

THÈSE DE DOCTORAT

présentée pour obtenir le grade universitaire de
Docteur des Universités d'Aix-Marseille
Spécialité : *Géosciences de l'environnement*

Ecole Doctorale 251/Sciences de l'environnement

ANTHONY J.-B. TENDIL

**CONTRÔLES TECTONIQUES, CLIMATIQUES ET PALÉOGÉOGRAPHIQUES
SUR L'ARCHITECTURE STRATIGRAPHIQUE DE LA PLATE-FORME
CARBONATÉE URGONIENNE PROVENÇALE (FRANCE) :**
APPROCHES SÉDIMENTOLOGIQUES, GÉOCHIMIQUES & NUMÉRIQUES INTÉGRÉES.

**TECTONIC, CLIMATIC AND PALEOCEANOGRAPHIC CONTROLS
ON THE STRATIGRAPHIC ARCHITECTURE OF THE
URGONIAN PROVENCE CARBONATE PLATFORM (FRANCE):**
INTEGRATED SEDIMENTOLOGICAL, GEOCHEMICAL & NUMERICAL APPROACHES

MEMBRES DU JURY :

Pr. Philippe RAZIN – <i>ENSEGID</i>	Rapporteur
Pr. Rudy SWENNEN – <i>KU Leuven</i>	Rapporteur
Dr. Cathy HOLLIS – <i>University of Manchester</i>	Examineur
Pr. Jean BORGOMANO – <i>Aix-Marseille Université/CEREGE</i>	Examineur
Dr. François FOURNIER – <i>Aix-Marseille Université/CEREGE</i>	Directeur de thèse
Dr. Philippe LÉONIDE – <i>Aix-Marseille Université/CEREGE</i>	Co-Directeur de thèse
Dr. Jean-Pierre MASSE – <i>Aix-Marseille Université/CEREGE</i>	Invité
Dr. Sophie VISEUR – <i>Aix-Marseille Université/CEREGE</i>	Invité
Dr. Thierry ADATTE – <i>Université de Lausanne</i>	Invité
Dr. Youri HAMON – <i>IFPEN</i>	Invité
Dr. Jeroen KENTER – <i>TOTAL S.A.</i>	Invité
Dr. Gérard MASSONNAT – <i>TOTAL S.A.</i>	Invité
Dr. Jean-Paul ROLANDO – <i>TOTAL S.A.</i>	Invité

RÉSUMÉ

Les systèmes carbonatés, anciens et actuels, se retrouvent au cœur d'enjeux économiques et sociétaux majeurs, notamment dans le domaine énergétique où ils représentent une part considérable des réserves prouvées de gaz et de pétrole. La complexité de ces formations associée au sous-échantillonnage inhérent au domaine de subsurface compliquent toutefois la caractérisation géologique des champs producteurs d'hydrocarbures. La présente thèse se focalise sur la plate-forme urgonienne Provençale (Barrémien supérieur–Aptien inférieur), analogue d'affleurement prouvé de réservoirs carbonatés du Moyen-Orient.

Près d'une trentaine de coupes stratigraphiques, incluant notamment deux forages réalisés dans le cadre de ce travail, ont été considérées sur l'ensemble du domaine Provençal. La reconnaissance de surfaces d'émersion et d'ennoiement contraintes biostratigraphiquement permet d'appréhender régionalement l'évolution paléogéographique et l'architecture stratigraphique. Plusieurs phases de progradation en direction des bassins adjacents (Bassin Vocontien & Bassin Sud-Provençal), entrecoupées d'épisodes de perturbation de la production carbonatée (e.g. faciès à *Palorbitolina*), sont identifiées en Provence. Un scénario stratigraphique comparable est proposé pour les plates-formes urgoniennes du pourtour Vocontien. L'une des avancées majeures de ce travail concerne la révision du cadre temporel de l'Urgonien : la disparition des communautés à rudistes, préalablement reliée à la mise en place de l'Évènement Océanique Anoxique 1a durant l'Aptien inférieur, se corrèle désormais à un épisode de perturbation environnementale d'origine volcanique plus ancien, l'évènement anoxique Taxy du Barrémien terminal.

