

Sédimentologie et pétrophysique de la craie – Impact sur les écoulements actuels dans la Pointe de Caux (France)

Thierry Gaillard¹, Éric Lasseur², Jessica Saiag^{3,4}, Thomas Dewez², Jean-Pierre Sizun⁵ et Pierre-Yves Collin³.

Introduction : les modèles hydrogéologiques de la craie

La craie est souvent présentée comme un milieu poreux, homogène et isotrope. Juignet (1997) propose de la définir comme un sédiment qui se « présente généralement comme une roche à grain très fin, friable, peu indurée, de couleur blanchâtre ». Dans cette formation, les modèles hydrogéologiques utilisés vont du milieu poreux au milieu karstique en passant par le milieu fissuré (Gaillard *et al.*, 2018). Ces différentes approches ont été l'objet de controverses entre les tenants des circulations rapides (Martel) et les tenants de la notion d'écoulement de nappe (Héricart de Thury). La coexistence de ces modes d'écoulement a conduit à définir dans la craie, la microporosité (matrice), la mésoporosité (fissures) et la macroporosité d'origine karstique (Lepiller, 2004).

Les rapports entre la variabilité des faciès de la craie, sa texture, ses séquences de dépôts et la répartition des écoulements de l'eau souterraine n'ont que rarement fait l'objet d'analyse croisée. Il est fait allusion le plus souvent à la fissuration pour expliquer les variations de transmissivité. Tout au plus, la base du Coniacien est-elle reconnue comme la craie la plus aquifère (Roux, 1976).

Cet article propose une approche novatrice qui permet de mieux appréhender la distribution des pro-

priétés réservoirs des formations crayeuses. Les falaises de la Pointe de Caux (Fig. 1) ont fait l'objet d'études sédimentologiques stratigraphiques et pétrophysiques (Lasseur, 2007 ; Saiag, 2016) qui permettent de mieux contraindre les propriétés réservoirs de ces dépôts. Les résultats sont mis en perspective par une approche hydrogéologique fondée sur la répartition des écoulements actuels (sources de la côte) et leur position stratigraphique.

Contexte géologique : Le Crétacé supérieur du bec de Caux

Les dépôts du Bec de Caux couvrent l'intervalle allant du Cénomaniens au Santonien. Les études abordées ici se sont concentrées sur l'intervalle Turonien supérieur à Santonien qui forme le substratum de cette zone etaffleure le long de la côte de la Manche entre Bruneval et Fécamp.

Ces dépôts, relativement argileux au Cénomaniens sont quasi exclusivement carbonatés à partir du Turonien. Les dépôts du Turonien au Santonien du Bec de Caux sont, en comparaison de leurs équivalents à l'est de Fécamp, peu épais. Ceci est particulièrement le cas pour le Turonien moyen à supérieur. Les dépôts Cénomaniens-Turonien sont des sédiments classiques de plate-forme carbonatée dominée par l'action de la houle, (Rampe de tempête, Lasseur, 2007). L'intervalle Turonien moyen-supérieur correspond à une période de bas niveau marin, qui s'exprime dans cette zone par une sédimentation peu épaisse formée par un empilement de niveaux condensés (hardgrounds Tilleul de Juignet 1974) enregistrant un très faible taux de sédimentation et une forte diagenèse précocé (Juignet 1974 ; Lasseur, 2007 ; Lasseur *et al.*, 2009).

