

Analyse quantitative de l'hétérogénéité de la fracturation : application aux carrières souterraines

Adrian Cerepi

Institut Egid-Bordeaux-3, université Michel-de-Montaigne, Bordeaux-3, 1, allée Daguin, 33607 Pessac cedex, France

Reçu le 17 septembre 2001 ; accepté le 26 novembre 2001

Présenté par Jean-Paul Poirier

Abstract – Quantitative analysis of fracturing heterogeneity: application to underground quarries. The quantitative analysis of fracturation heterogeneity from Geographic Information System (GIS) has become very important for the modelling of underground quarries stability, the reservoir properties deduced from fracturing and their consequences on the groundwater run-off. This paper aims to give a method of quantitative analysis of fracturing in three underground limestone quarries of Gironde. More than 1000 fractures were measured, mapped and numbered. The heterogeneity analysis and the fracturing connectivity are based on the spatial distribution of geometrical parameters of each fracture, such as: openness, length, direction, orientation, spatial distribution of different fracture classes and connexity. *To cite this article: A. Cerepi, C. R. Geoscience 334 (2002) 163–170.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

limestone / underground quarries / geometry / fracturing network / reservoir

Résumé – L'analyse quantitative de la fracturation par le Système d'information géographique (SIG) devient important pour modéliser la stabilité des carrières souterraines et des propriétés réservoirs induites par la fracturation, avec leurs conséquences sur les écoulements souterrains. Cet article propose une méthode d'analyse quantitative de la fracturation appliquée à trois carrières souterraines carbonatées de la Gironde. Plus de 1000 fractures ont été relevées, mesurées, cartographiées et numérisées. L'analyse de l'hétérogénéité et de la connexité de la fracturation est fondée sur la répartition spatiale des paramètres géométriques de chaque fracture, tels que l'ouverture, la longueur, la direction, l'orientation, l'écartement des familles de fractures et la connexité. *Pour citer cet article : A. Cerepi, C. R. Geoscience 334 (2002) 163–170.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

calcaire / carrières souterraines / géométrie / réseau fissural / réservoir

Abridged version

1. Introduction

The quantitative study of the fracturing heterogeneity allows us to obtain the modelling of both underground quarries stability and reservoir properties deduced from fracturing. The paper aims to give a quantitative method of fracturing analysis. This method is composed of three steps: (i) the knowledge of geological setting and topographic reading, (ii) geometrical analysis in situ and digital cartographic treatments, (iii) statistical data analysis.

Three underground limestone quarries of Gironde were chosen for this study: the quarries of Thau and Maison-Franche in the district of Gauriac and Saint-Germain-la-Rivière in the district of the same name (Fig. 1). They are

localised in the 'Calcaire à Astéries' of Upper Oligocene in North-Aquitaine Basin. The fracturing network is linked to the main breakable and supple structures of Tertiary formations and Armorican and Variscan orogenesis directions (Fig. 1).

2. Different steps of digital treatments of fractures

Three steps are necessary to obtain the digital treatments of the fractures.

2.1. Definition of fractures types

This first step is based on the identification of two fracture types: (i) 'old fractures' the so-called 'geological fractures' linked to the local structural context (filled by red

clay as ‘internal sediments’); (ii) ‘recent fractures’ mechanic fractures linked to the quarries exploitation. Stratiform karsts are geological fractures widened by the dissolution and placed as the stratification of limestone. Transverse karsts are placed perpendicular to the limestone stratification. Fig. 2 gives the relationship between different fracture types.

2.2. Acquisition and pre-treatment

The position, length and direction of fractures, in situ, is read on the topographic map of underground quarries. Different numerical data undergo three transformations: translation, scale change and rotation, so as to be included in the Lambert III geographical system. The representativeness of the analysed fractures is checked by comparing the experimental distribution of the fractures with a Poisson’s statistical process [6]. Representativeness coefficient is > 1 for the three studied quarries.

2.3. Spatial distribution and geometrical parameters

It allows us to measure different geometrical parameters of each fracture, such as: length, opening, direction, orientation, density, frequency and the spatial distribution (Figs. 3 and 4). The spatial distribution is defined by the compactness C_i (m^{-1}), given by the relationship

$$C_i = \frac{1}{\bar{e}_i}$$

where \bar{e}_i is the average space. Three compactness classes are defined thanks to the histogram of the class distribution:

class 1, with strong compactness, class 2, with medium compactness, class 3, with weak compactness. From these classes, we can map out the isocompactness of the fractures. The results are brought up in the form of the compactness map of the fractures and the analytic database of geometrical parameters taken from compactness maps. The connexity of a given fracture i would be equal to the number of fractures i, j, k, l, \dots, n to which this fracture is secant (Fig. 4). The connexity would be equal to 0 if the fracture were isolated.

