



Aix Marseille Université
Centre Européen de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement

Discipline : Sciences de la Terre
Ecole doctorale : Sciences de l'Environnement

THÈSE

pour obtenir le grade de
Docteur d'Aix Marseille Université

par

Arnaud Fournillon

Modélisation géologique 3D et hydrodynamique appliquées aux réservoirs carbonatés karstiques : caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset (Var et Bouches-du-Rhône, SE France)

Directeurs de Thèse : Bruno ARFIB & Jean BORGOMANO

Soutenue publiquement à Marseille le
devant la commission d'examen composée de

Bruno ARFIB (Mdc)	Aix-Marseille Université	Directeur de thèse
Jean BORGOMANO (Pr)	Aix-Marseille Université	Directeur de thèse
Hervé JOURDE (Mdc HDR)	Université de Montpellier 2	Rapporteur
Philippe RENARD (Pr)	Université de Neuchâtel	Rapporteur
Yves GUGLIELMI (Pr)	Aix-Marseille Université	Examineur
Nicolas MASSEI (Pr)	Université de Rouen	Examineur
Sophie VISEUR (IR)	Aix-Marseille Université	Invitée
Laurent CADILHAC	Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse	Invité
Jean-François TAPOUL	Conseil Général du Var	Invité

Résumé

Cette thèse a pour but de contribuer à l'étude des réservoirs carbonatés karstiques par une approche intégrant modélisation géologique numérique 3D et hydrogéologie. Une méthodologie originale a été ainsi développée pour être appliquée à la caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset (Bouches-du-Rhône et Var, SE France). Cette méthodologie lie l'architecture géologique 3D du réservoir à ses propriétés hydrodynamiques extraites de son étude hydrogéologique. Cette zone est un synclinal de roches sédimentaires mésozoïques d'une épaisseur pouvant atteindre 3000m. Ces roches affleurent sur environ 650 km², et ont subies de nombreuses phases de fracturation et karstification. La synthèse des données existantes permet de définir sept intervalles lithostratigraphiques qui représentent la compartimentation verticale de l'unité. Ce découpage a servi de base à l'élaboration d'une série de coupes géologiques proposant de nouvelles interprétations structurales. Ces coupes, basées sur une récolte de données de terrain, ont permis de construire un géomodèle structural 3D du secteur. Le terrain a également fait l'objet de l'acquisition de nouvelles données hydrogéologiques : sept sources ont fait l'objet d'un suivi en continu à l'aide de sondes de conductivité électrique, température et pression (CTD) ; plusieurs campagnes hydrochimiques exhaustives ont été menées pour obtenir le contenu en ions majeurs et en isotopes de l'eau des exutoires ; deux campagnes de jaugeages ont également eu lieu. Les enregistrements CTD ont été analysés selon les techniques d'analyses des séries temporelles. Deux nouvelles méthodes de traitement du signal sont proposées pour qualifier la fonctionnalité karstique des aquifères à partir de ces enregistrements CTD. Les analyses hydrochimiques ont permis de définir des bassins hydrogéologiques d'alimentation de sources par traçage naturel. Et les jaugeages ont servis à discuter de l'établissement d'un bilan hydrique général. Ces données hydrogéologiques représentent les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères « échantillonnés » à travers les sources. La connaissance de la géométrie 3D des couches, et de leurs propriétés géologiques et karstologiques, ouvre la voie à un changement d'échelle pour caractériser le réservoir dans son ensemble. Cette approche lie les observations de surface et de subsurface pour définir la compartimentation hydraulique de l'unité et cibler les intervalles les plus propices à l'exploitation de nouvelles ressources. La proposition de nouvelles ressources aquifères est discutée à l'échelle des sources ou à celle d'un forage profond. L'implantation de forages profonds se fait sur la base de carte de potentialité de présence de ressources aquifères. Ces cartes sont construites à l'aide du géomodèle 3D et d'une approche paramétrique de qualité des aquifères, intégrant données statiques et dynamiques. L'approche choisie pour cette étude permet donc d'intégrer dans un même cadre numérique des observations et des données, d'origines et de résolutions variées, pour caractériser un réservoir carbonaté karstique.

