées à un mélange de smectite et d'illite. La présence de smectite est confirmée par la variation d'intensité de la bande située vers 3450 cm⁻¹ correspondant au départ de l'eau interfoliaire lorsque l'échantillon est chauffé (d, e et f, fig. 5). Etant donné la présence de la smectite dans les trois échantillons, on peut déjà prévoir leur comportement vis à vis de l'eau. Les argiles ainsi étudiées peuvent présenter une tendance très notable au gonflement à cause des propriétés des smectites.

Le traitement thermique des échantillons se manifeste, sur le spectre infrarouge, par une diminution des intensités des bandes de vibration, aussi bien dans la région d'élongation des OH que dans la région de déformation (δHOH). Il faut

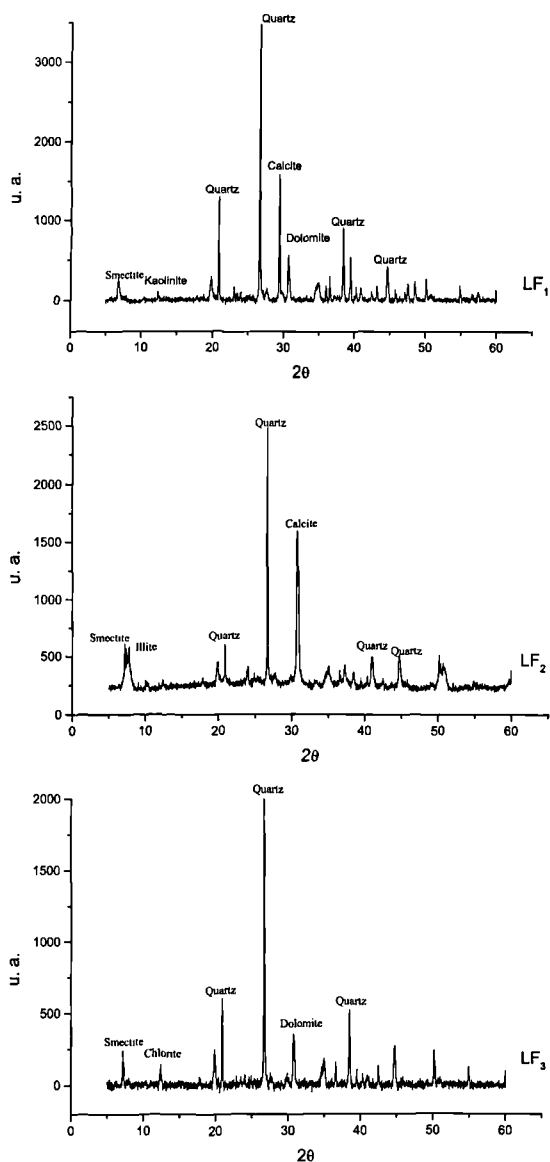


Fig. 4. — Spectres de diffraction de rayons X
 Fig. 4. — X-rays diffraction spectras

noter que les bandes restent centrées sur les mêmes fréquences sauf pour l'échantillon LF2. Pour ce dernier, nous constatons que la bande δHOH située vers 1670 cm^{-1} glisse vers 1650 cm^{-1} après chauffage (b et e, fig. 5). Ce changement de fréquence peut être expliqué par l'existence de molécules d'eau dont l'environnement est différent de celui ressenti par l'eau dans les échantillons LF1 et LF3. Par ailleurs, la fréquence $\delta\text{OH} = 1670\text{ cm}^{-1}$ relevée sur le spectre de l'échantillon avant traitement thermique (Tab. IV), montre que les hydroxyles sont plus liés que celle de l'eau restante après chauffage ($\delta\text{HOH} = 1650\text{ cm}^{-1}$).

IV. — CONCLUSION

Le présent travail a permis de caractériser la formation des argiles brunes de Lalla Fatna. Les analyses effectuées ont

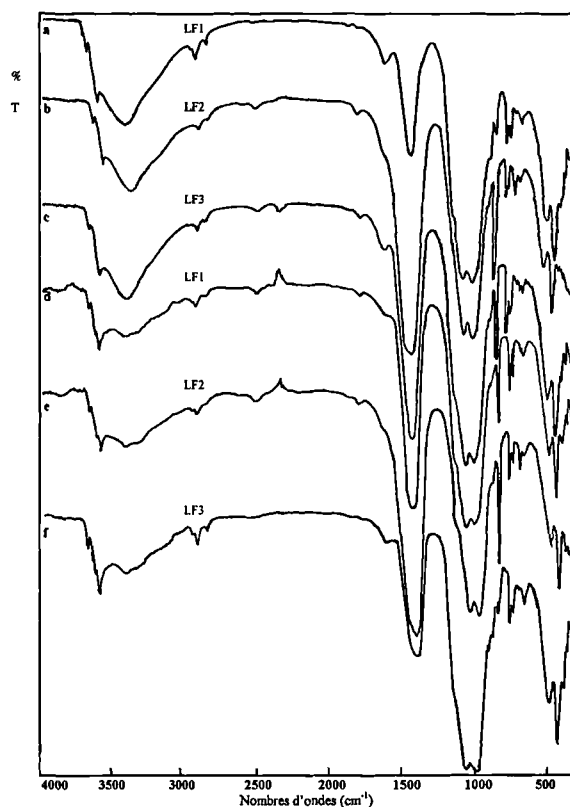


Fig. 5. — Spectres Infrarouge des échantillons avant et après chauffage. a, b et c) avant chauffage. d, e et f) après chauffage

Fig. 5. — Samples Infra-red spectras before and after heating. a, b and c) before heating. d, e and f) after heating

Echantillon	δHOH avant chauffage (cm^{-1})	δHOH après chauffage (cm^{-1})
LF1	1635	1635
LF2	1670	1650
LF3	1633	1633

Tabl. IV. — Déplacement des fréquences des modes de déformation de l'eau en fonction du chauffage

Table IV. — Frequencies displacement of water according to the heating deformation modes

confirmé le caractère gonflant et instable due à la granulométrie et à la minéralogie. Ces argiles contrôlent presque totalement le comportement du cortège argileux étudié et particulièrement le gonflement et la plasticité.

Le cortège étudié est constitué principalement d'une argile dont la plasticité est plus faible que celle que l'on pourrait prévoir en considérant le pourcentage élevé des particules dont le diamètre $\varnothing < 2\text{ }\mu\text{m}$. Cette argile renferme la smectite qui gonfle en présence d'eau, ce qui confère au sol de très mauvaises propriétés géotechniques.

La présence de phases déstabilisantes telle que le gypse et la matière organique peut contribuer à l'instabilité du cortège argileux. En fait, il est connu que l'association gypse - dolomite est habituellement métastable.

La déconsolidation ainsi que les variations de volume dues aux fluctuations saisonnières de la teneur en eau peuvent engendrer des désordres et préjudices importants aux ouvrages de génie civil.

Bien que la rhéologie de cette formation soit identifiée, l'utiliser comme assise de fondation constitue toujours une tentative à envisager avec précaution.

Remerciements. — L'auteur principal désire remercier particulièrement l'équipe du laboratoire d'essais, d'analyses et d'expertises (L3E) de Marrakech pour la réalisation des essais et analyses géotechniques, le directeur du centre de spectroscopie infrarouge du muséum national d'histoire naturelle de Paris pour la l'enregistrement des spectres infrarouges et Monsieur Mohammed Al Azhari professeur à la faculté des sciences et techniques (FST) de Marrakech pour l'enregistrement des spectres de DRX.

BIBLIOGRAPHIE

- ALONSO E.E., GENS A. et DELAHAYE C.H., (2003). — Influence of rainfall on the deformation and stability of a slope in overconsolidated clays: a case study. *Hydrogeology journal*, volume 11, p.174-192.
- AMBROGGI R. et NELTNER L., (1952). — Haut-Atlas et Anti-Atlas occidentaux, livret guide de l'excursion C33, Fasc. 2, Congrès géologique international, XIX^e session, Alger, Série Maroc, n°13, 83 p.
- AYEB M. et SEKKAT Z., (1996). — Sols gonflants de Ouarzazate. Première rencontre de géotechnique des pays francophones africains. 17-18 septembre, Marrakech, Maroc.
- BELL F.G., (1983). — *Fundamentals of Engineering Geology*. Butterworth et Co. Edit. Ltd. London, 648p.
- BLATT H., MIDDLETON G. et MURRAY R., (1980). — *Origin of sedimentary rocks*. Prentice Hall Edit. New Jersey, 782p.
- BOUMAÏZ M., (1998). — Propriétés géologiques et géotechniques des argiles expansives de Ouarzazate (Bassin de Ouarzazate, Maroc). Diplôme d'Etudes Supérieures de Troisième Cycle, Univ. Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia, Marrakech., 119 p.
- CANEROT J., DURAND-DELGA M., PEYBERNES B., RAHHALI I., REY J. et SAINT-MARC P., (1982). — Précisions lithostratigraphiques sur le Crétacé inférieur et moyen des bassins côtiers de Safi et d'Essaouira (Maroc). *Bull. Serv. Géol. Maroc*.
- CASES J.M., LIETARD O., YVON J. et DELON J.F., (1982). — Etude des propriétés cristallographiques, morphologiques, superficielles de kaolinites désordonnées. *Bull. Minéral.* 105, 439-455.
- DEBRABANT P., ADIDA B., PAINSET J., DECONINCK J.F. et RECOURT P., (1994). — Comportement géotechnique des argiles de Châtillon (Kimméridgien / Tithonien du Bas-Boulonnais). *Ann. Soc. Geol. Nord*. T.3 (2^{ème} série), 145-153, Décembre 1994.
- FARMER V.C. and RUSSELL J.D., (1967). — Infrared absorption spectrometry in clay studies. *Clays and Clay Miner.* 15: 121-142.
- GIGOUT M., (1951). — Etude géologique sur la méséta marocaine occidentale (arrière pays de Casablanca, Mazagan et Safi). *Notes et Mém., Serv., Géol., Maroc*, T. 86, p. 4-122
- HOLTZ R.D. et KOVACS W.D., (1991). — Introduction à la géotechnique. Edition de l'école polytechnique de Montréal, Québec, 808 pages.
- HOUBEN H. et GUILLAUD H., (1989). — *Traité de construction en terre*. Editions Parenthèses, Vol. 1, 355p.
- JAFFREZO M., MEDINA F. et CHOROWICZ J., (1985). — Données micro-stratigraphiques sur le Jurassique supérieur du bassin de l'Ouest marocain: Comparaison avec les résultats du LEG 79, D.S.D.P. (1981) et la compagnie Cyamaz (1982). *Bull. Soc. Géol., France*, t. 1, n° 6, p. 875-884, 5 fig.
- LOCAT J., (2002). — Dangers géotechniques liés aux argiles sensibles et examen de la coulée boueuse de Saint- Jean-Vianney en 1971. Rapports techniques/scientifiques. Atelier canadien sur la géotechnique et les risques naturels: Bilan de la DIPCN réalisations et perspectives. P. 1-3.
- PHILIPPONNAT G., (1979). — *Fondations et ouvrages en terre*, Editions Eyrolles, Paris, 393 p.
- ROCH E., (1930). — Etudes géologiques dans la région méridionale du Maroc occidental. *Notes et Mém., Serv., Géol., Maroc*, T. 9, p. 1-152
- SKEMPTON A.W., (1953). — The colloidal activity of clays. *Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. I, p. 57-61.
- TAJ-EDDINE K., REY J. et DU DRESNAY R., (1985). — La série mésozoïque des bassins de Safi et d'Essaouira. P. I. C. G.-U.N.E.S.C.O., n° 183: Corrélation du Mésozoïque et du Cénozoïque de l'Afrique de l'Ouest. Vème Conférence scientifique internationale, Marrakech (Maroc).
- WITAM O., (1988). — Etude stratigraphique et sédimentologique de la série mésozoïque du bassin de Safi (Maroc). Thèse, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, 194 p. In : *Strata*, Série
- YARIV S. et CROSS H., (1979). — *Geochemistry of Colloid Systems for Earth Scientists*. Springer Verlag Edit., Heidelberg, 450p.