3. Results and discussions

Fracturing networks of Thau and Maison-Franche belong to the same structural system (Table 2, Figs. 5A–5C). Class 2 (N131–134°) includes many karsts. It shows that fractures of this class serve as drainage channel during the post-Oligocene emersion of the limestone. In low fractures compactness area, the fracture average length is the most important. The passage from areas of strong compactness fractures to areas of weak compactness fractures in most cases corresponds to a progressive decrease in the apparent average length of the fractures. The geological fractures influence strongly the orientation of the mechanical ones. The comparison between the density maps of secant and non-secant fractures allows noticing that the secant fractures are essentially situated in the strong compactness areas of non-secant fractures. The most common value of the connexity is equal to 2. Furthermore, it never goes higher than 3.

1. Introduction

1.1. Objectif

L’étude quantitative de la fracturation offre un double intérêt pour la modélisation d’une part, de la stabilité des ouvrages souterrains, avec leurs conséquences sur la sécurité des biens et des personnes et, d’autre part, de l’écoulement dans un massif rocheux induit par la fracturation, avec leurs conséquences sur la diagenèse et les propriétés pétrophysiques.

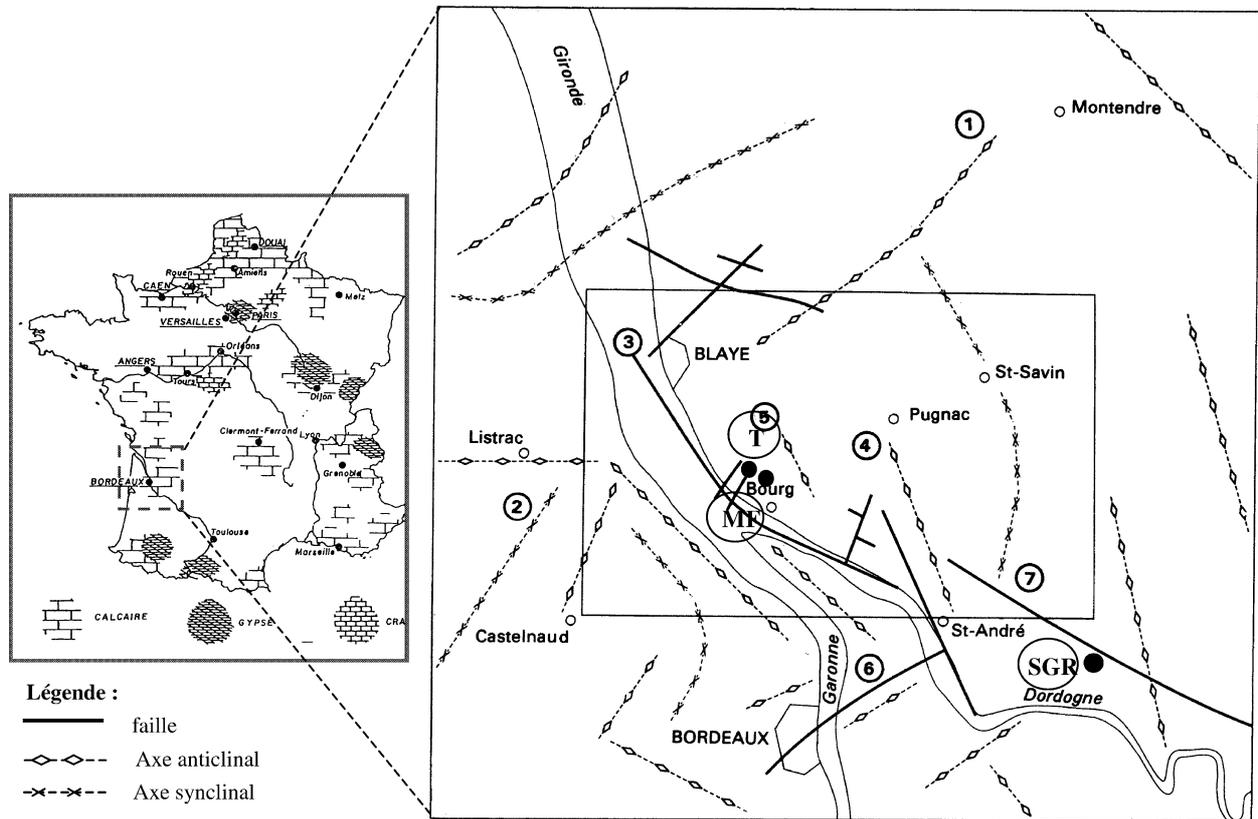
1.2. Méthode

La méthode mise en œuvre comprend trois étapes : la connaissance du contexte géologique, le relevé topographique des carrières souterraines, l’analyse géométrique in situ et le traitement numérique cartographique et statistique des données. Cette recherche s’inscrit dans un contexte scientifique en plein développement : celui de la modélisation des propriétés géotechniques et réservoirs des roches. Actuellement, la modélisation de l’état de fracturation d’un massif est fondée sur deux approches. La première est la représentation synthétique d’un réseau de fractures in-

tegrant un ou plusieurs caractères géométriques [4, 7]. Cette représentation synthétique est simplifiée. La deuxième est l’analyse quantitative des caractères géométriques en utilisant des méthodes de traitement numérique d’image [3, 5, 8].

