

## **Méthode d'analyse géologique sur la karstification des Corbières orientales et influence des événements néogènes (Tortonno-messiniens)**

**BERTRAND AUNAY, PAUL LE STRAT, CEDRIC DUVAIL,  
NATHALIE DÖRFLIGER & BERNARD LADOUCHE**

*BRGM, EAU/RMD, 1039 rue de Pinville, F-34000 Montpellier, France*

[p.lestrat@brgm.fr](mailto:p.lestrat@brgm.fr)

**Résumé** L'élaboration des systèmes karstiques du pourtour méditerranéen a fortement été influencée par les variations du niveau de base, liées aux fluctuations eustatiques et aux mouvements tectoniques depuis le Trias. La méthodologie employée dans l'étude géologique du karst des Corbières comprend l'étude du signal sédimentaire enregistré dans les karsts; elle consiste à replacer ce signal dans l'enregistrement sédimentaire des bassins avoisinants, vu que le développement d'un système karstique est lié notamment au profil d'équilibre fluvatile, lui-même connecté au niveau marin. L'analyse de la déconvolution des messages enregistrés dans les séries sédimentaires a permis d'appréhender les grandes périodes de karstification et la géométrie des systèmes créés. Ainsi, le potentiel de karstification théorique maximal de la zone d'étude est de 1500 mètres. Les résultats de la caractérisation du fonctionnement et des structures du système à l'aide de l'analyse des séries hydrologiques (pluie et débit) de Fontestramar sont typiques d'un système bien karstifié avec une zone noyée importante. Les interprétations hydrogéologiques sont cohérentes et mieux contraintes par les indicateurs géologiques.

**Mots clefs** Corbières; courbes de récession; incision messinienne; incision tortonienne; karstification; Méditerranée; ressource en eau

**Key words** Corbières; depletion curves; messinian incision; tortonian incision; karstification; Mediterranean Sea; water resource

### **INTRODUCTION**

Les systèmes karstiques, essentiellement associés aux roches carbonatées sont caractérisés par leur hétérogénéité due à la présence de fractures et de réseaux de drainage souterrain. Les propriétés hydrodynamiques de ces systèmes sont étroitement liées au développement de la karstification; la transmissivité se développe au sein du réseau de drains, l'emmagasinement étant assuré par les fissures et la porosité de la roche encaissante et par les systèmes annexes (Mangin, 1975). Les facteurs hydrologiques, les propriétés physiques et les caractéristiques géologiques du karst interviennent dans le développement des aquifères karstiques. Ce sont particulièrement les facteurs biologiques et climatiques, les facteurs géomorphologiques (relief, drainage de surface), les caractéristiques géologiques (lithologie, structure et paléogéographie), les processus chimiques, la distribution des vides et des paramètres hydrodynamiques au sein de l'aquifère, les conditions aux limites ainsi que l'organisation des écoulements qui en résulte (Király, 1975). Les propriétés hydrodynamiques de ces systèmes sont étroitement liées au développement de la

karstification; la transmissivité se développe au sein du réseau de drains, l'emmagasinement étant assuré par les fissures et la porosité de la roche encaissante ainsi que par les systèmes annexes.

Les systèmes karstiques des Corbières sont principalement gravitaires (Bakalowicz, 1996); le processus de karstification est lié à l'évolution du profil d'équilibre fluvial lui-même connecté à l'évolution eustatique de la Méditerranée (Blanc, 1997). L'évaluation de la ressource en eau des systèmes karstiques des Corbières, en vue de leur exploitation nécessite une étude hydrogéologique avec prise en compte d'un volet géologique concernant la mise en place de la karstification et sa géométrie (réseaux plans superposés et réseaux verticaux; Bakalowicz, 1996). L'intégration de l'analyse de la mise en place de la karstification dans un tel projet représente un élément novateur. Des analyses hydrologiques ont été appliquées aux séries chronologiques brutes de la source de Fontestramar: analyse des courbes de récession et analyse corrélatoire et spectrale, dans le but de caractériser le réservoir du système.