INFLUENCE DU CONTROLE STRUCTURAL SUR L'AGENCEMENT DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE DANS UN BASSIN EN EXTENSION : LE BASSIN DE REGINIO (LOCRIDE, GRECE)

Structural control on the development of the drainage system in a basin under extension: Reginio basin (Locride, Greece)

par Christophe ANDRÉ (*) et Andreas PAVLOPOULOS (*)

Résumé. — Soumise à une activité tectonique intense liée à un contexte d'ouverture, la bordure méridionale du Golfe Nord d'Evia constitue une région particulièrement adaptée à l'étude de l'influence de l'organisation structurale sur le développement du réseau hydrographique. Une analyse détaillée de l'agencement des talwegs est comparée aux données structurales. L'ensemble des données révèle que le paysage est organisé suivant quatre directions structurales majeures : E-W à NW-SE, NE-SW, NNE-SSW et NNW-SSE. L'analyse morphométrique du réseau hydrographique met en évidence deux de ces directions structurales, dont l'origine et le comportement restent mal connus à ce jour.

Les directions NNE-SSW ont leur densité qui prédomine sur les autres, quel que soit le substratum ou l'ordre des draineurs considérés. Les accidents qui s'y rapportent sont interprétés comme des failles transverses à composante essentiellement verticale qui segmentent la marge méridionale du Golfe Nord d'Evia et individualisent des compartiments à subsidence variable dans le bassin de Reginio pendant la sédimentation post-alpine.

Les directions NNW-SSE sont essentiellement reprises par les cours d'eaux principaux. Leur agencement et leur comportement dans le canevas structural régional laissent suggérer qu'elles correspondent à des décrochements profonds provoquant un découpage en échelon du front de charriage lors de la mise en place de l'unité sub-pélagonienne sur la nappe du Parnasse.

Abstract. — *The southern continental margin of the North Evia gulf has suffered an intensive extensional tectonic activity that influenced the organisation of the drainage system. A detailed analysis of the drainage pattern is compared to the structural data. Globally, four main structural directions can be distinguished: E-W to NW-SE, NE-SW, NNE-SSW and NNW-SSE. The morphometric analysis of the drainage system reveals two main directions, which until today their importance was not documented. The NNE-SSW trends predominate over the others independently of the stream order. The related faults are interpreted as transverse ones with an important vertical component. As a result the southern margin of the North Evia gulf is separated in variable subsiding blocks within the Reginio basin during the post-alpine evolution. The NNW-SSE trends are the most prominent and have influenced the river-bed directions. Their characteristics and functioning showed that they correspond to deep strike slip faults that form an echelonated structure of the thrust front during emplacement of the sub-pelagonian nappe over the Parnassos block.*

I. — INTRODUCTION

Avec le Golfe de Corinthe, le Golfe Nord d'Evia est la région de Grèce la plus représentative de la tectonique active en extension en liaison avec le domaine égéen (Lemeille, 1977, Philip, 1974, Rondogianni 1984, Ganas *et al.* 1998, Roberts and Ganas 2000, Makris *et al.* 2001, Goldsworthy and Jackson, 2001). Ses reliefs étant soumis à de rapides et considérables mouvements verticaux, elle constitue un exemple remarquable pour apprécier l'influence du contrôle structural sur le développement du réseau hydrographique. Cependant, si les directions de fracturations principales autour desquelles s'articulent les grandes structures en extension sont connues, une analyse détaillée de l'agencement du réseau hydrographique met en évidence l'existence, voire la prédominance, de directions secondaires correspondant à des structurations encore peu décrites et interprétées.

A partir de l'analyse détaillée du réseau hydrographique et de sa comparaison avec les données tectoniques actuelles, nous nous proposons ici de décrire ces directions structurales secondaires et de proposer des hypothèses sur leur rôle et leur fonctionnement en les intégrant dans le modèle structural existant.

Après avoir présenté succinctement la configuration géologique et tectonique de la zone d'étude, nous tenterons de classer les différentes familles de fracturations observées à partir de l'analyse de données cartographiques et de mesures microtectoniques réalisées sur le terrain. Nous présenterons ensuite les résultats issus de l'analyse du réseau hydrographique et nous les comparerons avec les données structurales.

(*) Université d'Agriculture d'Athènes, Laboratoire de Minéralogie et Géologie, Iera Odos 75, 118 55 Athènes, Grèce

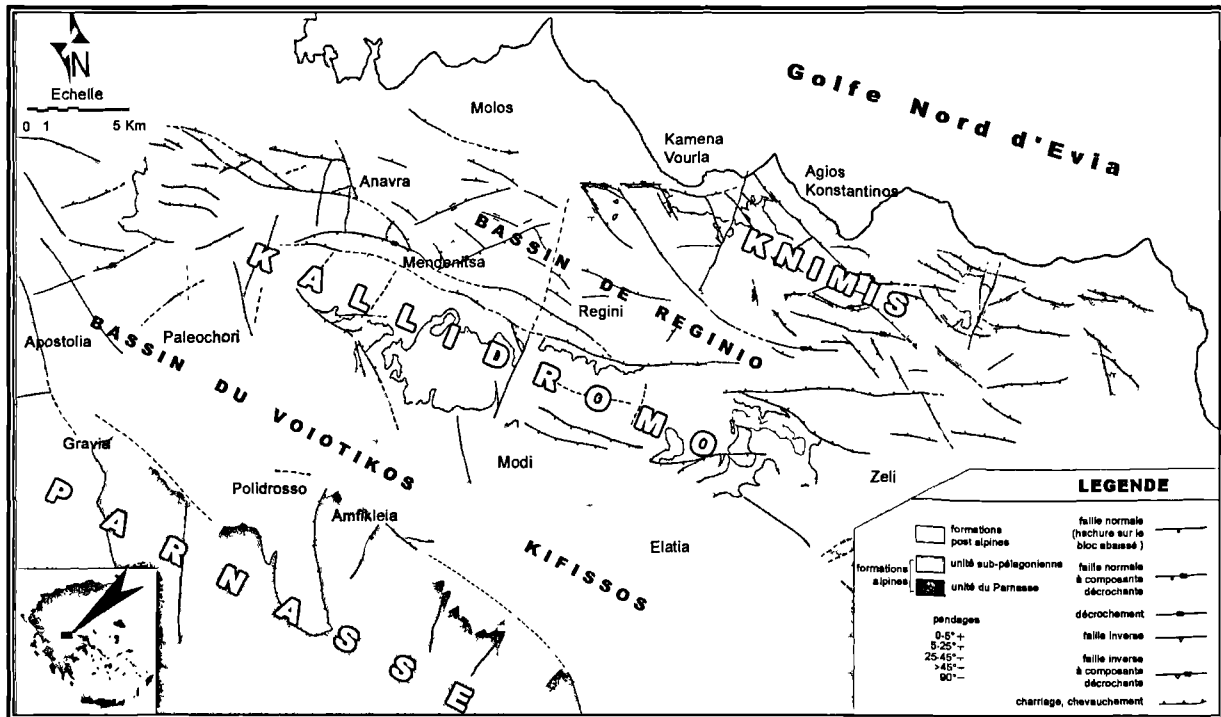


Fig. 1. — Localisation de la zone d'étude et carte structurale de la marge méridionale du Golfe Nord D'Evia (d'après Kranis, 1999, modifié)

Fig. 1. — Structural and location map of the studied area in the southern margin of the North Evia gulf (Kranis, 1999, modified).

II. — CADRE GEOLOGIQUE ET TECTONIQUE

La région étudiée se situe à 200 km au nord d'Athènes, à la jonction entre le Golfe Maliaque et le Golfe Nord d'Evia, sur leur bordure méridionale.

Le Golfe Maliaque et le Golfe Nord d'Evia correspondent à un vaste fossé d'effondrement initié depuis le Miocène supérieur (Péchox *et al.* 1973). Ce fossé d'effondrement correspond à un demi-graben d'allongement WNW, généré par une série de failles normales à vergence nord. Au cours du Néogène, le jeu de ces failles individualise des blocs basculés vers le nord, engendrant un système antithétique et des dépressions dans lesquelles se concentrent la sédimentation : le bassin du Voiotikos - Kifissos au pied de la faille du Parnasse, le bassin de Reginio au pied de la faille du Kalidromo et le bassin du Golfe Nord d'Evia au pied de la faille de Kamena Vourla (bordure septentrionale du massif du Knimis) (fig.1).

D'un point de vue stratigraphique, on reconnaît au sud un substratum appartenant à la série du Parnasse (marge méridionale des bassins du Voiotikos - Kifissos). Plus au nord, le substratum appartient à l'unité sub-pélagonienne, représenté essentiellement par des calcaires et un complexe ophiolitique (massifs du Kalidromo et du Knimis). Le substratum est localement ennoyé par un épais complexe détritico plio-quaternaire concentré dans les bassins d'effondrement de Reginio et du Golfe Nord d'Evia.