1.3. Contexte historique, géographique et géologique

Trois carrières souterraines de la Gironde ont été choisies : les carrières de Thau et de Maison-Franche, situées dans la commune de Gauriac, et de Saint-Germain-La-Rivière, localisée dans la commune du même nom. Les anciennes carrières souterraines en Gironde sont localisées principalement dans l’Entre-Deux-Mers et sur la rive droite de la Dordogne (Fig. 1). Plus de 2000 hectares de carrières souterraines sont répartis dans plus de 113 communes de la Gironde. Elles ont été ouvertes dans le calcaire à Astéries de l’Oligocène supérieur (Stampien) du bassin d’Aquitaine, dénommé « pierre de Bordeaux ». Il s’est formé durant la transgression de l’Oligocène supérieur I (≈ 32 Ma) au sein d’un système sédimentaire de plate-forme. La fracturation est liée aux princi-



1 - Dôme anticlinal de Blaye, 3 - Faille de la Gironde, 4 - Dôme de Pugnac-Saint-André-de-Cubzac, (Pratviel, 1967)
 5 - Dôme anticlinal de Bourg Saint Trojan, 6 - Dôme anticlinal d'Ambès, 7 - Dôme synclinal de Cavignac-Saint-Savin,
 8 - Synclinal de Bourg-sur-Gironde,
 T : carrière de Thau, MF : carrière de Maison-Franche, SGR : carrière de Saint Germain-La-Rivière.

Figure 1. Localisation des trois sites choisis dans cette étude et le contexte structural du Bassin nord-aquitain.

Figure 1. Localisation of three underground quarries chosen in this study and the structural setting of the North-Aquitaine Basin.

pales structures de déformation souple et cassante des terrains tertiaires et de direction, armoricaine et varisque [1, 9] (Fig. 1). Les accidents de direction armoricaine NW–SE sont bien développés dans la région (faille de la Gironde). Le Tableau 1 présente les caractéristiques géométriques et géotechniques des trois carrières souterraines.

rières liées à l'exploitation des carrières (Fig. 2). Les karsts stratiformes sont des fractures géologiques élargies par la dissolution et disposées parallèlement à la stratification du calcaire. Les karsts transverses se développent transversalement par rapport à la stratification. La Fig. 2 présente les différentes relations existant entre ces différentes typologies.

2. Traitement numérique des segments–fractures

Trois étapes sont nécessaires au traitement numérique des fractures.

2.1. Typologie des fractures

La définition de la typologie des fractures analysées est basée sur deux notions : (i) les fractures anciennes dites « géologiques » (colmatées par des sédiments internes) et (ii) les fractures récentes dites « mécaniques », postérieures à l'ouverture des car-

2.2. Acquisition et pré-traitement

Sur le terrain, la position, la longueur apparente et la direction sont relevées sur un plan topographique au 1 : 200°. Les fractures analysées sont toutes verticales. Représentée par un segment de droite $S(x_1, y_1 \text{ et } x_2, y_2)$, chaque fracture est définie par les coordonnées de son barycentre $g(x_g, y_g)$. Pour passer à un système de coordonnées géoréférencées, les données subissent trois transformations : translation, changement d'échelle et rotation, en utilisant au moins trois points amers (Fig. 3). La résolution des transformations obtenues lors du traitement est de $\pm 0,1$ m. La

Tableau 1. Caractéristiques géométriques des trois carrières souterraines étudiées.

Table 1. Geometrical parameters of three studied underground quarries.

Sites étudiés	Épaisseur du recouvrement (m)			Hauteur des piliers (m)			Section des piliers (m ²)			Taux de défrètement (%)	Contrainte verticale statique (MPa)		
	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.		min.	moy.	max.
Saint-Germain-La-Rivière	3,0	4,4	7,2	2,1	3,2	4,4	6,6	19,1	69,9	63,0	0,2	0,3	0,5
Thau	8,7	11,5	14,5	1,0	1,6	2,4	4,2	31,0	116,5	64,3	0,3	0,6	1,0
Maison-Franche	4,6	8,6	10,9	0,6	1,4	2,6	4,5	18,9	127,8	70,6	0,2	0,5	1,2