Les résultats des études géologiques sont tout d'abord présentés, vient ensuite l'examen des résultats hydrologiques.

## CONTEXTE GEOGRAPHIQUE-GEOLOGIQUE

Le système karstique de Fontestramar appartient aux Corbières Orientales; il se développe dans les calcaires structurés et métamorphisés d'âge Jurassique moyen à Crétacé inférieur. Le bassin d'alimentation de ce système dont l'exutoire principal est la source de Fontestramar occupe une superficie de plus de 200 km<sup>2</sup>. Certaines limites du bassin restent encore hypothétiques. Le bassin est notamment limité au sud par la zone de pertes de l'Agly et du Verdoube ainsi que le flanc méridional du synclinal du Bas-Agly, et au sud-est par la plaine de la Salanque où les formations karstifiables se prolongent sous le Plio-Quaternaire. La ligne de crête du Mont Périllou (708 m) constitue la limite septentrionale de ce secteur. La source de Fontestramar émerge au niveau d'une vasque, extrémité d'un réseau de galeries reconnu en plongée jusqu'à plus de -164 mètres NGF (communication orale, Brandt, 2001). Le débit de la source à l'étiage est de 800 l s<sup>-1</sup>, alors qu'en crue, il peut dépasser 20 à 30 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

## EVOLUTION GEOLOGIQUE DU MASSIF DES CORBIERES

Les systèmes karstiques des Corbières, principalement gravitaires, sont liés au profil d'équilibre fluvial lui-même connecté au niveau de base marin. Le processus de karstification intervient essentiellement en période de chute du niveau de base (induction eustatique globale ou structurale locale). Par opposition, les remplissages sont plutôt fossilisés en période d'accommodation, c'est-à-dire en période de remontée du niveau de base local (Aumay & Le Strat, 2002).

La méthodologie d'étude géologique des karsts de la Méditerranée occidentale repose sur l'analyse de deux paramètres essentiels: (a) l'analyse de la variation globale du niveau marin à partir de la courbe eustatique globale (Haq *et al.*, 1987), et (b) l'évolution des phénomènes structuraux liés à la géodynamique pyrénéenne et

alpine (Calvet, 1996; Duvail, 2002). Si la courbe eustatique globale est bien connue, elle doit être agrémentée par la chute drastique du niveau de base entre -1000 m et -1500 m au Messinien en Méditerranée occidentale (Clauzon, 1990).

Les éléments de contrôle de la karstification depuis l'Oligocène (30 Ma) jusqu'au Messinien (5.5 Ma) sont présentés ci-après. Ils permettent d'apprécier la mise en place des systèmes ainsi que la karstification du secteur.