L'intervalle Coniacien-Santonien est marqué par des géométries et des faciès sédimentaires relativement complexes qui sont le produit de l'action de courants de contour (Quine et Bosence, 1991 ; Lasseur, 2007 ; Saiag, 2016). Ce sont des courants de densité s'écoulant sur le fond marin, liés à la circulation thermohaline océanique, et sont habituellement rencontrés à des profondeurs importantes sur le talus séparant les domaines continentaux des domaines océaniques. La configuration particulière du Crétacé supérieur, marqué par un très haut niveau marin global (Haq *et al.*, 1987) et le début de l'installation d'une circulation thermohaline reliant probablement l'océan téthysien et l'atlantique nord en cours d'ouverture (Pucéat,

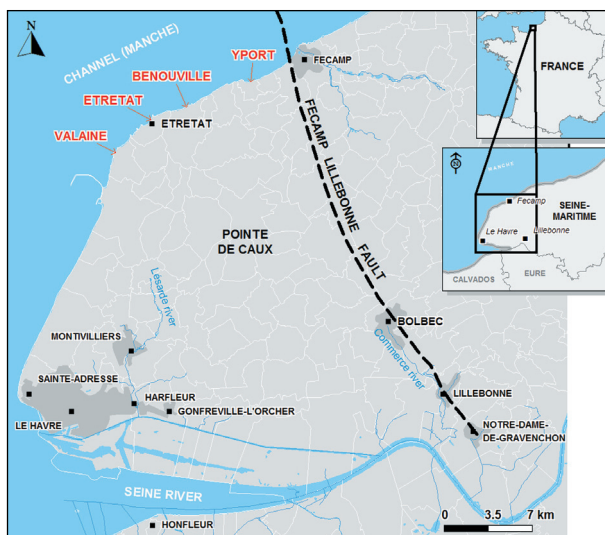


Figure 1. Localisation de la zone d'étude.

1. CPGF-HORIZON, 49 avenue Franklin Roosevelt, 77210 Avon. Courriel : tgaillard@cpgf-horizon.fr

2. BRGM Orléans. Courriel : e.lasseur@brgm.fr

3. Laboratoire Biogéosciences UMR 6282 UBFC/CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté. Courriel : saiag.jessica@gmail.com

4. Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs-IPRA, UMR5150, CNRS/TOTAL/Univ Pau & Pays Adour/E2S UPPA, 64000, Pau, France.

5. Laboratoire Chrono-environnement UMR 6249 UBFC/CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté. Courriel : jean-pierre.sizun@univ-fcomte.fr

2004), a permis la mise en place de ces dépôts sur un domaine peu profond (quelques centaines de mètres).

Géométries et faciès du Coniacien-Santonien, hétérogénéités et géométries 3D des dépôts contouritiques

Les géométries formées par l'action de ces courants sur le fond sont très différentes des géométries planes et relativement uniformes, couramment postulées pour la Craie. Les courants de densité, de par leur tendance à la chenalisation, créent des variations de vitesse d'écoulement sur le fond. Ce phénomène a créé une série de zones chenalisées de taille kilométrique, séparées par des zones intermédiaires de « levées » (moat). À l'intérieur des zones chenalisées, de multiples chenaux sont visibles, séparés par des dunes plus ou moins asymétriques de taille hectométrique et de hauteurs variant de la dizaine à plusieurs dizaines de mètres. Les vitesses de courant sont particulièrement importantes à l'intérieur des chenaux et plus faibles sur leur bordure. Ceci a pour conséquence des variations de faciès à l'échelle hectométrique. Au niveau des chenaux, les fortes vitesses de courant empêchent le dépôt de sédiments fins qui constituent l'essentiel des éléments, ce qui a pour conséquence une absence de dépôt et une lithification précoce (hardground) accompagné par quelques dépôts grossiers de texture bien triée (texture packstone à grainstone). Le ralentissement des vitesses de courant à distance des chenaux a pour conséquence un accroissement des volumes déposés et la formation à partir des dépôts moins grossiers et moins triés, des dunes de matériel plus fins. Ce motif (Fig. 2) visible à l'échelle d'une association chenal-dune est également visible au niveau des zones chenalisées kilométriques et des levées plurikilométriques qui les

séparent. Les chenaux kilométriques sont formés d'empilement de hardgrounds, passant latéralement à des dunes amalgamées ; les levées plurikilométriques, sont constituées de dépôts relativement fins et uniformes (Fig. 3).