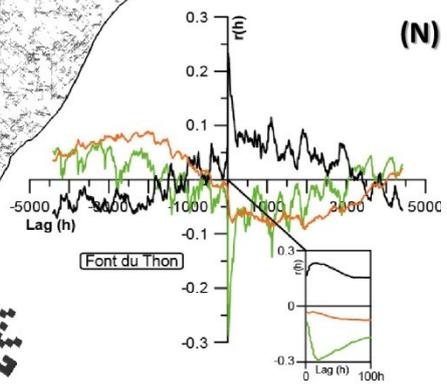
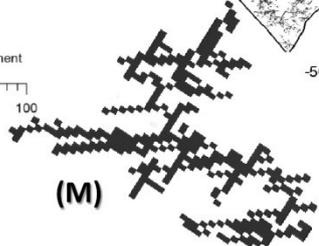
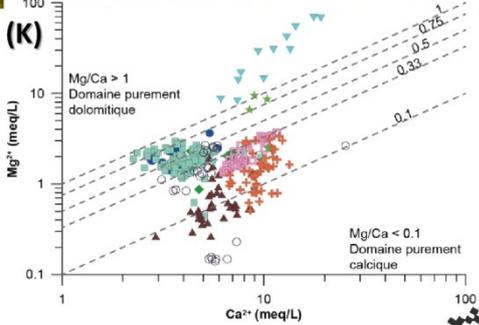
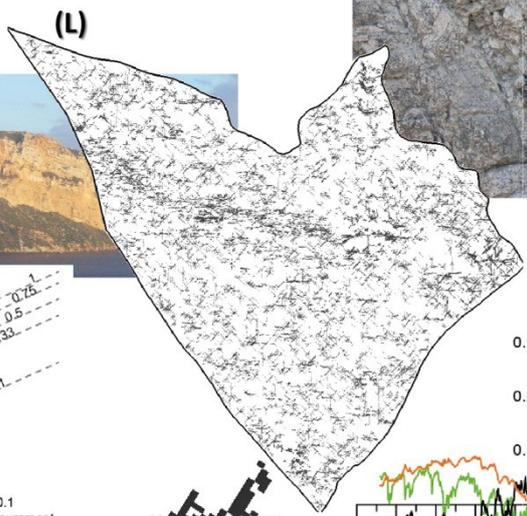
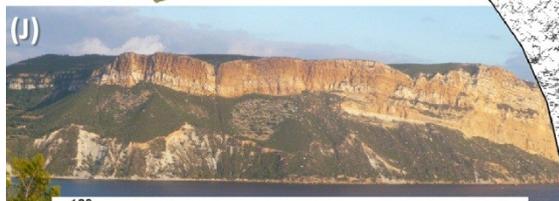
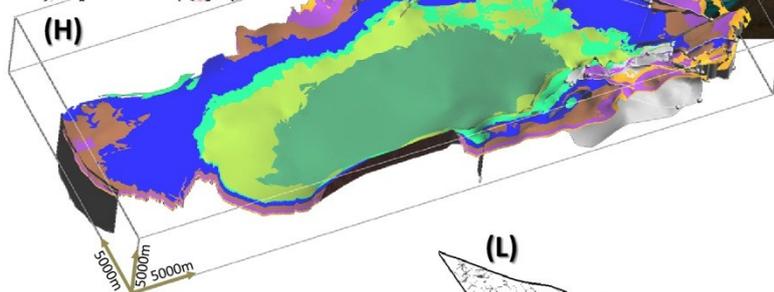
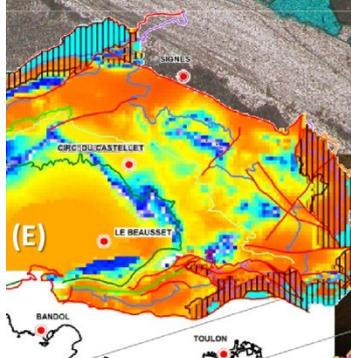
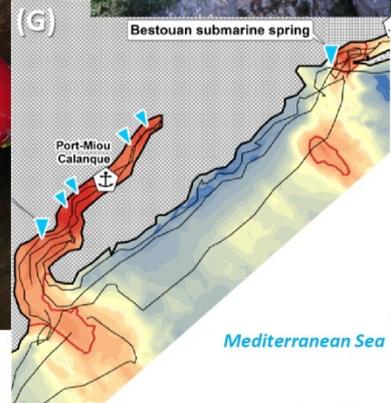
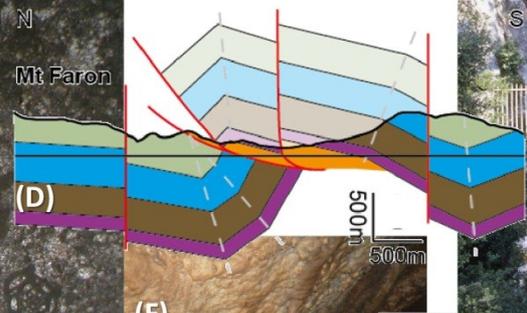
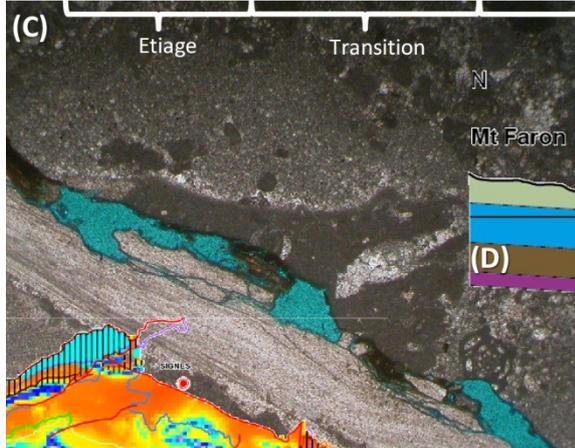
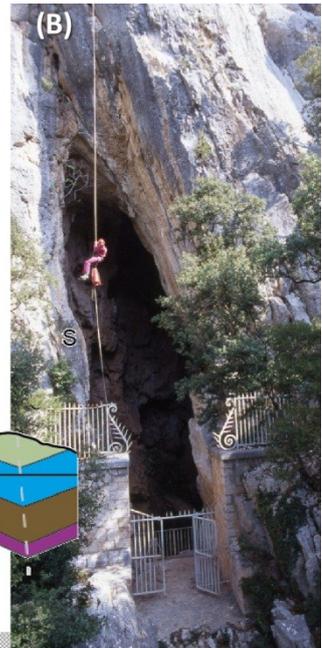
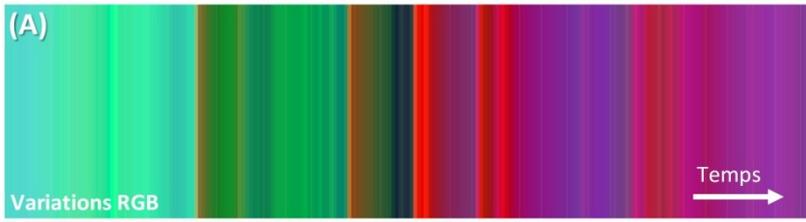
Abstract