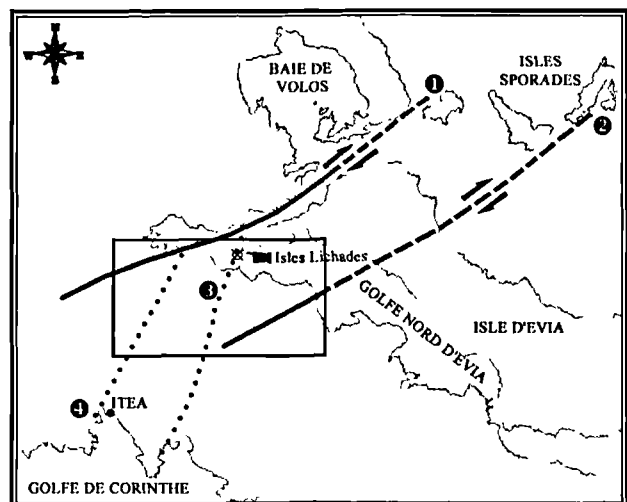


Fig.2. — Localisation des couloirs de cisaillements : ① : faille nord anatolienne ; ② : couloir de cisaillement passant par Livanates. ③ : zone de fracture lithosphérique régionale favorisant les extrusions magmatiques des isles Lichades au cours du Miocène ; ④ : linéament régional décrit par Kranis (1999). Le rectangle représente la région d'étude (fig.1)

Fig. 2. — Location of strike slip faults : 1, north-anatolian fault ; 2, strike slip fault passing from Livanates ; 3, lithospheric fracture zone favorising magmatic extrusion during Miocene in Lichades islands ; 4, regional lineation described by Kranis (1999). The rectangle represents the study area (fig. 1).

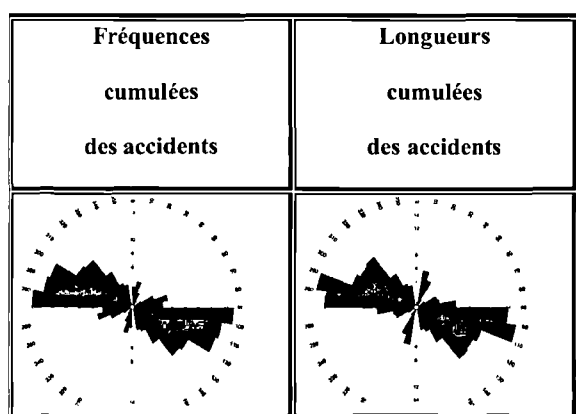


Fig. 3. — Répartition des accidents répertoriés sur le schéma structural (fig.1)

Fig. 3. — Fault orientations as presented in the structural map.

D'un point de vue structural, l'ensemble des séries bassinales plio-quaternaires sont affectées par trois phases tectoniques distinctes (Philip, 1974 ; Rondogianni, 1984 ; Mercier *et al.*, 1979 ; Mercier, 1980) : une première phase extensive d'âge Pliocène à Quaternaire ancien provoquant un allongement de direction NE-SW ; une phase compressive intermédiaire de courte durée et de faible ampleur attribuée à un âge quaternaire ancien avec une direction de raccourcissement N-S ; une seconde phase extensive quaternaire avec une direction d'allongement NW-SE. Cette phase se poursuit dans l'actuel et caractérise l'évolution de la bordure occidentale du Golfe Nord d'Evia.

D'après Kranis (1999), la structuration du massif du Kalidromo et du Knimis résulterait d'une rotation exercée à la fois sur un axe horizontal et vertical. La rotation autour d'un axe vertical serait le résultat d'une déformation tangentielle entre deux couloirs de cisaillement majeurs : la faille Nord Anatolienne (①, fig.2) et un autre couloir parallèle au premier passant par Livanates et se poursuivant à travers l'île d'Evia jusqu'aux îles des Sporades (②, fig.2). La rotation autour d'un axe horizontal serait provoquée par l'activité des grandes failles E-W à NW-SE provoquant un basculement antithétique des blocs.

III. — DESCRIPTION DES DONNEES

1) Données macrostructurales

Les directions et longueurs cumulées des accidents répertoriés par Kranis (1999), l'IGME (1989), Philip (1974) et Mettos *et al.* (1992) et nos données personnelles sont synthétisées sous forme de rose diagramme (fig. 3). Deux familles de directions majeures ressortent de cette représentation :

a) Les directions E-W à NW-SE (N90-N140)

Elles correspondent à l'orientation des grandes failles délimitant les marges méridionales et septentrionales des bassins intra-montagneux (Voiotikos Kifissos - Reginio) ainsi que la marge méridionale du bassin d'effondrement du

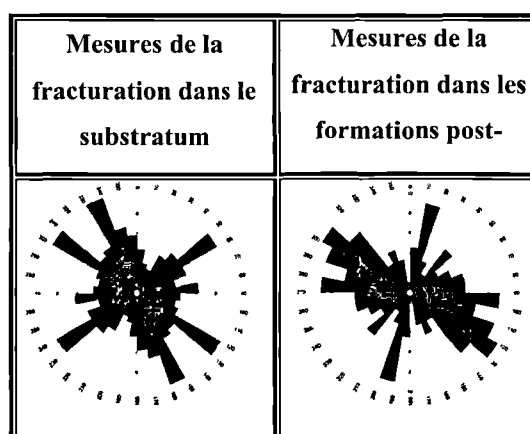


Fig. 4. — Répartition des mesures de fracturation

Fig. 4. — Measured fracture orientations.

Golfe Nord d'Evia. Leur répartition au sein du rose-diagramme révèle un éventail de directions assez large (50°) avec une prédominance des directions N90-110. Cet éventail correspond à un changement progressif de l'orientation de ces grandes failles d'est (N90) en ouest (N140). De la même manière, la direction de l'axe du bassin de Reginio varie d'est en ouest avec un axe E-W dans la région de Zeli, passant progressivement à un axe NW-SE au sud de Molos. On notera que le bassin s'élargit notablement vers le nord-ouest.

Les failles se développant sur ces directions présentent presque toutes un jeu normal accompagné fréquemment d'une composante décrochante dextre (faille au contact entre le Kalidromo et le bassin de Reginio) ou sénestre (failles bordières au nord du massif du Knimis) (Kranis, 1999). Cependant, Kranis (1999) attribue un jeu inverse à composante décrochante aux deux grandes failles délimitant le flanc sud et SW du Knimis.

b) Les directions NNE-SSW (N0-N30)

La majorité de ces segments sont orientés N10-N20 (fig.3). Leur densité est proportionnellement plus importante que leur fréquence, signifiant que les accidents auxquels ils se rapportent sont peu nombreux mais de grande dimension. Ces accidents s'observent principalement dans le massif du Kalidromo et du Knimis. Les deux plus importants s'observent à l'est de Kamena Vourla et à l'ouest du village de Reginio (fig.1). L'analyse linéamentaire réalisée par Kranis (1999) révèle que le premier présente une extension régionale. En effet, vers le sud, il se poursuit jusqu'au Golfe de Corinthe dans la région d'Antikira. Au nord, il se prolonge dans le Golfe Nord d'Evia et s'aligne avec la ligne de côte de la presqu'île des Lichades. Les décalages observés de part et d'autre de cet accident dans le massif du Knimis laissent supposer qu'il s'agit d'un décrochement sénestre.

Le second accident situé à l'ouest de Reginio découpe le massif du Kalidromo dans sa largeur, provoquant sur son tracé un canyon très étroit et encaissé.

A partir de l'analyse de l'image satellite, Kranis (1999) décrit un autre linéament du même type passant à l'ouest de Molos et se prolongeant jusqu'au Golfe de Corinthe à la

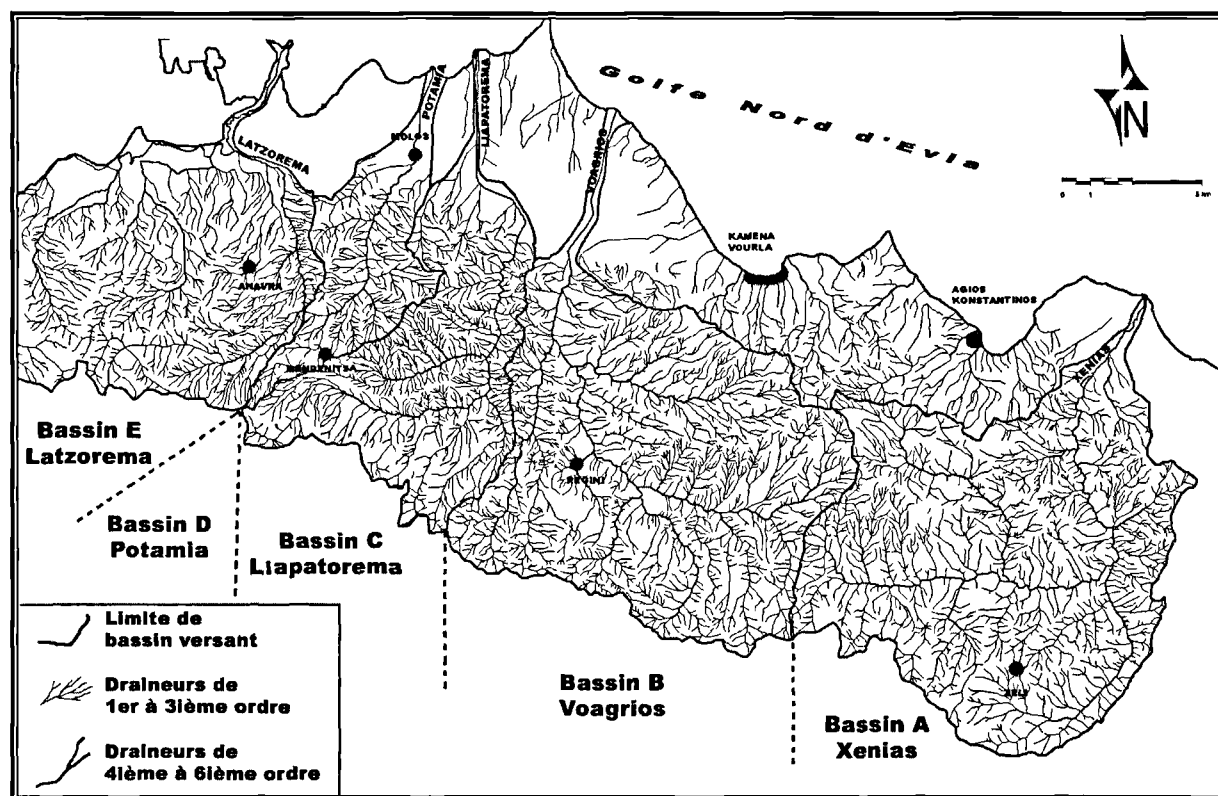


Fig. 5. — Réseau hydrographique de la marge méridionale du Golfe Nord d'Evia

Fig. 5. — Drainage system of the southern margin of North Evia gulf.

hauteur de Itéa (⊙, fig.2). Ce dernier passe au niveau de la marge occidentale du bassin Voiotikos Kifissos, au sud du massif du Kalidromo.