Ceci crée des hétérogénéités à l'échelle hectométrique et kilométrique du réservoir crayeux. Les hardgrounds, qui correspondent aux bases de chenaux, constituent les hétérogénéités les plus importantes en termes de faciès. Leur lithification précoce crée des zones denses et peu perméables surmontées par des dépôts grossiers et poreux. Enfin, ils sont fréquemment associés à une dolomitisation importante, qui a été en majeure partie dédolomitisée du fait du caractère métastable de la dolomite sous certaines conditions (niveau orange foncé de la figure 2).

Propriétés pétrophysiques de la Craie du Pays de Caux

Les propriétés matricielles de la Craie du Pays de Caux (Figure 4) varient considérablement avec des porosités totales de 8,3 à 46,5 %, et des perméabilités matricielles très faibles (0,006 mD) jusqu'à des perméabilités atypiques et très fortes (470 mD, en l'absence de fractures). Les faciès de rampe carbonatée (Cénomarien moyen-Turonien) présentant des textures fines de type mudstone à micro-packstone ont de fortes porosités (26,1 à 46,5 %) et de faibles perméabilités (0,04 à 6 mD ; Figure 4, losange gris). Les faciès fins de mise en place des dunes et de remplissage des chenaux contouritiques présentent de fortes porosités (27,9 à 45,5 %) pour des perméabilités intermédiaires (0,6 à 9,8 mD ; Figure 4, rond bleu). Les faciès grossiers de début de remplissage des chenaux présentent de fortes porosités (25 à 44,7 %) pour

de fortes à très fortes perméabilités (1,7 à 477 mD ; Figure 4, rond jaune). Les faciès de hardground, associés ou non aux contourites, et avec ou sans dolomitisation/dédolomitisation (Turonien supérieur-Coniacien supérieur) présentent globalement de faibles porosités (8,3 à 32,6 %) pour de très faibles perméabilités, à l'exception de certains niveaux dédolomitisés qui présentent de très fortes perméabilités (0,006 à 273 mD ; Figure 4, rond orange).

Cette forte variabilité matricielle en termes de volume (porosité) et d'écoulement (perméabilité) des fluides est observable à l'échelle décimétrique à kilométrique. Les faciès de rampe carbonatée et

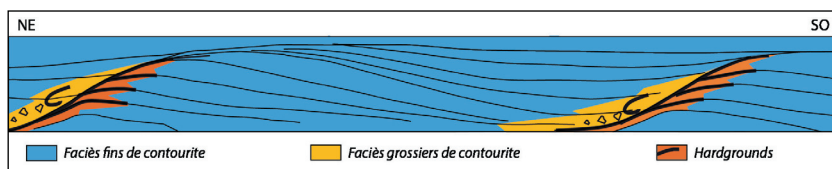


Figure 2. Schéma des contourites (d'après Saiag, 2016 modifié).

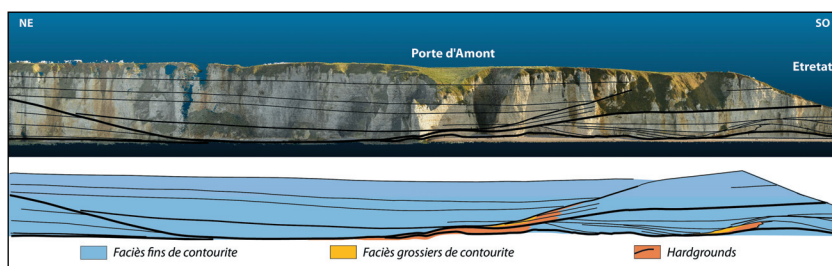


Figure 3. Exemple de géométrie de type contourite, Porte d'Amont Étretat. Source : Lasseur inédit.