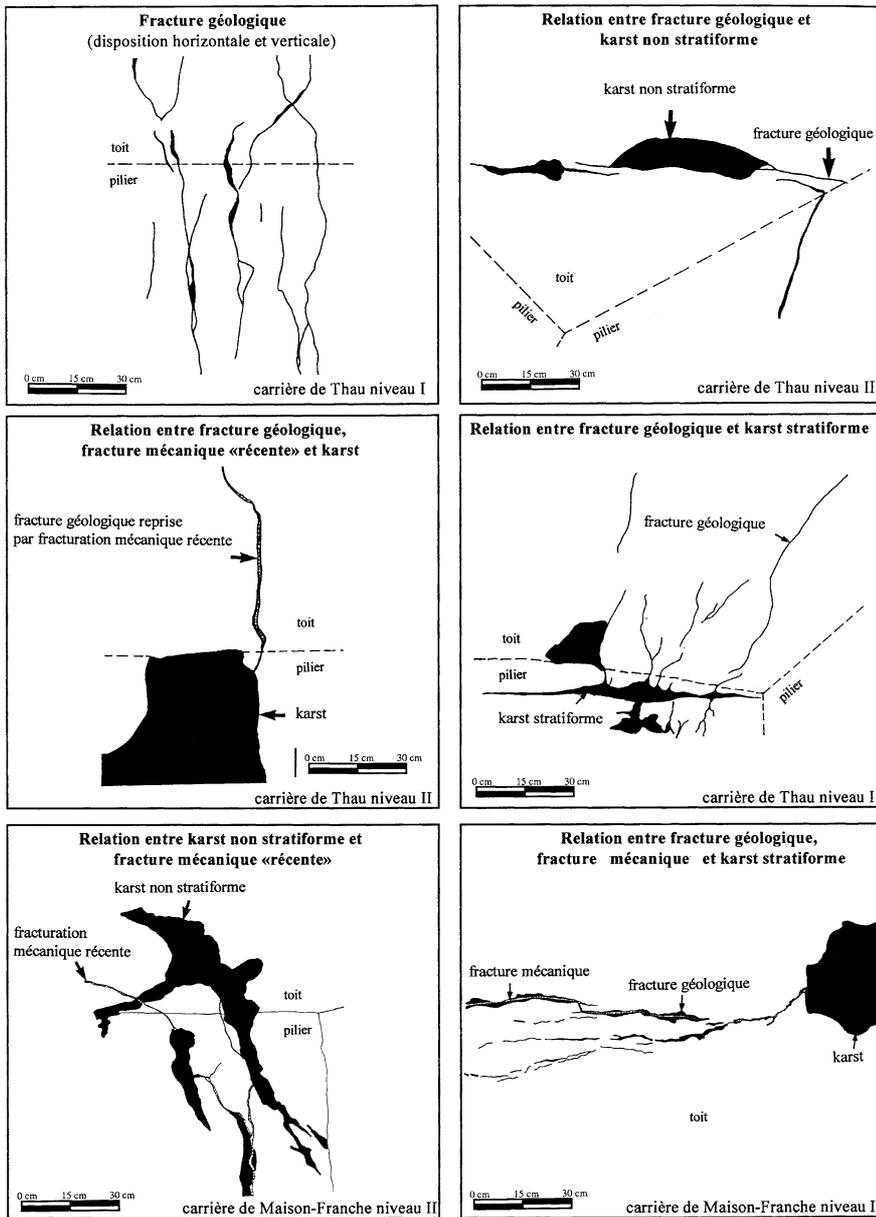


Figure 2. Typologie et relations observées entre les fractures géologiques, les fractures mécaniques et les karstifications dans les sites étudiés.

Figure 2. Types and relationships observed between geological fracture, mechanical fracture and karstification in different studied sites.

représentativité des fractures analysées est vérifiée par le coefficient R_s , donné par la relation suivante [6] :

$$R_s = 2 \sum_{i=1}^n D_{Obsi} / \sqrt{nS}$$

où n est le nombre de fractures ; S (m²) est la surface des carrières étudiées ; D_{Obsi} (m) est la distance entre le barycentre d'une fracture donnée i et son plus proche voisin. Les valeurs calculées de R_s pour les carrières étudiées sont supérieures à 1.