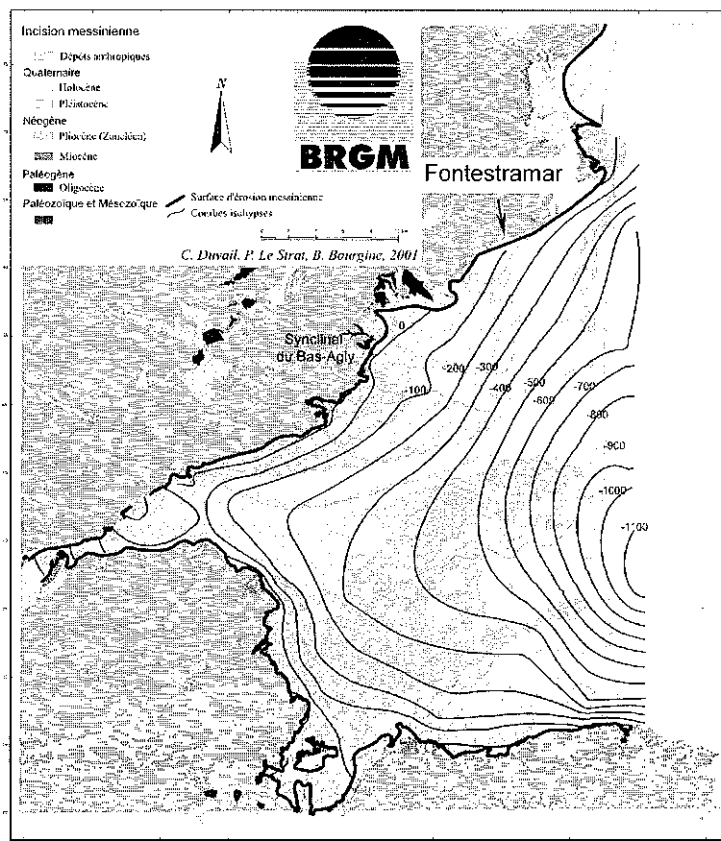
**L'Oligocène et le Miocène inférieur (de 30 Ma à 20 Ma)** Cet intervalle correspond, dans les Corbières, d'une part à la formation de petits bassins distensifs, et d'autre part, à l'élaboration de grandes surfaces planes datées par la présence de restes de rongeurs (Calvet, 1996; Clauzon, 1990). Ces aplanissements se créent lors de période de stabilité eustatique où la sédimentation remplit constamment l'accommodation disponible. Le profil d'équilibre de ces surfaces est théoriquement en continuité avec le niveau marin. Néanmoins, ces surfaces se situant au-dessus de leur paléo-profil d'équilibre, se retrouvent portées en altitude par un phénomène régional postérieur au Serravalien (12 Ma) et antérieur à l'incision messinienne (5.95 Ma).

**L'événement tectonique tortonien: surrection des massifs et démantèlement de la marge miocène (entre 11 et 6 Ma)** Divers phénomènes observables sur le pourtour du bassin du Roussillon (inversion sur les profils sismiques, incisions scellées par l'incision messinienne, brèches, décalage de formations, décalage de surfaces) confirment la présence d'une phase tectonique importante postérieure au Miocène moyen marin et antérieure au Messinien (Duvail *et al.*, 2001). Cette phase a été reconnue régionalement (Clauzon & Rubino, 2002; Duvail, 2002; Séranne *et al.*, 2002). Elle se traduit par la surrection des surfaces d'aplanissement qui entraîne la formation de réseaux verticaux. La valeur de cette surrection n'est pas encore quantifiée dans les Corbières. L'incision tortonienne est induite structuralement.

**Incision messinienne (5.95 Ma)** L'incision messinienne est induite eustatiquement; elle est liée à la crise de salinité messinienne qui existe dans toute la Méditerranée occidentale (Clauzon, 1990). Il s'agit, pour l'incision, d'un objet cartographiable, jalonné de brèches liées à la période de chute du niveau marin. La crise de salinité correspond à la phase négative du cycle eustatique TB 3.4/3.5 (Haq *et al.*, 1987) extraordinairement amplifiée en Méditerranée par effet de seuil.

**Influence de l'incision messinienne dans les Corbières** L'influence de cette chute est bien connue dans le bassin du Roussillon (substratum non carbonaté) où de profonds canyons ont été creusés puis comblés par des sédiments d'âge Zancéen (Pliocène inférieur). Dans le secteur carbonaté des Corbières, aucune forme de canyons messiniens n'a pu être reconnue. La Fig. 1 (Duvail *et al.*, 2001), obtenue par corrélation de forages (logs, diagraphies, sismique et calibrage terrain), présente les limites d'extension de l'incision messinienne.

La morphologie, en synclinal de la vallée de l'Agly, était acquise dès la fin du paroxysme de l'orogénèse pyrénéenne marquée par la mise en place des nappes de charriages épygliphtiques au Bartonien (40 Ma). La rivière Agly, s'écoulant d'ouest en est, est localisée entre un massif hercynien au sud et le chevauchement de Tautavel au nord. Cependant, il n'existe aucun sédiment mio-pliocène dans cette vallée. La



**Fig. 1** Extension spatiale de l'incision messinienne dans le Roussillon et le synclinal du Bas-Agly (Duval *et al.*, 2001)

contradiction apparente d'un écoulement W-E de l'Agly et le manque de sédiments quaternaires peut s'expliquer par deux phénomènes : érosion totale des dépôts mio-pliocènes et/ou écoulements karstiques au Miocène terminal. Au Miocène supérieur, le seul exutoire envisageable pour le bassin versant du synclinal du Bas-Agly était l'axe de ce dernier, orienté vers la plaine du Roussillon.