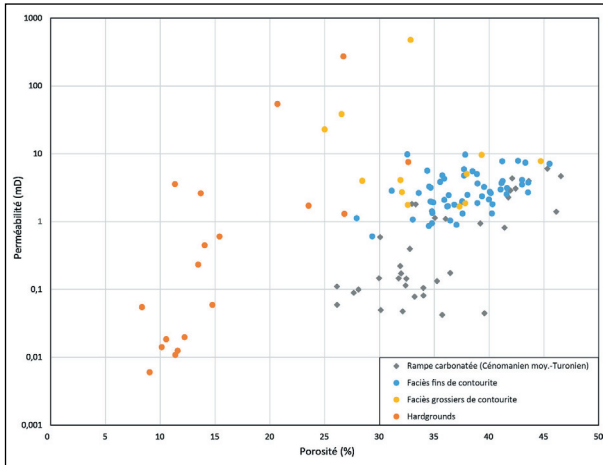


Figure 4. Diagramme porosité versus perméabilité matricielle en fonction des faciès (Saïag, 2016).

les faciès contouritiques fins, qui constituent une proportion très importante des craies du Pays de Caux, présentent de fortes porosités, constituant ainsi potentiellement d'importants volumes de stockage des fluides. Au contraire, les faciès contouritiques grossiers et les faciès de hardground constituent une très faible proportion des craies du Pays de Caux. Du fait qu'ils présentent des forts contrastes de porosité /perméabilité avec les faciès encaissants, ces faciès contouritiques ont un rôle majeur dans la circulation des fluides. Les hardgrounds directement sous-jacents, servent de barrière imperméable, localisés et chenalisants dans le cas des contourites (Coniacien), ou au contraire avec une large étendue spatiale dans le cas du Turonien supérieur.

Un autre cas de figure rencontré est que ces hardgrounds sont préférentiellement fracturés du fait de leur contraste de dureté avec les sédiments encaissants. Ils peuvent alors présenter des perméabilités de fracture relativement élevées.

Analyse des écoulements actuels : rôle des hiatus

Une approche indirecte des propriétés réservoir de la craie a consisté à étudier la stratigraphie des principales sources qui vidangent la nappe de la craie turonoconiacienne dans la Manche entre Le Tilleul (Valleuse d'Antifer) et Yport. Certaines sources se situent sur le platier tandis que d'autres sont curieusement perchées à plusieurs mètres dans la falaise au-dessus du niveau de base marin. Ces « pisseuses » (voir couverture de ce numéro), selon la dénomination vernaculaire, permettent d'étudier les horizons stratigraphiques au sein desquels elles sourdent.

La distribution spatiale et stratigraphique des sources visibles en falaise dans la série crayeuse du Turonoconiacien est en lien étroit avec les niveaux condensés (hardgrounds et autres) qui marquent les arrêts de sédimentation de la craie. Ceci illustre bien que ces niveaux et les dépôts associés constituent des horizons hydrogéologiques favorables à la concentration des écoulements à leur sommet.

La géométrie et la position stratigraphique des niveaux condensés entraînent une distribution stratigraphique plus ou moins complexe des sources. Plusieurs cas de figure sont visibles (Fig. 5) ; en effet les sources se situent :

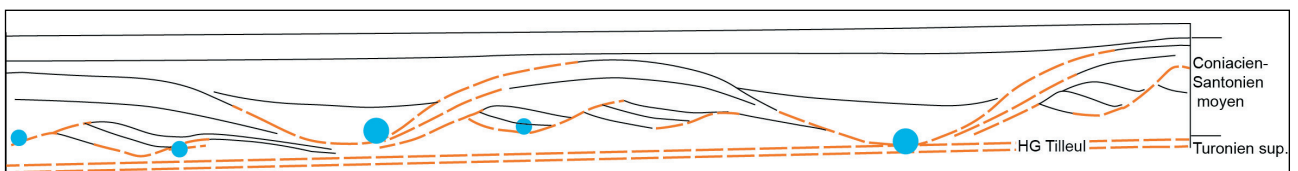


Figure 5. Schéma simplifié des géométries sédimentaires, de la répartition des niveaux condensés et de la position des sources le long du littoral du Bec de Caux.