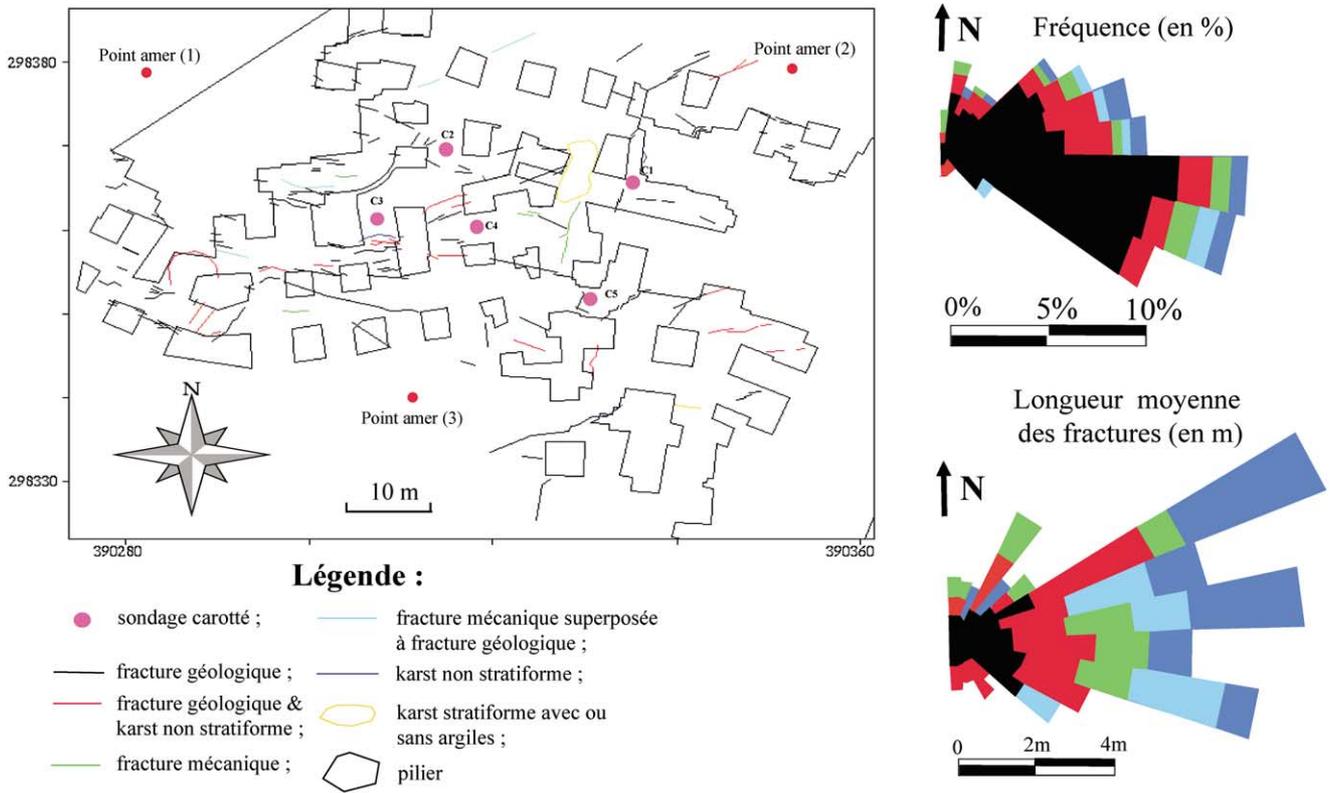


Figure 3. Exemple d’acquisition et pré-traitements, répartition et caractères des fractures à Saint-Germain-La-Rivière.

Figure 3. Example of acquisition and treatment, distribution and characters of fractures in Saint-Germain-La-Rivière.