Ces accidents ne semblent pas affecter directement la sédimentation plio-quaternaire du bassin de Reginio. Leur importance sera cependant discutée dans un prochain paragraphe.

L'analyse visuelle de la carte structurale révèle deux autres familles de directions qui n'apparaissent pas sur la représentation en rose-diagramme :

c) *Les directions NNW-SSE (N160- N170)*

Elles correspondent à des linéaments de grande ampleur qui affectent essentiellement le substratum (Kalidromo et Knimis). Ils s'expriment soit par des flexures mises en évidence par le remplissage des bassins quaternaires (fig. 1 : marge orientale du bassin Voiotikos, flexure à l'ouest d'une ligne Kalidromo / Modi, flexure à l'ouest de la ligne Trano Livadi / Elatia, flexure à l'ouest du village de Zéli), soit par des accidents ou ils provoquent de forts décalages horizontaux et verticaux (marge occidentale du bassin Voiotikos, failles segmentant le substratum pointant au milieu du bassin Voiotikos Kifissos, faille d'Anavra sur la bordure occidentale du bassin de Reginio).

D'une manière générale, ces accidents et flexures segmentent les accidents E-W et ESE-WNW en y générant

des décalages importants. C'est le cas au niveau du passage entre les deux ombilics de subsidence du bassin de Voiotikos Kifissos où, selon Kranis et Papanikolaou (2001), les failles bordières qui délimitent la marge méridionale de ces derniers sont interrompues par des accidents NNW-SSE. La klippe de l'unité sub-pélagonienne qui repose sur l'unité du Parnasse au SW d'Amfikléia n'est donc pas détachée du corps principal de l'unité sub-pélagonienne affleurant dans le massif du Kalidromo.

D'après Kranis et Papanikolaou (2001), ces accidents ont une origine alpine anté-néogène et sont réactivés avec un jeu normal pendant la période d'extension néogène.

d) *Les directions NE-SW (N50-N70)*

Ces accidents s'observent à la fois dans le substratum (Kalidromo, Knimis) et dans les formations post-alpines du bassin de Reginio. Ils sont cependant peu fréquents et leur extension est réduite comparativement aux autres familles de fracturations déjà décrites. Kranis (1999) leur attribue une composante normale dextre dans le bassin de Reginio.

2) **données microstructurales**

Un total de 315 failles et diaclases ont été mesurées dans 14 stations différentes réparties sur l'ensemble du secteur et des formations (10 stations avec 226 mesures dans le substratum, 4 stations avec 89 mesures dans les formations post-alpines).

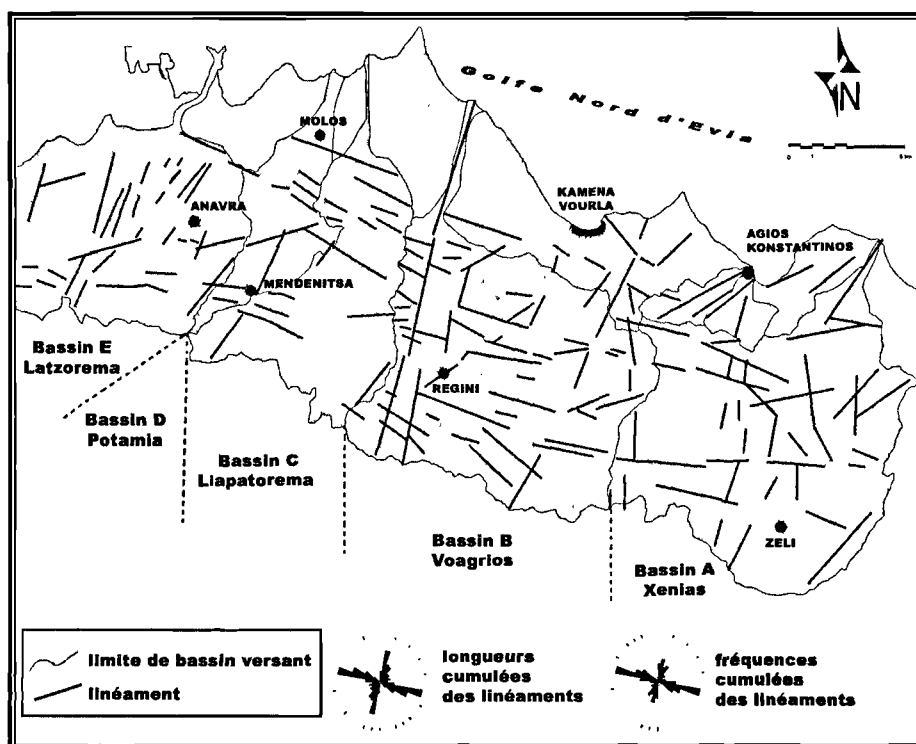


Fig. 6. — Interprétation linéamentaire du réseau hydrographique.

Fig. 6. — Linear interpretation of the drainage system.

	Global	1 ^{er} ordre	2 ^{ème} ordre	3 ^{er} ordre	4 ^{ème} ordre	5 ^{er} ordre	6 ^{ème} ordre
Substratum							∅
formations post alpines							

Fig. 7. — Répartition de la densité du réseau hydrographique en fonction du substrat

Fig. 7. — Density orientation of the drainage system in relation to the sub-pelagonian substratum.

L'analyse statistique de ces mesures révèle que certaines directions de fracturation décrites précédemment apparaissent préférentiellement dans le substratum et/ou dans les formations post-alpines (fig.4).

Dans le substratum, 3 directions de fracturations principales ont été enregistrées :

Une première direction NNW-SSE (N150-170), correspondant aux flexures et accidents majeurs décrits dans le substratum. Les tectoglyphes mesurés sur certaines failles révèlent un jeu normal fréquemment associé à une

composante décrochante dextre, plus rarement sénestre. D'après les directions de raccourcissement et d'allongement déduites par Philip (1974) lors des différents épisodes tectoniques plio-quaternaires, ces accidents adoptent une composante décrochante variable selon le régime tectonique en vigueur.

Une seconde direction NW-SE (N120-N130) correspondant aux grandes failles normales parallèles au Golfe Nord d'Evros. Les bordures nord des massifs du Kalidromo et du Knimis montrent fréquemment des plans de failles de grande extension, parfaitement conservés.

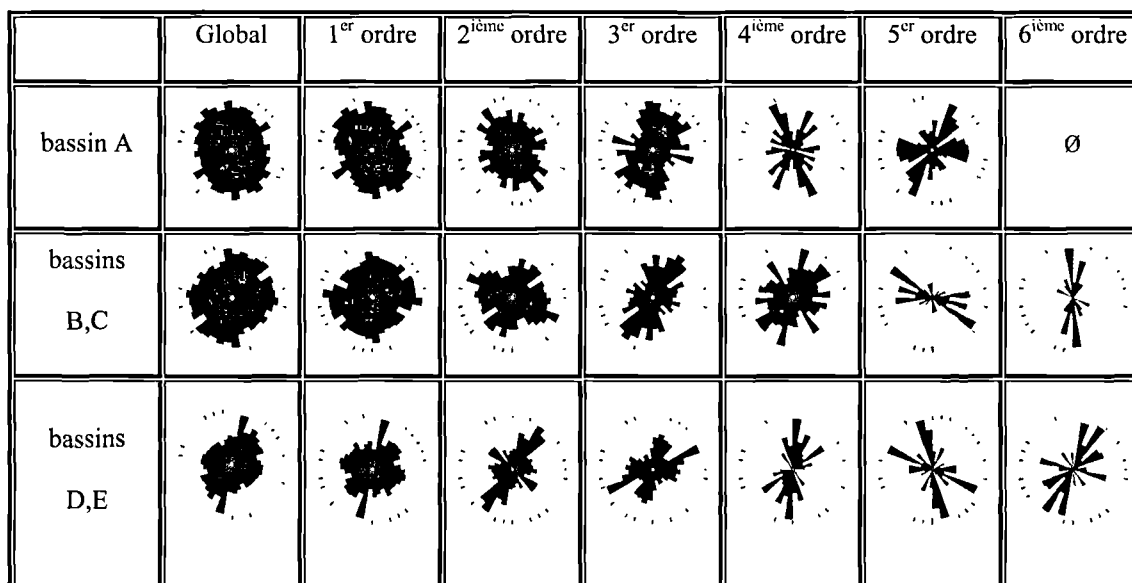


Fig. 8. — Répartition géographique de la densité du réseau hydrographique (cf. fig. 5 pour la localisation des bassins versants).

Fig. 8. — Geographic distribution of the drainage system density (cf. Fig. 5 for location of the drainage basins).

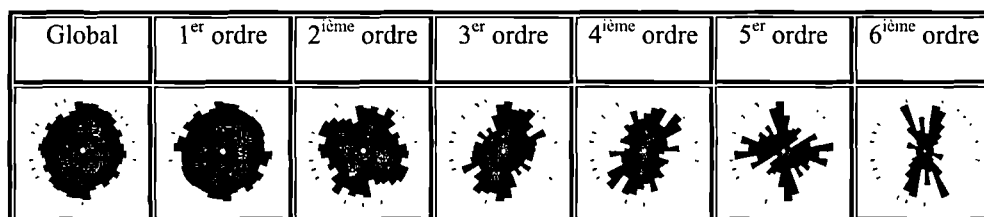


Fig. 9. — Répartition de la densité du réseau hydrographique tous substrats et régions confondus.

Fig. 9. — Density orientation of the drainage system including post-alpine regional and sub-pelagonian substratum trends.

Une direction NE-SW (N50-N60). Peu de tectoglyphes ont été observés sur ces directions et les jeux mesurés sont variables (normaux ou décrochants). Kranis (1999) décrit certains d'entre eux dans la partie occidentale du bassin de Reginio et leur attribue un jeu normal dextre.