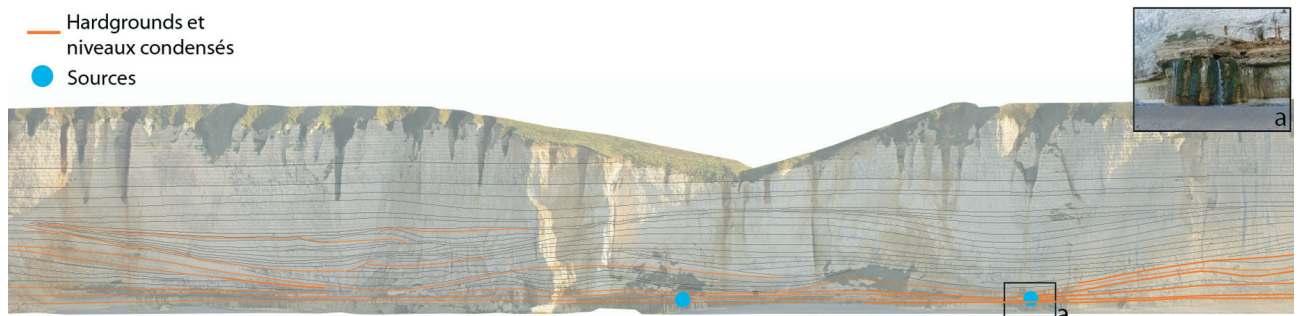


Photo 1. Géométries sédimentaires, distribution des principaux niveaux condensés et localisation des sources entre Tilleul et Etretat (d'après Lasseur, 2007). On remarquera que les Pisseuses de Valaines (encart) se situent à l'interface entre les hardgrounds plan de la base de la falaise (correspondant aux hardgrounds Tilleul du Turonien supérieur (Juignet 1974)) et les hardgrounds délimitant les chenaux et dunes contouritiques.

- immédiatement au-dessus des hardgrounds Tilleul d'âge Turonien supérieur ;
- à la base des chenaux contouritiques kilométriques associés au hardgrounds qui forment la base des chenaux. Localement ces chenaux peuvent être au contact avec les hardgrounds Tilleul, c'est le cas des Pisseuses de Valaines ;
- associées à des hardgrounds locaux associées à des géométries de plus petites tailles, situés sur le bord des chenaux ou dans des dunes hectométriques.

Les niveaux condensés situés en base des chenaux contouritiques sont par ailleurs fréquemment affectés par une dolomitisation (dédolomitisée) (Gaillard et Hauchard, 2018 et Saiag, 2016), qui traduit une paléo-circulation de fluides. C'est le cas des Pisseuses de Valaines mais également des sources d'Yport, les plus importantes en débit de toute la côte.

Conclusion

L'approche sédimentologique, pétrophysique et hydrogéologique de la craie du Turono-Coniacien de la Pointe de Caux (Normandie, France) montre des variations importantes de la porosité de la craie. Les faciès fins qui constituent l'essentiel des dépôts crayeux ont des porosités importantes (25 à 45%) et donc une forte capacité au stockage de l'eau. Les niveaux condensés et les faciès grossiers de haute énergie souvent associés ont par contre, la capacité de drainer les formations crayeuses par le développement d'une perméabilité d'un ou deux ordres de grandeur supérieur à celui de la masse crayeuse. La résultante est un comportement qui peut être assimilé à un aquifère à double porosité.

Cette dissociation des fonctions capacitive et transmissive de la craie conduit à la formation d'horizons karstogènes, contraints par la lithologie et initiés au niveau des niveaux condensés. Ces horizons constituent des « inception horizons » (Lowe et Gun, 1997), définis comme des niveaux stratigraphiques plus sensibles à la formation de vides par karstification que le reste de la formation géologique.