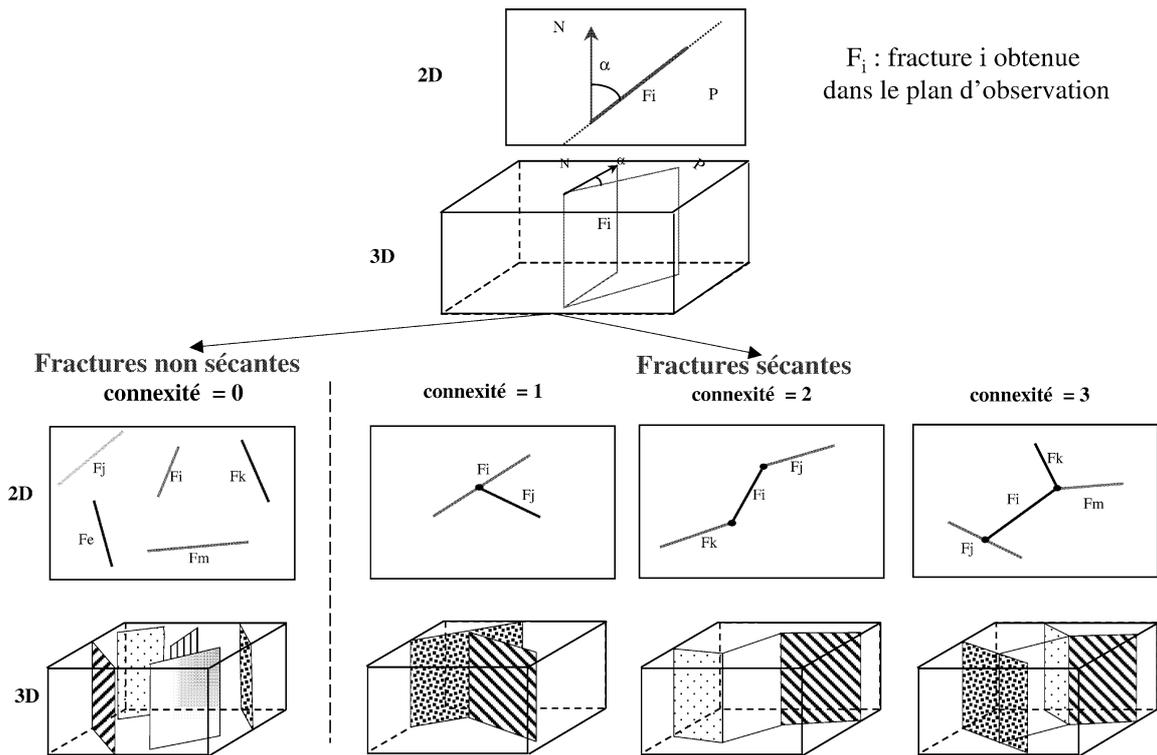


Figure 4. Définition de la connectivité des fractures, fractures sécantes et non sécantes.

Figure 4. Definition of the fracture connectivity, connected fractures and non-connected fractures.

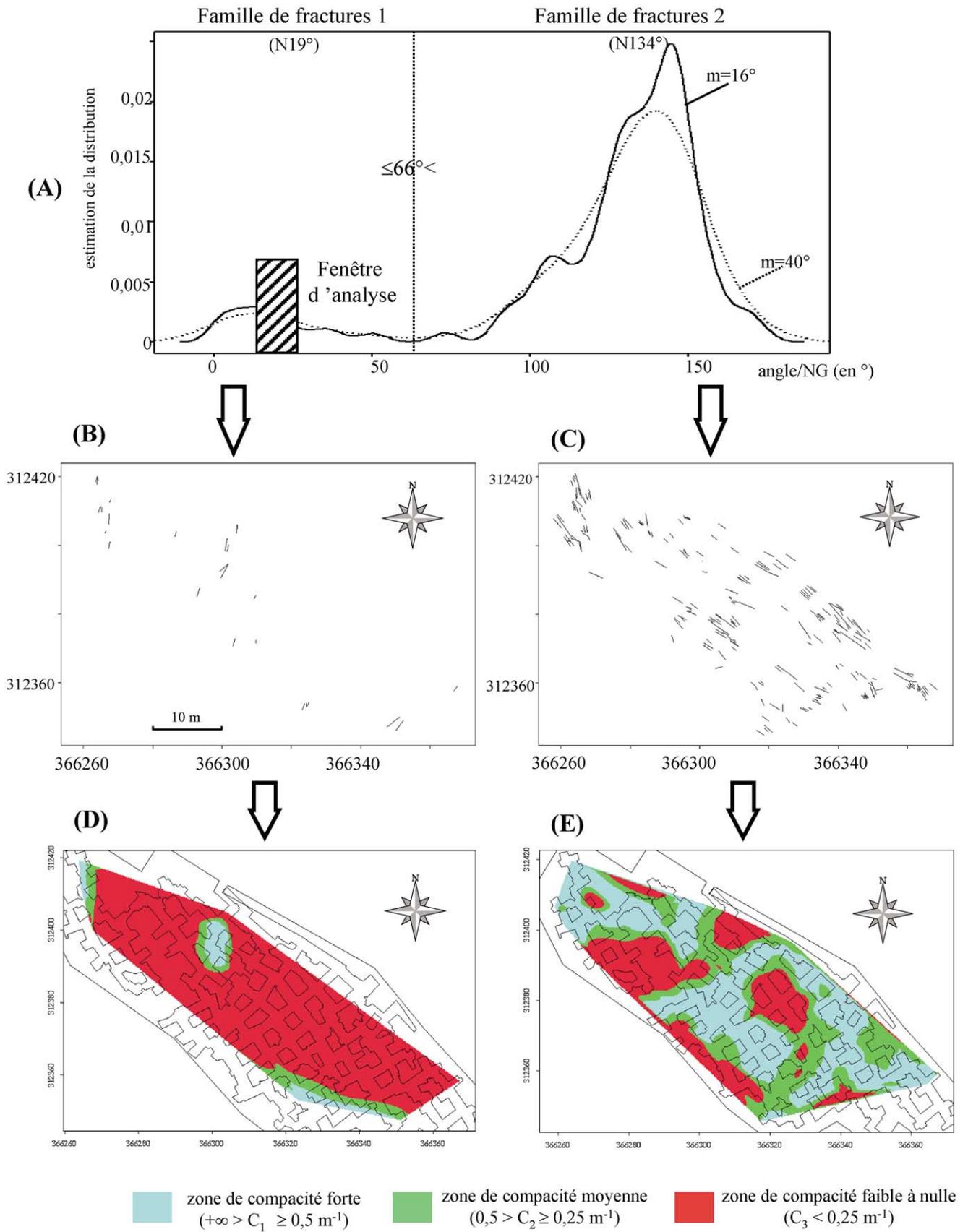


Figure 5. Familles de fractures (A, B, C) et les cartes de compacité de fractures (D, E) de la carrière de Thau (m : taille de la fenêtre de filtrage).