**Données spéléologiques** L'exploration du karst noyé de Fontestramar a atteint la côte de  $-164$  m NGF (Brandt, 1997), le conduit karstique se continuerait en profondeur le long d'une pente assez raide (Brandt, communication orale). Le réseau de galeries se développe essentiellement selon un plan horizontal situé à une altitude de  $-30$  m à  $-50$  m NGF. Le niveau eustatique a atteint une valeur de  $-50$  m lors de la chute eustatique de la fin du Serravalien (11 Ma). Ainsi, les niveaux karstiques situés au-delà de cette côte sont certainement initiés au cours de la crise de salinité messinienne ( $-1000$  m à  $-1500$  m).

L'étude géologique montre clairement la présence d'un réseau karstique profond vertical lié essentiellement aux chutes eustatiques au passage Miocène/Pliocène.

## ANALYSES DES HYDROGRAMMES DE LA SOURCE DE FONTESTRAMAR

Les analyses des hydrogrammes sont des méthodes indirectes utilisées en hydrologie karstique afin de caractériser la structure et le fonctionnement d'un système: degré de karstification et ressource. Les analyses ont été effectuées dans un premier temps pour l'ensemble des données brutes de débit journalier à la source de Fontestramar sur la période 1971–2000 (DDAF66).

**Analyse des courbes de récessions** L'ajustement des courbes de récession selon la méthode de Mangin (1975) (détermination du coefficient de tarissement et du volume dynamique à partir de l'ajustement de plusieurs exponentielles) a été réalisé de manière satisfaisante pour 17 sur 21 périodes de décrues (critère d'ajustement supérieur à 88%). Les paramètres moyens et extrêmes des ajustements significatifs sont présentés dans le tableau (Tableau 1). Les coefficients de tarissement sont faibles, indiquant que le système de Fontestramar possède une zone noyée importante. Les temps d'infiltration relativement courts (35 jours) et les vitesses moyennes d'infiltration relativement élevées indiquent que ce système présente une karstification importante. La grande variabilité du coefficient d'hétérogénéité d'écoulement d'un cycle à l'autre indique que le système est sensible aux variations saisonnières de l'alimentation (pluies et/ou pertes).

**Analyse corrélatoire et spectrale à court et long terme sur la période 1970–2000** L'ensemble des paramètres déterminés par les analyses corrélatoires et spectrales simples indique que le système de Fontestramar présente un effet mémoire moyen de 12 jours, une fréquence moyenne de coupure globalement basse de  $0.16 \text{ jour}^{-1}$  et un temps de régulation moyen de 53 jours. Ces résultats permettent de classer le système de Fontestramar dans la catégorie des systèmes complexes globalement inertiels (fort retard d'une partie de l'infiltration) (infiltration  $>0.5$  et paramètre  $K$  de régulation entre 0 et 0.5). De plus, la réponse du système aux précipitations se produit en moins d'un jour, indiquant que le système est bien karstifié.

Concernant le long terme, les résultats des analyses montrent que le système est globalement inertiel (effet mémoire de 18 jours et période de régulation de 113 jours) et que la réponse impulsionnelle est bien marquée pour les faibles décalages.

**Tableau 1** Valeurs moyennes et extrêmes des paramètres des ajustements des 17 courbes de récession retenues pour la période 1971–2000.