Une implication opérationnelle directe de cette théorie est une réévaluation des modes de recherche en eau dans la craie et des résultats de tests de traçages. L'étude des formations traversées est fondamentale pour décider de la conduite des travaux en fonction de la localisation des horizons karstogènes potentiels. La bancarisation des données de diagraphies sera nécessaire pour optimiser l'exploitation et la protection du plus vaste aquifère du bassin parisien, l'utilisation de données géophysiques en forage ou aéroportées (Reininger *et al.*, 2014) et des imageries de parois pourraient permettre de localiser les zones favorables en l'absence d'affleurement.

Bibliographie

- Gaillard T. et Hauchard E., 2018. Les horizons karstogènes de la craie : apport de la stratigraphie aux écoulements de la Pointe de Caux (France). 22èmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. « Hydrogéologie de la craie » Le Havre, mai 2018.
- Gaillard T., Hauchard E. et Rodet J., 2018. Livret-guide Excursion hydrogéologique en Pointe de Caux, France Colloque Craie 2018 : vendredi 25 mai - samedi 26 mai 2018. 42 p.
- Haq B.U., Hardenbol J. et Vail P.R., 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, 235, 1156-1167.
- Juignet P., 1974. La transgression Crétacée sur la bordure orientale du Massif Armoricaire. Aptien, Albien, Cénomaniens de Normandie et du Maine. Le stratotype du Cénomaniens. Thèse de doctorat, Université de Caen, France, 810 p.
- Juignet P., 1997. La craie : sédimentation et enregistrements stratigraphiques. Apports des méthodes d'études classiques et d'approches nouvelles. *The Chalk: a tool for sedimentology and stratigraphy. Classic and new approaches. Annales de la Société Géologique du Nord*, 5 (2), 3 : 145-168.
- Lasseur E., 2007. La Craie du Bassin de Paris (Cénomaniens-Campaniens, Crétacé Supérieur). Sédimentologie de faciès, stratigraphie séquentielle et géométrie 3D. Thèse de doctorat, Université Rennes 1, France, 435 p.
- Lasseur E., Guillocheau F., Robin C., Hanot F., Vaslet D., Coueffe R. et Neraudeau D., 2009. A relative water-depth model for the Normandy Chalk (Cenomanian-Middle Coniacian, Paris Basin, France) based on facies patterns of metre-scale cycles. *Sed. Geol.*, 213, 1-26.
- Lepiller M., 2004. Un exceptionnel laboratoire de la genèse des aquifères karstiques : la craie du bassin de Paris (Normandie, Perche, Gâtinais, forêt d'Othe) in Géologie et hydrogéologie du bassin de Paris, Avancées et perspectives. 11èmes journées techniques du CFH.
- Lowe D. et Gunn J., 1997. Carbonate speleogenesis : an inception horizon hypothesis. *Acta carsologica*, XXCI/2 (38) : 457-488.
- Pucéat E., Lécuyer C. et Reisberg L., 2005. Neodymium isotope evolution of NW Tethyan upper ocean waters throughout the Cretaceous. *Earth and Planetary Science Letters*, 236 (3-4), 705-720.
- Quine M., Bosence D., 1991. Stratal geometries, facies and sea-floor erosion in Upper Cretaceous chalk, Normandy, France. *Sedimentology*, 38, 1113-1152.
- Reninger P.A., Martelet G., Lasseur E., Beccaletto L., Deparis J., Perrin J. et Chen Y., 2014. Geological environment of karst within chalk using airborne time domain electromagnetic data cross-interpreted with boreholes. *Journal of Applied Geophysics*, 106, 173-186.
- Roux J.-C., 1976. État des connaissances sur l'hydrogéologie de la craie en Normandie. Principales méthodes d'études. BRGM, 17 p.
- Saiag J., 2016. Caractérisation des hétérogénéités sédimentaires et pétrophysiques d'un réservoir carbonaté microporeux. Le cas de la Craie (Crétacé supérieur, Bassin de Paris). Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, France. 404 p.