Dans les formations post-alpines, seules deux directions de fracturations principales ressortent clairement :

- Les directions E-W à NW-SE (N90-140), représentant l'ensemble des failles normales contrôlant les aires de dépôt des bassins néogènes

- Les directions NNE-SSW (N10-20) correspondant aux failles transverses qui segmentent le substratum. Les failles et diaclases mesurées n'ont pas permis de préciser le comportement de ce type de fracturation d'un point de vue microstructural.

D'une manière générale, les directions de fracturation mesurées dans chaque station révèlent une excellente concordance avec les failles cartographiées ou les linéaments décelés lors de l'analyse du réseau hydrographique.

3) Données du réseau hydrographique

a) Analyse de l'agencement général du réseau

Le sens d'écoulement général de la zone étudiée suit une pente régulière du sud (Kalidromo) vers le nord (côte du Golfe Nord d'Evia) (fig.5). Le massif du Knimis représente cependant un obstacle. Sur son versant méridional, il provoque une déviation des écoulements vers le sud-ouest ou vers l'est. Cette déviation est également favorisée par un pendage global vers le sud des formations plio-quaternaires du bassin de Reginio, générant un relief de *cuestas*

Dans la partie occidentale du bassin de Reginio, le cours supérieur de la rivière Liapatorema longe le contact entre le massif du Kalidromo et les formations plio-quaternaires en empruntant brusquement le tracé de la faille bordière du Kalidromo. La majeure partie des écoulements du flanc ouest de la rivière s'effectue vers le sud-est, individualisant une nouvelle fois un versant dont la pente est opposée au sens d'écoulement général vers le nord. Cette configuration a pour conséquence de tronquer le bassin versant de la rivière Potamia dont la surface de drainage s'élargit paradoxalement en aval.

Dans la partie amont de la rivière Potamia les premiers thalwegs empruntent le tracé de la faille bordière du Kalidromo.

Dans les formations du substratum situées à l'ouest du bassin de Reginio, les écoulements s'effectuent globalement du sud vers le nord et révèlent un réseau de drainage dendritique à tendance radiaire à l'extrémité ouest de la région étudiée.

b) Analyse linéaire à partir du réseau hydrographique

L'étude de l'agencement du réseau hydrographique a donné lieu à une analyse linéaire dont les directions ont été reportées dans deux rose-diagrammes (fig.6). Deux grandes directions de linéaments s'individualisent :

Les linéaments WNW-ESE (N100-120)

Ces linéaments correspondent à l'orientation des failles normales qui se développent parallèlement au bassin d'effondrement du Golfe Nord d'Evia. Le plus grand d'entre eux correspond à la faille bordant le massif du Kalidromo (fig.1). Cette dernière constitue une limite morphologique notable entre la région montagneuse du massif du Kalidromo et le relief collinaire du bassin de Reginio. Elle se matérialise par un alignement de draineurs précédé d'une diminution sensible de la densité du réseau sur les premiers reliefs du massif du Kalidromo. Dans la région de Mendenitsa (fig.6), la faille provoque un alignement de draineurs de 3^{ème} et 5^{ème} ordre qui se poursuit dans le substratum jusqu'à la dépression du bassin de Sperchios. Elle est également marquée par un changement brutal du type d'écoulement, avec un réseau sub-parallèle dans le substratum et un réseau dendritique bien développé dès les premières formations plio-quadernaires du bassin de Reginio.

L'analyse linéaire met en évidence de nombreuses répliques de cette faille dans le massif du Knimis et les séries plio-quadernaires.

Les linéaments NNE-SSW (N0-N20)

Les rose-diagrammes de la figure 3 montrent que l'extension de ces linéaments est proportionnellement plus grande que leur fréquence. La majeure partie correspond à l'orientation des draineurs principaux qui coupent à l'emporte pièce l'ensemble des séries et s'orientent perpendiculairement à la côte.

Le plus important de ces linéaments prend naissance dans le bassin du Voiotikos Kifissos, à l'ouest du village de Modi (fig.1). Il traverse le massif du Kalidromo et le bassin de Reginio dans leur intégralité (fig.6, l'ouest du village de Regini) et se poursuit jusque sur la côte du Golfe Nord d'Evia, dans la plaine deltaïque de Molos. Un autre linéament de grande extension prend naissance dans le massif du Kalidromo, à égale distance entre Elatia et Modi. Il se poursuit jusque sur la côte en traversant le bassin de Reginio et le massif du Knimis. Un troisième, dont le tracé est plus diffus s'observe depuis l'ouest de Zeli jusqu'à Agios Konstantinos.

Enfin, à l'ouest du bassin de Reginio, une série d'alignements de draineurs de 1^{er} à 4^{ème} ordre segmentent le substratum sur ces mêmes directions (région d'Anavra).

c) Analyse statistique du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique a été traité et analysé au moyen d'un système d'information géographique (SIG) à partir de la digitalisation du réseau figurant sur les cartes topographiques au 1/50000^{ème} de Styliis, Amfikleia, Pelasya et Elatia. La classification des branches a été réalisée en appliquant la méthode de Strahler (1954).

L'ensemble des données issues de cette méthode de classement est présentée sous forme de rose-diagrammes (fig. 7, 8, 9). Ces derniers synthétisent la distribution des longueurs cumulées, soit de l'ensemble des branches, soit en individualisant chaque ordre, dans une région donnée.

La présentation des directions d'écoulement est effectuée selon trois critères :

- un critère géologique en distinguant les écoulements qui se développent sur le substratum et les écoulements qui se développent sur les formations post-alpines (fig. 7). Le substratum est essentiellement formé par des roches compactes (calcaires, roches métamorphisées et des ophiolites). Au contraire, les formations post-alpines sont composées majoritairement de roches détritiques meubles ou tendres comme des sables, des conglomérats et des argiles. L'érosion qui s'exerce sur ces dernières est par conséquent beaucoup plus rapide que sur le substratum.

- un critère géographique en divisant la zone d'étude en trois secteurs géographiques d'est en ouest, tous types de substrat confondus (fig.8). Cette division est effectuée à partir de la distinction des bassins versants (fig.5 et 6).

- un critère basé uniquement sur la classification des branches du réseau afin de définir les caractéristiques propres à chacun des ordres (fig.9).

Cette analyse révèle l'existence de 4 directions d'écoulement principales similaires aux directions de fracturation décrites précédemment.

Les directions d'écoulement NNE-SSW sont les plus fréquentes quel que soit le substrat ou la région considérée. Dans le substratum, elles sont prédominantes du 1^{er} au 4^{ème} ordre et elles constituent pratiquement les seules directions empruntées par les draineurs de 3^{ème} ordre. On observe les mêmes caractéristiques sur les formations post-alpines mais ces écoulements se répartissent sur un éventail directionnel plus large et sont associés à d'autres directions. On notera également que ces directions sont largement empruntées par les draineurs de 5^{ème} ordre dans le bassin oriental (A) et pratiquement inexistantes de ce même ordre dans les bassins B et C (fig.5 et 6). On les retrouve par contre en forte proportion dans le 6^{ème} ordre de ces derniers.

Les directions E-W à NW-SE n'apparaissent que dans les réseaux de 1^{er}, 2^{ème} et 5^{ème} ordre, ainsi que dans le 6^{ème} ordre du bassin C dans une moindre proportion. Elles sont beaucoup plus développées sur les formations post-alpines, notamment dans le 5^{ème} ordre, que sur le substratum. Leur densité reste assez constante d'est en ouest.

Les directions NE-SW sont les plus fréquentes sur le substratum, après les NNE-SSW. Elles apparaissent principalement dans le 1^{er} et 4^{ème} ordre. Elles sont également bien représentées sur les formations post-alpines par les

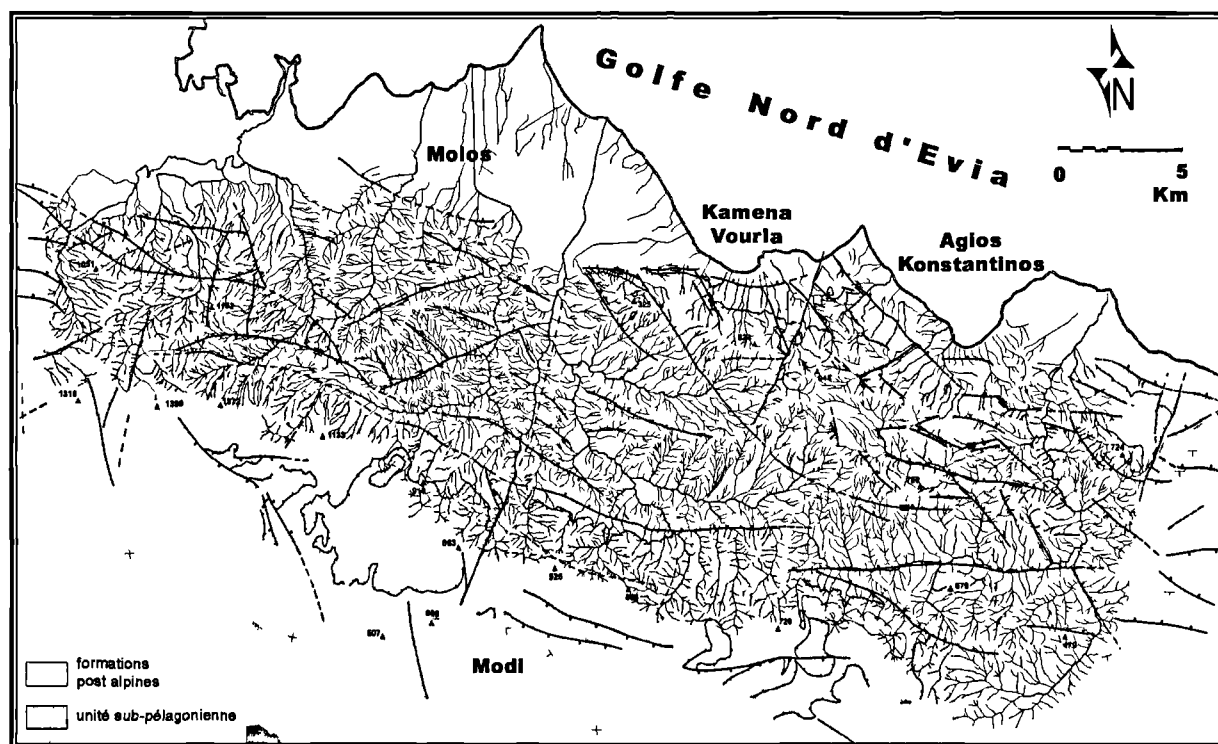


Fig. 10. — Superposition de la carte structurale de Kranis (1999) et du réseau hydrographique

Fig. 10. — Combined map of the drainage system and the Kranis (1999) structural map.

draineurs du 1^{ier} au 4^{ième} ordre. Globalement, leur densité est plus forte à l'ouest (bassin C) qu'à l'est (bassins A et B).