Figure 5. Fracture classes (A, B, C) and their density maps (D, E) in underground quarries of Thau (m : window size of filtering).

Tableau 2. Les caractères géométriques des fractures dans les trois sites étudiés.

Table 2. Geometrical parameters of fractures in three studied sites.

Sites	Familles	Paramètres	Minimum	Moyenne	Maximum	Écart type	Nombre de fractures
Thau niveau II	FAMILLE 1 N19°	écartement e (m)	0,0	0,5	2,8	0,6	24
		compacité $1/e$ (m^{-1})	0,4	8,5	51,7	13,8	
		longueur (m)	0,0	2,3	9,6	1,3	
		orientation (°)	N1	N18	N52	14,43	
	FAMILLE 2 N134°	écartement e (m)	0,1	0,4	3,1	0,6	230
		compacité $1/e$ (m^{-1})	0,3	31,2	548,5	108,2	
		longueur (m)	0,5	1,5	5,2	1,1	
		orientation (°)	N72	N134	N174	18,06	
Maison-Franche niveau II	FAMILLE 1 N19°	écartement e (m)	0,32	1,91	8,45	2,12	28
		compacité $1/e$ (m^{-1})	0,12	1,28	3,16	1,00	
		longueur (m)	0,29	1,74	5,25	1,12	
		orientation (°)	N0,7	N19,07	N42,59	14,00	
	FAMILLE 2 N131°	écartement e (m)	0,10	0,10	0,64	0,10	225
		compacité $1/e$ (m^{-1})	1,56	56,24	1383,00	150,36	
		longueur (m)	0,57	2,35	16,43	1,74	
		orientation (°)	N59	N130	N178	18,00	
Saint Germain-La-Rivière	FAMILLE 1 N19°	écartement e (m)	0,0	0,7	4,1	1,0	19
		compacité $1/e$ (m^{-1})	0,2	6,0	37,4	8,9	
		longueur (m)	0,5	0,7	1,7	0,2	
		orientation (°)	N2	N19	N33	9,05	
	FAMILLE 2 N62°	écartement e (m)	0,0	0,4	3,1	0,6	72
		compacité $1/e$ (m^{-1})	0,3	31,2	548,5	108,2	
		longueur (m)	0,5	1,5	5,2	1,1	
		orientation (°)	N37	N62	N79	12,0	
	FAMILLE 3 N103°	écartement e (m)	0,0	0,2	3,4	0,4	142
		compacité $1/e$ (m^{-1})	0,3	52,5	645,5	107,6	
		longueur (m)	0,4	1,7	7,4	1,2	
		orientation (°)	N81	N103	N142	13,11	
	FAMILLE 4 N164°	écartement e (m)	1,3	3,1	5,1	1,8	5
		compacité $1/e$ (m^{-1})	0,2	0,4	0,8	0,2	
		longueur (m)	0,5	0,5	0,6	0,1	
		orientation (°)	N151	N164	N174	37,3	

2.3. Paramètres géométriques et distribution spatiale

Différents paramètres géométriques ont été calculés, tels la longueur apparente et la direction α d'une fracture (Figs. 3 et 4). Les familles de fractures ont été définies selon leur direction par la méthode de l'estimation de la densité de « fenêtre mobile » [10]. En faisant varier la taille de la fenêtre (m), on s'assure de la stabilité des familles de fractures observées et on détecte les familles secondaires incluses dans les familles principales (Fig. 5A). La densité surfacique D_{si} est exprimée en nombre N_i de fractures de la famille i , observées par rapport à l'unité de surface [2].

La fréquence des fractures F_i est définie par le rapport du nombre de fractures de la famille i sur le nombre total des fractures [2]. L'écartement moyen entre deux fractures est la distance entre leur barycentre [2]. La distribution spatiale est définie à partir de la notion de compacité des fractures C_i (m^{-1}), donnée par la relation :

$$C_i = \frac{1}{\bar{e}_i},$$

où \bar{e}_i est l'écartement moyen. La compacité tend à donner le degré de rapprochement des fractures dans l'espace. Trois classes de compacité sont définies à l'aide de l'histogramme de distribution : la classe 1, de compacité forte ($+\infty > C_1 \geq 0,5 m^{-1}$); la classe 2,

de compacité moyenne ($0,5 > C_2 \geq 0,25 \text{ m}^{-1}$) et la classe 3, de compacité faible ($C_3 < 0,25 \text{ m}^{-1}$). À partir de ces classes, on trace les cartes d'isocompacité des fractures. Les résultats sont présentés sous la forme d'une carte de compacité de fractures et d'une base de données analytiques des paramètres géométriques extraites des cartes de compacité.

2.4. Connexité d'une fracture

Étant donné une fracture i , sa connexité est égale aux nombres de fractures i, j, k, l, \dots, n auxquelles elle est sécante (Fig. 4). La connexité est égale à 0 si la fracture i est isolée. La connexité est supérieure ou égale à 1 si la fracture i est sécante à une ou plusieurs fractures. Un algorithme est implémenté pour détecter la connexité des fractures et leur répartition dans l'espace.