En Provence, la compartimentation réservoir de la plate-forme urgonienne est principalement contrôlée par le contexte séquentiel des dépôts qui induit une dualité entre des carbonates cimentés précocement et ceux préservant un certain espace poreux. Le développement de la microporosité à la suite de circulations météoriques liées au soulèvement tectonique du Bombement Durancien, daté de la transition Crétacé inférieur–Crétacé supérieur, accentue ce contraste. Cela conduit à la formation de grandes unités réservoirs principalement localisées dans les environnements de plate-forme interne des Monts de Vaucluse (partie Nord de la Provence) ; les valeurs associées de porosité et de perméabilité peuvent atteindre 36 % et 300 mD, respectivement. La succession d'évènements diagénetiques a grandement affecté les signatures géochimiques ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$) des carbonates urgoniens, empêchant toute utilisation de la chemostratigraphie comme outil de corrélation stratigraphique et de calibration biostratigraphique.

Les règles géologiques définies dans cette étude 1) servent à la réalisation d'un modèle numérique 3-D destiné aux simulations des écoulements à l'échelle de l'aquifère karstique de Fontaine-de-Vaucluse, dont le débit à l'exutoire est classé au cinquième rang mondial, et 2) aident à la prédiction des hétérogénéités sédimentaires et pétrophysiques des systèmes carbonatés.

Mots clés : *Urgonien – Plate-forme carbonatée – Barrémien/Aptien – Biostratigraphie – Architecture stratigraphique – Propriétés réservoir – Chemostratigraphie – Modélisation numérique.*

ABSTRACT

The analysis of carbonate systems is at the heart of major economic and societal challenges, especially in the energy field since they represent significant oil and gas reserves. However, the geological characterisation of carbonate producing fields is hampered due to the complexity of these formations and the inherent subsampling of the subsurface domain. The present thesis focuses on the Urgonian Provence platform (upper Barremian–lower Aptian interval) which is considered as a valid outcrop analogue of Middle East carbonate reservoirs.

About thirty stratigraphic sections, including newly acquired cores, are considered throughout the Provence domain. The recognition of biostratigraphically constrained exposure and drowning surfaces enables us to restore the regional palaeogeographic evolution along with the stratigraphic architecture. Several phases of platform progradation toward the adjacent basins (namely the Vocontian Basin and the South Provence Basin), interrupted by episodes of changes in carbonate production (e.g. *Palorbitolina*-rich facies), are identified in Provence. A comparable stratigraphic scenario is proposed for the peri-Vocontian Urgonian platforms. One of the major advances of this work concerns the revision of the Urgonian chronostratigraphic framework: the demise of the rudistid communities, previously ascribed to the onset of the Lower Aptian Oceanic Anoxic Event 1a, is now correlated to an older episode of volcanically-induced palaeoenvironmental perturbation, namely the Taxy anoxic event dated to the uppermost Barremian.

In Provence, the reservoir compartmentalisation of the Urgonian platform is mainly controlled by the sequence stratigraphic context that induced a distinction between early cemented carbonates and those preserving part of their original porosity. Such an early contrast in porosity is subsequently enhanced by the extensive development of microporosity in response to meteoric groundwater circulations during the Durancian tectonic uplift at the Lower/Upper Cretaceous transition. The resulting reservoir units are mostly located in the inner platform settings of the Monts de Vaucluse (North Provence); the associated porosity and permeability values can reach up to 36 % and 300 mD, respectively. The successive diagenetic stages largely impacted the geochemical signatures ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$) of the Urgonian carbonates, hence limiting the use of chemostratigraphy for stratigraphic correlation and biostratigraphic calibration purposes.

The geological rules provided in this study 1) are implemented into a 3-D numerical model intended for fluid-flow simulations at the scale of the Fontaine-de-Vaucluse karstic aquifer, whose karst spring is the fifth largest in the world, and 2) help in predicting the sedimentary and petrophysical heterogeneities of carbonate systems.

Keywords: *Urgonian – Carbonate platform – Barremian/Aptian – Biostratigraphy – Stratigraphic architecture – Reservoir properties – Chemostratigraphy – Numerical modelling.*