Enfin les directions d'écoulement NNW-SSE s'observent sur les 2 types de substrat. Elles se confondent souvent avec les directions NNE-SSW (au niveau du 1^{ier} au 4^{ième} ordre). Elles sont fréquentes, voire prédominantes dans les 5^{ième} et 6^{ième} ordre. Leur densité varie notablement d'est en ouest, avec un développement important dans le bassin A et une diminution progressive jusqu'au bassin C.

IV. — DISCUSSION

La comparaison entre les structures tectoniques et l'agencement du réseau hydrographique révèle l'influence considérable du canevas structural sur le développement du réseau hydrographique. On observe en effet une excellente corrélation entre les principales directions de fracturations et les directions préférentiellement empruntées par les draineurs (fig.3, fig.6, fig.10). Au total, quatre grandes familles structurales s'individualisent quelle que soit l'approche analytique considérée. Si certaines d'entre elles sont parfaitement connues (structures E-W à NW-SE, parallèles à l'allongement du Golfe Nord d'Evia, fracturation NE-SW dans le bassin de Reginio) et largement décrites (Philipp 1974 ; Lemeille, 1977 ; Jackson and McKenzie, 1994 ; Rondoyianni, 1984 ; Roberts and Jackson, 1991 ; Leeder and Jackson, 1993 ; Ganas, 1997 ; Kranis, 1999), l'analyse linéaire et directionnelle du réseau hydrographique révèle une nette prédominance de structures orientées NNE-

SSW et l'omniprésence de structures orientées NNW-SSE (fig. 11).

Ces deux dernières sont peu décrites à ce jour et leur comportement cinématique n'est pas encore clairement déterminé. Nous nous proposons ici de nous focaliser sur ces dernières et d'apporter des hypothèses sur l'origine et le fonctionnement des accidents auxquels elles se rapportent en les intégrant dans le modèle tectonique régional actuel.

1) Les accidents NNE-SSW

Dans le bassin de Reginio, l'épaisseur de la série sédimentaire varie largement d'est en ouest. La sédimentation post-alpine vient enlever une paléomorphologie existante qui, dans la partie orientale du bassin, n'est plus complètement recouverte et laisse fréquemment apparaître le substratum sous-jacent entre les massifs du Knimis et du Kalidromo. C'est dans cette région que l'on enregistre les épaisseurs de dépôts post-alpins les plus faibles (estimées à environ 900m). Dans sa partie occidentale, le bassin débouche directement sur la plaine deltaïque de Molos et l'ensemble de la série de dépôts n'est pas accessible dans ce secteur. Cependant, une estimation basée sur le dénivelé et le pendage moyen des séries permet d'évaluer son épaisseur à plus de 2000m. La configuration du bassin de Reginio laisse donc supposer que ces accidents individualisent des compartiments à subsidence variable.

L'analyse de l'image satellite par Kranis (1999) montre que les épanchements basaltiques du Miocène qui forment les îles Lichades à l'extrémité NW de l'île d'Evia s'alignent sur

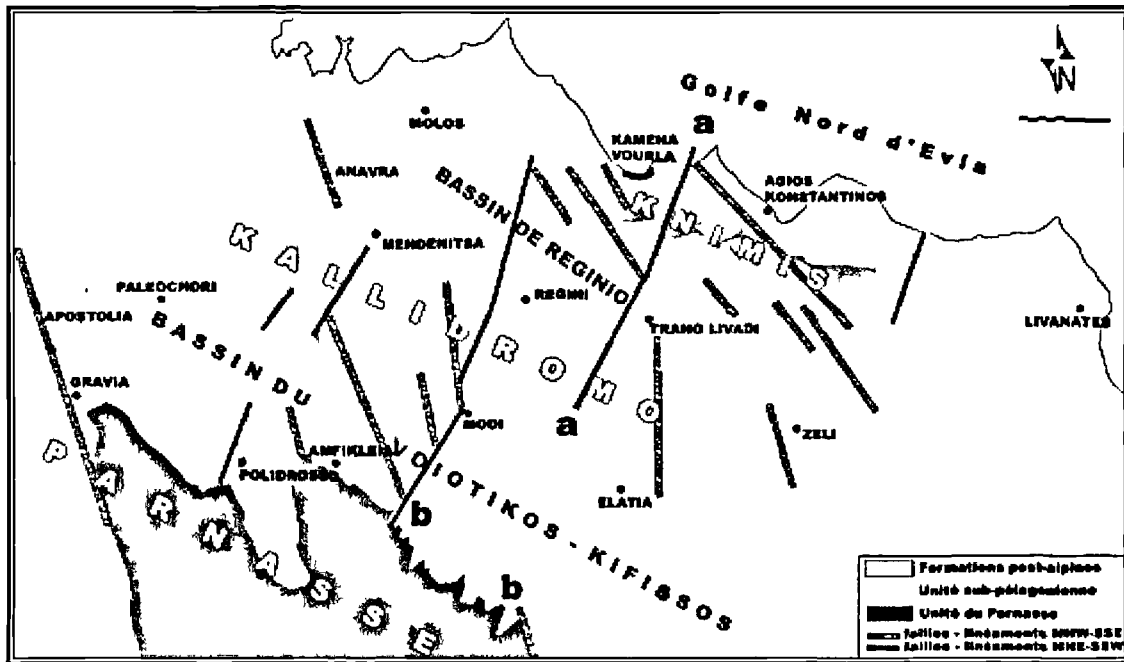


Fig. 11. — Localisation des failles et linéaments NNE-SSW et NNW-SSE ; a) accident NNE-SSW se prolongeant jusqu'aux îles Lichades dans le golfe d'Evia ; b) zone de contournement oriental de l'unité sub-pélagonienne.

Fig. 11. — Location of the NNE-SSW and NNW-SSE faults and lineations; a) NNE-SSW fault affecting the Lichades islands in North Evia gulf; b) Deviation zone of the Sub-Pelagonian unit.

le tracé de l'un de ces principaux accidents NNE-SSW qui découpent le bassin de Reginio et le massif du Kalidromo (a, fig.10 et ③, fig.2). Cet accident pourrait ici correspondre à une zone de fracture lithosphérique régionale favorisant les extrusions magmatiques pendant l'épisode extensif miocène. S'il reste difficile de préciser sa cinématique sur le terrain, l'activité récente, voire actuelle de cet accident est attestée par une adaptation du réseau hydrographique sur son axe avec un alignement remarquable de draineurs de 2^{ème} et 3^{ème} ordre. Kranis (1999) lui attribue une composante sénestre en raison de décalages observés dans les séries du massif du Knimis.

Kranis (1999) signale d'autre part que cet accident marquerait la limite entre deux zones de fracturations E-W à NW-SE située sur la marge septentrionale du Knimis (faille de Kamena Vourla à l'ouest, faille d'Agios Konstantinos à l'Est) et dont la cinématique serait différente de part et d'autre de cet accident transverse.

Poulimenos (2000) décrit des accidents identiques dans le golfe de Corinthe, et signale qu'ils montrent des déplacements verticaux normaux de l'ordre de 250m. Ils sont dans cette région également associés à une direction de fracturation majeure en failles normales sur N110-N120 (Doutsos *et al.*, 1988 ; Poulimenos *et al.*, 1989). Ces deux types d'accidents (NNE-SSW et E-W) sont actifs simultanément, générant un découpage rectangulaire qui individualise des aires de sédimentation à subsidence variable (Poulimenos *et al.*, 1993) (fig.12).

2) Les accidents NNW-SSE

Leur origine est probablement bien antérieure aux phases tectoniques plio-quadernaires. Le fonctionnement de ces

accidents est probablement contemporain de la période de mise en place de l'unité sub-pélagonienne sur l'unité du Parnasse. En effet, lors de la mise en place des nappes, la migration de l'unité sub-pélagonienne vers le SW est perturbée au contact du massif du Parnasse qui constitue un obstacle et contre lequel elle vient buter à la hauteur du bassin actuel de Voiotikos Kifissos. L'absence de série appartenant à l'unité sub-pélagonienne dans la zone du Parnasse laisse suggérer que la totalité du massif du Parnasse n'a pas été recouvert par ces formations allochtones et qu'il constituait par conséquent une zone de contournement lors de la migration de la nappe sub-pélagonienne. Une telle configuration laisse suggérer que la semelle de charriage de l'unité sub-pélagonienne se verticalise au niveau du contact frontal avec le Parnasse et qu'elle continue sa migration vers le SW en le contournant sur son flanc oriental. Ces accidents sub-méridiens s'observent précisément au niveau de la zone de contournement. Ils pourraient par conséquent être assimilés à des décrochements jouant le rôle de rampe latérale en provoquant un découpage en échelon du front de charriage (b, fig.11).

De la même manière que les accidents NNE-SSW, ils ont pu également jouer un rôle important dans le compartimentage des bassins plio-quadernaires dès les premiers épisodes extensifs du Miocène.

Il est difficile de quantifier l'activité de ces accidents au cours du Néogène. Kranis et Papanikolaou (2001) signalent que certains d'entre eux observés au contact entre l'unité du Parnasse et l'unité sub-pélagonienne sur la marge méridionale du bassin de Voiotikos Kifissos à la hauteur du village d'Amfikleia présentent des signes d'extension vers le NE au cours du Néogène.