3. Résultats et discussions

Les réseaux de fractures à Thau et Maison-Franche présentent les mêmes caractéristiques géométriques et appartiennent au même système de fractures (Tableau 2, Figs. 5A–5C). La famille 2 prédominante est fortement karstifiée, ce qui met en évidence les directions SE–NW (accident de direction armoricaine) de drainage karstique lors de l'émersion post-Oligocène du calcaire. Dans les cartes de compacité, les fractures s'organisent en champs de compacité forte, dont l'orientation est celle des familles principales de fractures. À Thau, les zones de compacité forte sont orientées N134° et N19° (Figs. 5D–5E). Le passage des zones de compacité forte aux zones de compacité faible correspond à une décroissance progressive de la longueur moyenne des fractures. Ainsi, à Saint-Germain-La-Rivière, la longueur moyenne des fractures est deux fois plus grande dans les zones à

compacité faible. Les fractures géologiques contribuent fortement à l'orientation des fractures mécaniques. Il existe une bonne corrélation entre la direction des fractures géologiques et celle des fractures mécaniques. La comparaison des cartes de compacité des fractures non sécantes et sécantes permet de constater que les fractures sécantes sont localisées essentiellement dans les zones de compacité forte des fractures non sécantes. On peut penser que, dans les zones de compacité forte, les contraintes que le calcaire subit dépassent le seuil pour lequel les fractures non sécantes s'interceptent : elles créent de la même manière une connexité. La connexité ne dépasse pas 3, alors que la connexité égale à 2 est la plus représentée. À Thau et à Maison-Franche, les fractures sécantes sont principalement représentées dans la famille N131–134°. Dans la carte géologique, cette direction est celle de l'accident principal de la Gironde (Fig. 1).

4. Conclusion

Plus de 1000 fractures réparties dans les trois carrières ont été relevées directement sur le terrain, cartographiées et numérisées. Ces fractures affectent le calcaire oligocène d'Aquitaine. Elles sont de deux origines : géologique et mécanique. L'analyse de l'hétérogénéité de ces fractures est effectuée en utilisant l'analyse numérique par Systèmes d'Information Géographique (SIG) et en considérant la répartition spatiale de paramètres géométriques tels que l'ouverture, la longueur, la direction, l'orientation et le pendage des fractures, la distribution des familles de fractures, leur écartement et leur connexité.

L'évaluation quantitative de la géométrie et de la distribution spatiale du réseau de fractures reste une étape indispensable pour l'obtention de modèles de plus en plus réalistes de fractures.

Références

- [1] C. Beaufrère, Influence des facteurs géologiques et mécaniques sur l'évolution de la stabilité de quatre carrières souterraines exploitant le calcaire oligocène en Gironde, thèse, université de Bordeaux, 1986.
- [2] J.-L. Blès, Y. Gros, La fracturation du granite de Bassiès (Pyrénées ariégeoises, France). Chronologie des phases tectoniques, évolution des fractures, Bull. Soc. géol. France 22 (3) (1980) 377–390.
- [3] J. Bodin, M. Razack, L'analyse d'image appliquée au traitement automatique de champs de fractures. Propriétés géométriques et lois d'échelles, Bull. Soc. géol. France 170 (4) (1999) 579–593.
- [4] B. Bourguine, J.-P. Chiles, C. Castaing, Simulation d'un réseau de fractures par un modèle probabiliste hiérarchique, in : Cahier de géostatistique, École nationale supérieure des mines de Paris, 1995, pp. 81–96.
- [5] G. Brière, M. Razack, Méthode informatique pour l'étude sur clichés aériens de la fracturation des magasins aquifères fissurés, Rev. Géol. Dynam. Géogr. Phys. 232 (2) (1982) 131–142.
- [6] C. Collet, Systèmes d'information géographique en mode image, Presses polytechnique et universitaires romandes, Lausanne, 1992.
- [7] H. Jourde, P. Bideaux, S. Pistre, Modélisation des écoulements en réseaux de fractures orthogonales : influence de la localisation du puits de pompage sur les rabattements, Bull. Soc. géol. France 169 (5) (1998) 635–644.
- [8] J. Mania, P. Broquet, N. Ramproux, Rôle de la fracturation dans la détermination de la conductivité hydraulique des calcaires. Apport des méthodes directes et indirectes, Bull. Soc. géol. France 169 (6) (1998) 765–773.
- [9] L. Pratviel, Essai de cartographie structurale et faciologique du bassin sédimentaire Ouest-Aquitaine pendant l'Oligocène, thèse d'État, tomes I et II, université de Bordeaux, 1972.
- [10] G. Saporta, Probabilités, analyse des données statistiques, Technip, Paris, 1991.