The aim of this PhD thesis is to provide an original approach for the characterization of karstic carbonate reservoirs that integrates 3D geological modeling and hydrodynamics. The 3D geological model stands for the structural compartmentalization of the reservoir and the hydrodynamics provide dynamic properties for the understanding of the fluid flow. This methodology is applied to the characterization of the groundwater resources of the Beausset Unit (SE France). The study area is a syncline composed of nearly 3000 m of Mesozoic sedimentary rocks, which age from late Triassic to Upper Cretaceous. These rocks, which are mainly carbonates, crop out over an area of 650 km² and have known several phases of fracturation and karstification.

This study is divided in four parts: (1) synthesis of existing data, (2) 3D geological modeling, (3) study of hydrodynamics, and (4) integration of static and dynamic data in order to discuss the characterization of the groundwater resources in the Beausset Unit.

The existing data on stratigraphy, lithology, petrophysical properties, karstology and hydrogeology allow the definition of seven lithostratigraphic intervals that have been chosen for modeling. These intervals represent the vertical compartmentalization of the reservoir: each interval has a unique combination of karst and rocks properties. The building of the 3D geological model of the Beausset Unit relies on new structural cross-sections based on field survey and literature data. In the field, new hydrogeological data have been obtained: seven springs have been continuously monitored for their CTD (specific Conductivity, Temperature and Depth –pressure–) parameters, an almost exhaustive sampling of springs for their hydrochemistry and flow measurement surveys. The CTD recordings have been analyzed as time series in order to infer the flow units and the reservoir units. Two new methods have been proposed from this data: a new classification of karstic aquifers based on the impulse response of the springs (MIB method) and a measure of the karst functionality by the conversion of CTD series into color spectral bands (KaRGB method). The hydrochemical analyses have provided the hydrogeological compartmentalization by natural tracing. The flow measurement surveys have allowed quantifying the groundwater fluxes at the year scale.

The characterization of the static and dynamic properties of the Beausset Unit leads to the upscaling of these properties for pointing out the key horizons for groundwater tapping. New groundwater resources are proposed by spring tapping and by well drilling. The wellbore implantation proposition relies on a new method of multiparametric mapping of well potentiality (W_i index method). This method is based on the use of the 3D geological model as a framework for the synthesis of static and dynamic quality of each lithostratigraphic interval. The global methodology used in this PhD thesis allows the integration of observations, data and results, with various origins and resolution, in the same numeric framework for the characterization of carbonate karstic reservoirs.



Projet financé grâce au support de :



Légende de la page précédente :

(A) Variations RGB de la source Werotte représentant ses variations de paramètres *CTD*. (B) Source vauclusienne du Ragas (cliché Philippe Maurel). (C) Dissolution (en bleu) d'un test de rudiste le long d'un stylolithe vue en lame mince (Barrémien, Cassis). (D) Coupe structurale du Mont Faron. (E) Carte de l'indice *Wi* de potentialité de succès d'un forage pour la profondeur 500 m. (F) Mesure d'un plan de fracture dans la cavité l'Athos (Coniacien, Le Beausset). (G) Carte interpolée de salinité de la surface de l'eau de mer à Port-Miou et Bestouan. (H) Modèle géologique 3D de l'Unité du Beausset. (I) Dolomies de la Formation du Vallon de Toulouse (Oxfordien, Marseille). (J) Vue des falaises de Soubeyran depuis la Calanque de Port-Miou. (K) Graphique calcium-magnésium de l'intégralité des prélèvements hydrochimiques de l'Unité du Beausset. (L) Simulation stochastique du karst contenu dans le Bathonien supérieur du Massif des Morières. (M) Détail d'un des réseaux simulés. (N) Corrélogrammes croisés pluie – paramètres *CTD* de la source de la Font du Thon.