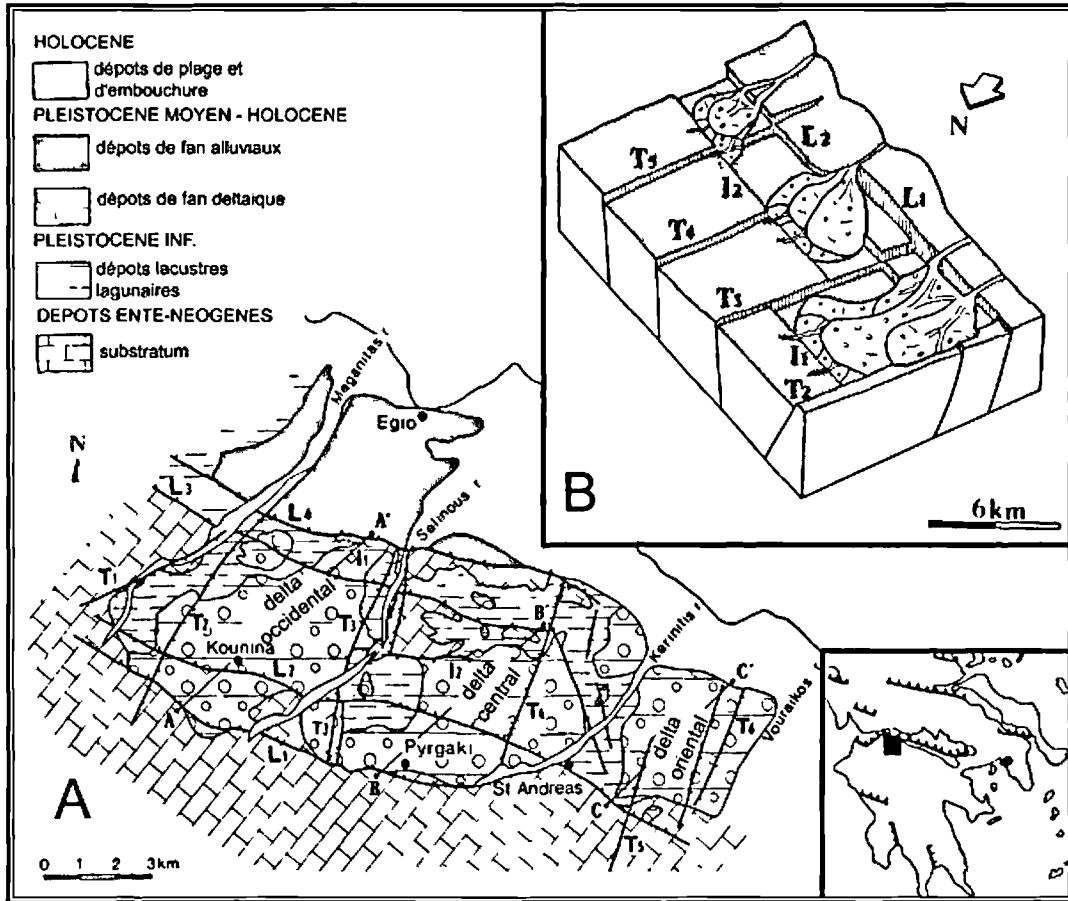


Fig. 12. — A : carte géologique de l'extrémité sud ouest du graben de Corinthe, montrant la répartition des dépôts quaternaires avec les principales failles normales orientées WNW et les failles transverses orientées ENE ; B : bloc diagramme illustrant la même région avec représentation des blocs à subsidences variables durant la sédimentation des fan deltaïques. D'après Poulimenos *et al.* (1993).

Fig. 12. — A : Geologic map of the SW extremity of Corinthos graben, showing the distribution of the quaternary deposits with the main WNW faults and the transverse ENE faults; B : block-diagram of the same region with the subsident blocks during the fan delta sedimentation (from Poulimenos *et al.* (1993).

V. — CONCLUSIONS

L'analyse conjuguée du canevas structural et du réseau hydrographique révèle un contrôle tectonique prépondérant sur l'agencement et le développement du tracé hydrographique. Quatre directions de structuration ressortent des analyses structurales et hydrographiques : tout d'abord les structures E-W à NW-SE qui correspondent à l'allongement des grandes failles normales qui génèrent le découpage en horsts et grabens parallèles au Golfe Nord d'Évia ; les structures NE-SW sont héritées des phases tectoniques alpines et sont faiblement réactivées durant les phases tectoniques post-alpines, générant des mouvements normaux à tendance décrochante.

Si ces deux directions de fracturation sont connues et ont déjà été largement signalées, l'analyse morphométrique de chacun des ordres définit à partir de la classification de Strahler (1954) met en évidence la prédominance de grandes directions de fracturation NNE-SSW quel que soit l'ordre des draineurs ou le secteur considéré. Ces fracturations sont empruntées par la plupart des cours d'eaux principaux qui aboutissent à la côte du Golfe Nord d'Évia. Les importantes

variations d'épaisseur décelées de part et d'autre de certains de ces accidents dans le bassin de Reginio révèlent que ces derniers correspondent à des failles transverses qui individualisent des compartiments à subsidence variable pendant la sédimentation. Leur extension dépasse fréquemment le cadre de la marge méridionale du Golfe Nord d'Évia. L'association de l'un de ces accidents avec un volcanisme basique aux niveaux des îles Lichades laisse supposer qu'il pourrait correspondre à l'expression superficielle d'un accident lithosphérique.

L'analyse microstructurale et la méthode de classification des draineurs de Strahler (1954) met en évidence une autre direction de structuration NNW-SSE, moins prononcée que les autres directions mais qui s'individualise essentiellement au niveau du substratum ou des cours d'eau de 5^{ème} et 6^{ème} ordre. Cette direction semble héritée de la période de mise en place de l'unité sub-pélagonienne sur l'unité du Parnasse. Les accidents qui s'y rapportent sont assimilés à des décrochements jouant le rôle de rampe latérale en provoquant un découpage en échelon du front de charriage. Certains d'entre eux sont par la suite réactivés lors des phases tectoniques extensives post-alpines.

BIBLIOGRAPHIE

- DOUSOS, T., KONTOPOULOS, N., POULIMENOS, G., (1988). — The Corinth-Patras rift as the initial stage of continental fragmentation behind an active island arc (Greece). — *Basin Research* 1, p. 177-190.
- GANAS, A., 1997. — Fault segmentation and seismic hazard assessment in the Gulf of Evia rift, Central Greece. Unpublished PhD Thesis, Univ. of Reading, p. 1-369.
- GANAS, A., ROBERTS, G.P., and MEMOU, T. (1998). — Segment boundaries, the 1894 ruptures and strain patterns along the Atalanti Fault, Central Greece. *J. Geodynamics* vol.26, n°2-4, p. 461-486.
- GOLDSWORTHY, M., JACKSON, J., (2001). — Migration activity within normal fault systems : examples from the Quaternary of mainland Greece. *Journal of Structural Geology* vol 23 (2001), p. 489-506.
- IGME, (1989). — Seismo-tectonic map of Greece, with seismogeological data. 1:500 000, Institute of Geology and Mineral Exploration.
- JACKSON, J., MCKENZIE, D., (1994). — Active tectonics of the Aegean region. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 22, p. 239-271.
- JACKSON, J., MCKENZIE, D., (1999). — A hectare of fresh striations on the Arkitsa Fault, Central Greece. *Journal of Structural Geology*, 21, p 1-6.
- KRANIS, H. D., (1999). — Neotectonic activity of fault zones in Lokris, central-eastern mainland Greece. PhD Thesis, Athens, Univ. of Athens, p. 1-234.
- KRANIS, H.D., PAPANIKOLAOU, D.I., (2001). — Evidence for detachment faulting on the NE Parnassos mountain front (Central Greece). — *Bull. Geol. Soc. Greece*, vol. XXXIV/1, p. 281-287.
- LEEDER, M. R., JACKSON, J. A., (1993). — The interaction between normal faulting and drainage in active extensional basins, with example from the western *United States and Central Greece*. *Basin Research*, 5, p 79-102
- LEMEILLE, F., (1977). — Etudes néotectoniques en Grèce centrale nord-orientale (Eubée centrale, Attique, Béotie, Locride et dans les Sporades du Nord-Skiros). — Thèse 3^e cycle, Université de Paris XI, p. 1-173.
- MAKRIS, J., PAPOULIA, J., PAPANIKOLAOU, D., STAVRAKAKIS, G., (2001). — Thinned continental crust below northern Evoikos Gulf, Central Greece, detected from deep seismic sounding. *Tectonophysics* vol. 341 (2001), p. 225-236.
- MERCIER, J.-L., (1980). — extensional-compressional tectonics associated with the aegean Arc. Comparison with the Andean cordillera of South Peru and North Bolivia. *Phil.Trans. R. Soc. London*, A, 300, p. 337-355.
- MERCIER, J.-L., DELIBASSIS, N., GAUTHIER, A., JARRIGE, J.-L., LEMEILLE, F., PHILIP, H., SERBIER, M. AND SOREL, D., (1979). — Néotectonique de l'Arc Egéen. *Rev. Geol. Dyn. Geogr. Phys.*, vol. 21, n°1, p. 67-92.
- METOS, A., RONDOGIANNI, TH., IOAKIM, CH., PAPADAKIS, I., (1992). — Evolution géodynamique et reconstruction paléoenvironnementale des bassins néogènes-quadernaires de la Grèce Centrale. *Paleontologia i evolucion*, t.24-25 (1992), p. 393-402.
- PÉCHOUX P.Y., PÉGORARO, O., PHILIP, H., MERCIER, J., (1973). — Déformations mio-pliocènes et quadernaires en extension et en compression sur les rivages du Golfe Maliaque et du Canal d'Atalanti (Egée, Grèce). — *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 276, série D, p. 1813-1816.
- PHILIP H., (1974). — Néotectonique des rivages de égéens en Locride et en Eubée nord-occidentale (Grèce). — Thèse 3^{ème} cycle univ. Des Sciences et Technique du Languedoc. p. 1-78.
- POULIMENOS G., (2000). — Scaling properties of normal fault populations in the western Corinth Graben, Greece: implications for fault growth in large strain settings. *Journal of Structural Geology* vol 22 (2000), p. 307-322.
- POULIMENOS, G., ALBERS, G., DOUSOS, T., (1989). — Neotectonic evolution of the central section of the Corinth graben. *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft* 140, p. 173-182.
- POULIMENOS, G., ZELILIDIS, A., KONTOPOULOS, N., DOUSOS, T., (1993). — Geometry of trapezoidal fan deltas and their relationship to extensional faulting along the south-western active margins of the Corinth rift, Greece. *Basin Research* 5, p.179-192.
- ROBERTS, G.P., GANAS, A. (2000). — Fault-slip direction in central and southern Greece measured from striated and corrugated fault planes: Comparison with focal mechanism and geodetic data. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 105 (B10) : p. 23443-23462, Oct 10 2000.
- ROBERTS, S., JACKSON, J. A., (1991). — Active normal faulting in Central Greece: an overview. In: Roberts, A. M., Yielding, G, Freeman, B., (Eds), The geometry of normal faults. *Geological Society of London Special Publication*, vol. 56, p. 125-142.
- RONDOGIANNI, TH., (1984). — Etude néotectonique des ravages occidentaux du canal d'Atalanti (Grèce Centrale). — Thèse 3^{ème} cycle univ. Paris XI. p. 1-190.
- STRAHLER, A., (1954). — Statistical analysis in geomorphic research. *Journal of Geology*, 62, p. 1-25.