	Minimum	Moyenne	Écart-type	Maximum
$\alpha$ coefficient de tarissement	0.002	0.003	0.001	0.008
$\varepsilon$ coefficient d'hétérogénéité d'écoulement	0.068	0.513	0.56	2.59
Temps fin d'infiltration	19	35	20	80
$\xi$ Vitesse moyenne d'infiltration	0.012	0.038	0.02	0.083
Volume dynamique ( $\text{Mm}^3$ )	24.8	37.1	9.8	56.2
Volume dynamique – volume écoulé après $t_i$ ( $\text{Mm}^3$ )	13.1	19.3	4	26.3
Volume infiltré ( $\text{Mm}^3$ )	0.5	2.8	2.1	8.6
Paramètre $i$ (retard à l'infiltration)	0.15	0.52	0.14	0.79
Pouvoir régulateur $K$	0.23	0.33	0.07	0.45

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats des interprétations géologiques et hydrogéologiques sur le système de Fontestramar sont cohérents. Le système karstique de Fontestramar est bien karstifié en profondeur; cette karstification succession d'un réseau plan et de conduits verticaux est liée à l'évolution eustatique. La méthodologie qui devra être formalisée et fera l'objet de publications ultérieures, pourra être appliquée en détail sur d'autres systèmes karstiques des Corbières.

**Remerciements** Ce travail s'inscrit dans le module CORBIERES du projet de recherche du BRGM 02EAUR01 "Structure et fonctionnement des systèmes karstiques"; il est financé par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, les Conseils Généraux des Pyrénées Orientales et de l'Aude et par la Direction de la Recherche du BRGM.

## REFERENCES

- Aunay, B. & Le Strat, P. (2002) *Introduction à la géologie du karst des Corbières*. Rapport BRGM/RP-51595-FR.
- Bakalowicz, M. (1996) Les processus de karstification et les différents types de karst associés. *Mém. Soc. Géol. Fr.* n.s. no. 169, *Carbonates intertropicaux* 35(1), 363–371.
- Blanc, J.-J. (1997) Géodynamique et histoire du karst; application au Sud-est de la France. *Quaternaire* 8(2–3), 91–105.
- Brandt, C. (1997) Font Estamar, 11 ans de recherches en plongée dans un grand réseau noyé en bordure de la Méditerranée. In: *Exploration et Spéléologie. Symposium 4* (Publication du 12<sup>ème</sup> Congrès international de spéléologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse), vol. 4, 71–74.
- Calvet, M. (1996) *Morphogenèse d'une montagne méditerranéenne: les Pyrénées Orientales*. Documents du BRGM. no. 255, BRGM éd., Orléans, France.
- Clauzon, G. (1990) Restitution de l'évolution géodynamique néogène du bassin du Roussillon et de l'unité adjacente des Corbières d'après les données écostratigraphiques et paléogéographiques. *Paléobiologie continentale, Montpellier* 27, 125–155.
- Clauzon, G. & Rubino, J.-L. (2002) Signatures synchrones et signatures différées de la crise messinienne sur le territoire français et sur sa marge méditerranéenne. Résumé des RST (avril 2002, Nantes).
- Duvail, C. (2002) *Architecture et géométrie haute résolution des prismes sédimentaires plio-quaternaires post messiniens au droit du Roussillon suivant un profile terre-mer*. Rapport de DEA, ENSPM, France.
- Duvail, C., Le Strat, P. & Bourjain, B. (2001) *Atlas géologique des formations plio-quaternaires de la plaine du Roussillon (Pyrénées Orientales)*. Rapport BRGM/RP-51197-FR.
- Hag, B. U., Hardenbol, J. & Vail, P. R. (1987) Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 millions years ago). *Science* 235, 1156–1167.
- Király, L. (1975) Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. In: *Hydrogeology of Karstic Terrains*, 53–67. IUG Sciences, no. 3.
- Mangin, A. (1975) Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de Docteur ès Sciences, Université de Dijon, France (*Ann. Spéol.* 1974, 29(3), 283–332; 29(4), 495–601; 1975, 30(1), 21–124).
- Séranne, M., Camus, H., Lucazeau, F., Barbarand, J. & Quinif, Y. (2002) Surrection et érosion polyphasées de la Bordure cévenole. Un exemple de morphogenèse lente. *Bull. Soc. Géol. France* 173(2), 97–112.