MÉMOIRES (*)

Tome I	n° 1. — Ch. BARROIS, <i>Recherches sur le terrain crétacé de l'Angleterre et de l'Irlande</i> , 1876, 232 p.	51,20 €
	n° 2. — P. FRAZER, <i>Géologie de la partie Sud-Est de la Pennsylvanie</i> , 1882, 178 p.	38,40 €
	n° 3. — R. ZEILLER, <i>Mémoire sur la flore houillère des Asturies</i> , 1882, 24 p.	5,50 €
Tome IV	n° 1. — J. GOSSELET, <i>Etudes sur les variations du Spirifer Verneuilli</i> , 1894, 63 p., 7 pl.	13,75 €
Tome VI	n° 1. — P. BERTRAND, <i>Etude du stipe de l'Adelophyton jutieri</i> , B. Renault, 1907, 38 p., 4 pl.	13,00 €
	n°2. — J. GOSSELET <i>et al.</i> , <i>Faune siluro-dévonienne de Liévin</i> , 1912-1920. Fasc. 2.	51,20 €
	n°3. — V.COMMONT, <i>Saint-Acheul et Montières : Notes de Géologie, de Paléontologie et de Préhistoire</i> , 1909, 68 p., 3 pl.	23,75 €
Tome VII	n°1. — P. BERTRAND, <i>Etude des Stipes d'Asterochloena laxa</i> , Stenzel, 1911, 72 p., 6 pl.	15,55 €
Tome VIII	n° 2. — Ed. LEROUX, <i>Le tunnel de l'Ave Maria</i> , 1929, 50 p., 5 pl.	18,30 €
Tome IX	n°1. — G. DUBAR, <i>Etude sur le Lias des Pyrénées françaises</i> , 1925, 332 p., 7 pl.	65,85 €
	n°2. — G. FOURNIER <i>et al.</i> , <i>Poissons élasmodontes de Denée</i> , 1926, 23 p., 6 pl.	14,65 €
Tome X	n° 2. — J. LAVERDIERE, <i>Terrains paléozoïques des Pyrénées occidentales</i> , 1931, 132 p., 8 pl.	27,50 €
Tome XII	— D. LEMAITRE, <i>Faune des calcaires dévoniens du Bassin d'Ancenis</i> , 1934, 268 p., 18 pl.	51,20 €
Tome XIII	— P. BRICHE <i>et al.</i> , <i>Flore infraliasique du Boulonnais</i> , 1963, 145 p., 11 pl.	38,40 €
Tome XIV	— G. WATERLOT, <i>Les Gigantostracés du Siluro-Dévonien de Liévin</i> , 1966, 23 p., 5 pl.	13,00 €
Tome XV	— J. MANIA, <i>Gestion des Systèmes aquifères. Applications au Nord de la France</i> , 1978, 228 p.	27,50 €
Tome XVI	— A. BOUROZ <i>et al.</i> , <i>Essai de synthèse des données acquises dans la genèse et l'évolution des marqueurs pétrographiques dans les bassins houillers</i> , 1983, 118 p., 10 pl.	38,10 €

PUBLICATIONS (*)

Publication N° 1. — J. CHOROWICZ, <i>Etude géologique des Dinarides le long de la transversale Split-Karlovac (Yougoslavie)</i>	20,00 €
Publication N° 2. — J. CHARVET, <i>Essai sur un orogène alpin : Géologie des Dinarides au niveau de la transversale de Saravejo (Yougoslavie)</i>	23,00 €
Publication N° 3. — J. ANGELIER, <i>Néotectonique de l'arc égéen</i>	22,00 €
Publication N° 4. — J.J. FLEURY, <i>Les zones de Gavrovo-Tripolitza et du Pinde-Olonos (Grèce continentale et Péloponnèse du Nord). Evolution d'une plate-forme et d'un bassin dans leur cadre alpin</i>	26,70 €
Publication N° 5. — M. COUSIN, <i>Les rapports Alpes-Dinarides. Les confins de l'Italie et de la Yougoslavie</i>	26,70 €
Publication N° 6. — F. THIEBAULT, <i>L'évolution géodynamique des Héliénides externes en Péloponnèse méridional</i>	28,20 €
Publication N° 7. — P. DEWEVER, <i>Radiolaires du Trias et du Lias de la Téthys</i>	27,50 €
Publication N° 8. — J. FERRIERE, <i>Paléogéographie et tectoniques superposées dans les Hellénides internes : les massifs de l'Othrys et du Pélion (Grèce continentale)</i>	28,20 €
Publication N° 9. — H. MAILLOT, <i>Les Paléoenvironnements de l'Atlantique sud : Apport de la géochimie sédimentaire</i>	20,00 €
Publication N° 10. — Cl. BROUSMICHE, <i>Les Fougères sphénoptériennes du Bassin Houllier Sarro-Lorrain</i>	30,00 €
Publication N° 11. — B. MISTIAEN, <i>Phénomènes récifaux dans le Dévonien d'Afghanistan (Montagnes Centrales). Analyse et systématique des Stromatopores</i>	30,00 €
Publication N° 12. — T. HOLTZAPFFEL, <i>Les minéraux argileux. Préparation, analyses diffractométriques et détermination</i> T.T.C.	13,75 €
Publication N° 13. — J.L. MANSY, <i>Géologie de la Chaîne d'Orminaca des Rocheuses aux plateaux intérieurs (Cordillère Canadienne). Evolution depuis le Précambrien</i>	30,00 €
Publication N° 14. — C. BECK, <i>Géologie de la Chaîne Caraïbe au méridien de Caracas (Venezuela)</i>	19,00 €
Publication N° 15. — J.M. DEGARDIN, <i>Le Silurien des Pyrénées : Biostratigraphie, Paléogéographie</i>	19,00 €
Publication N° 16. — J. SIGAL, <i>Les recherches sur les Foraminifères fossiles en France des environs de 1930 à l'immédiat après-guerre</i> T.T.C.	15,00 €
Publication N° 17. — F. DELAY, <i>Etude et cartographie géologiques du Massif pyrénéen de l'Agly (Fasc. 1 : Evolution tectono-métamorphique ; Fasc. 2 : Traitement informatique des microanalyses chimiques ; Fasc. 3 : Carte géol. en couleurs 1/25000 Massif Agly</i> T.T.C. (les 3 fasc.)	54,90 €
Publication N° 18. — A. KHATIR, <i>Structuration et déformation progressive au front de l'allochtone ardennais (Nord de la France)</i> T.T.C.	23,00 €
Publication N° 19. — C. LAMOUROUX, <i>Les mylonites des Pyrénées. Classification. Mode de formation. Evolution</i>	23,00 €
Publication N° 20. — G. MAVRIKAS, <i>Evolution Crétacé-Eocène d'une plate-forme carbonatée des Hellénides externes. La plate-forme des Ori Valtou (Massif du Gavrovo), Zone de Gavrovo-Tripolitza (Grèce continentale)</i>	23,00 €
Publication N° 21. — P. BRACQ, <i>Effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux, apport de l'analyse morphostructurale</i>	23,00 €
Publication N° 22. — N. FAGEL, <i>Flux argileux du Néogène au Quaternaire dans l'Océan Indien Nord, mise en évidence et interprétation</i>	23,00 €
Publication N° 23. — G. BUSSON <i>et A. CORNÉE</i> , <i>L'événement océanique anoxique du Cénomanién supérieur-terminal</i>	19,00 €
Publication N° 24. — B. LOUCHE, <i>Limites littorales de la nappe de la Craie dans la région Nord Pas-de Calais. Relations eaux souterraines-eaux superficielles-mer</i>	23,00 €
Publication N° 25. — J. G. BREHERET, <i>L'Aptien et l'Albien de la fosse vocontienne (des bordures au bassin). Evolution de la sédimentation et enseignements sur les événements anoxiques</i>	46,00 €
Publication N° 26. — T. PLETSCHE, <i>Clay minerals in Cretaceous deep-water formations of the Rif and the Betic Cordillera (N. Morocco and S. Spain)</i>	19,00 €
Publication N° 27. — E. VENNIN, <i>Architecture sédimentaire des Bioconstructions permo-carbonifères de l'Oural méridional (Russie)</i>	27,50 €
Publication N° 28. — <i>Actes des 1^{ères} journées régionales Nord/Pas-de-Calais du Patrimoine géologique</i>	15,00 €
Publication N° 29. — F. LACQUEMENT, <i>L'Ardenne Varisque. Déformation progressive d'un prisme sédimentaire préstructuré ; de l'affleurement au modèle de chaîne</i>	26,70 €
Publication N° 30. — R. PLATEVOET, <i>Diversité des formations pyroclastiques s.l. du strato-volcan du Cantal au Miocène. Elaboration d'une méthodologie de corrélation</i>	26,70 €

Les membres abonnés bénéficient d'une réduction de 20% sur un exemplaire de chacune de ces publications.
 Les prix sont augmentés des frais de port et d'emballage quand les volumes ne sont pas pris directement au dépôt.
 (*) Tous les prix sont indiqués hors taxe, sauf indication contraire (T.T.C.).

SOMMAIRE

Tome 11 (2^{ème} série), Fascicule 1
parution 2004

	pages
M. IBNOUSSINA, F. CHERRADI, O. WITAM(*), Z. SEKKAT et M. AYEB. — Analyse géologique et géotechnique du Pise dans les remparts de Marrakech. Marrakech, Maroc	1
Brahim BEN KABBOUR, Lahcen ZOUHRI, Jean-Pierre COLBEAUX, Jacky MANIA et Christian GORINI. — Etude de la vulnérabilité et de la sensibilité des ressources en eaux souterraines de la Mamora côtière (Maroc) : Application de la méthode DRASTIC ...	9
M. IBNOUSSINA, M. ZAMAMA, Z. SEKKAT, M. AYEB, F. FRÖHLICH et O. WITAM. — Comportement géotechnique des argiles brunes de Lalla Fatna (Safi, Maroc).....	15
Christophe ANDRÉ et Andreas PAVLOPOULOS. — Influence du contrôle structural sur l'agencement du réseau hydrographique dans un bassin en extension : le bassin de Reginio (Locride, Grèce).....	21

© 2004 Société Géologique du Nord Editeur, Lille

Toute reproduction, même partielle, de cet ouvrage est interdite. Une copie ou reproduction par quelque procédé que ce soit, photographie, microfilm, bande magnétique, disque ou autre, constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi du 11 mars 1957 sur la protection des droits d'auteurs.

Imprimé en France (Printed in France)