

Une détermination originale de la température et de l'âge des cristaux de calcite dans des brèches et des filons en bordure du fossé de Gondrecourt par thermométrie Δ_{47} et datation U-Pb sur des cristaux de calcite

Magali Bonifacie¹, Damien Calmels¹, Céline Pisapia¹, Pierre Deschamps², Bruno Hamelin², Benjamin Brigaud³, Maurice Pagel³, Amandine Katz¹, Cécile Gautheron³, Bertrand Saint Bezar³, Philippe Landrein⁴

¹ IPGP, Institut de Physique du Globe de Paris, Equipe de Géochimie des Isotopes Stables, Sorbonne Paris cité, 1 rue Jussieu, 75005 Paris 05

² CEREGE

³ Université Paris-Sud, UMR-CNRS 8148 Géosciences Paris-Sud (GEOPS), Bât. 504, 91405 Orsay, France

⁴ Andra, Route Départementale 960, 55290 Bure, France

1 Introduction

Dans les études de diagenèse concernant les formations silico-clastiques et carbonatées, il est souvent difficile de déterminer les températures avec précision des différents épisodes diagénétiques rencontrés dans un échantillon. Les inclusions fluides sont très utiles dans certains cas mais dans les carbonates, elles se rééquilibrent. Si la température est basse, il se forme des inclusions monophasées qui ne permettent pas de déterminer une température. Il est donc fondamental d'avoir une méthode qui permet de déterminer la température de formation des différentes générations de carbonates. Depuis peu, les conditions de température et l'origine des fluides alors mis en jeu (marins, fortement évaporés, météoriques, profonds) peuvent être abordées grâce à l'utilisation du géothermomètre des carbonates dit "clumped isotope" ou " Δ_{47} " qui permet de contraindre de manière absolue la température du fluide à partir duquel les minéraux carbonatés se sont formés. En effet, ce thermomètre Δ_{47} repose sur un équilibre interne au carbonate et de l'abondance des liaisons $^{13}\text{C}-^{18}\text{O}$ dans la structure des carbonates qui dépend théoriquement uniquement de la température de précipitation (e.g., Eiler 2007, Bonifacie et al., 2013, Huntington et al., 2009). La composition Δ_{47} d'un carbonate est donc totalement indépendante de la composition du fluide à partir duquel le minéral a précipité (une des limites importante de la thermométrie $\delta^{18}\text{O}$, pourtant la plus quantitative jusqu'alors). Le Δ_{47} permet ainsi de recalculer aisément la composition $\delta^{18}\text{O}$ du fluide (en connaissant la température et le $\delta^{18}\text{O}$ du carbonate) et donc de mieux contraindre l'origine de ce fluide (e.g., Bristow et al., 2011).

Le géothermomètre Δ_{47} est donc un outil particulièrement prometteur pour reconstruire non seulement les environnements de dépôts ou de carbonatation des carbonates mais également

l'histoire des processus diagénétiques précoces à tardifs. Ce thermomètre Δ_{47} avait été jusqu'à présent majoritairement utilisé pour des reconstructions paléoclimatiques après que la préservation du caractère primaire des carbonates utilisés ait été établi au travers d'études pétrographiques et géochimiques ; mais les investigations récentes sur la systématique du thermomètre Δ_{47} menées (Bonifacie et al., 2013, Calmels et al., 2014) nous permettent aujourd'hui d'élargir son champ d'application dans le contexte des reconstructions de l'histoire diagénétique des carbonates. Il est en effet aujourd'hui possible de reconstruire avec des précisions inégalées la température de croissance d'un carbonate (e.g., précisions de l'ordre de $\sim 3^\circ$ en dessous de 50°C , 8° à 100°C) mais également le $\delta^{18}\text{O}$ du fluide à partir duquel il a précipité (précision de l'ordre de 1‰).

Ces dix dernières années, la connaissance de l'histoire thermique et des périodes de paléo-circulations à l'origine des cimentations, et de la forte réduction des perméabilités dans les calcaires du Jurassique ont été considérablement améliorées. Le croisement de géothermomètres variés (traces de fission sur apatite, microthermométrie des inclusions fluides dans la halite, évolution de la matière organique, réflectance de la vitrinite, Tmax, MagEval) a permis de contraindre précisément l'histoire thermique des couches géologiques du mésozoïque (Blaise et al., 2014). Le maximum thermique atteint à la base des calcaires du Jurassique moyen est de $60 \pm 5^\circ\text{C}$, soit environ 25°C de plus que la température actuelle. Différentes études diagénétiques, couplant observations pétrographiques et analyses des compositions isotopiques en oxygène des carbonates ($\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$) ont permis de caractériser 3 principaux épisodes de cimentations calcitiques, obturant dans certains cas l'intégralité de l'espace poreux (Buschaert et al., 2004; Vincent et al., 2007;

Brigaud et al., 2009; André et al., 2010). En revanche, les interprétations des $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ sont rendues délicates, puisqu'ils dépendent simultanément de la température et de la composition isotopique en oxygène du fluide ($\delta^{18}\text{O}_{\text{fluide}}$) au moment de la précipitation. En conséquence, les interprétations des $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ des mêmes objets (ciments calcitiques obturant la porosité matricielle ou fissurale) peuvent être diamétralement opposées (Buschaert, 2001 versus Vincent, 2007) en fonction des hypothèses faites sur un des deux paramètres inconnus (T et $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluide}}$). Ceci démontre que la dépendance de la température et de la composition du fluide de précipitation constitue des verrous dans les études diagénétiques.

L'âge de cristallisation peut être un deuxième verrou qui limite grandement la compréhension de la diagenèse dans l'Est du Bassin de Paris, et plus généralement dans tous les bassins sédimentaires du monde. Or des travaux récents de datation U-Pb des cristaux de calcite dans les formations calcaires jurassiques indiquent deux grands stades de dépôt des ciments, l'un à environ 148 Ma et l'autre à environ 33 Ma (Pisapia et al., 2011). Ces datations sont très importantes afin d'avoir des contraintes chronologiques absolues sur les phases de circulations fluides et la précipitation des ciments associés.

En parallèle, pour une reconstruction détaillée de l'histoire thermique du bassin de Paris, il est nécessaire de bien comprendre le fonctionnement des structures faillées dans la zone d'étude. Parmi celles-ci, le fossé de Gondrecourt a été le mieux étudié jusqu'à maintenant.

Cette étude s'attachera à mieux reconstruire l'histoire diagénétique de l'Est du Bassin de Paris avec des déterminations précises de l'âge et des températures de cristallisation des calcites secondaires. Des échantillons de calcites colmatant la porosité intergranulaire ou remplissant des microfractures ou remplaçant l'aragonite des coraux/bivalves dans les calcaires du Jurassique moyen, ayant potentiellement cristallisé au Crétacé inférieur, sont étudiés par thermométrie Δ_{47} . Les calcites de brèche et filons encaissés dans les carbonates du Kimméridgien du fossé de Gondrecourt sont également étudiés par thermométrie Δ_{47} et datés par la méthode U-Pb.

La combinaison de ces approches de thermométrie Δ_{47} et de datation devrait permettre d'atteindre un stade de connaissance inégalée jusqu'à présent en fournissant sur un même cristal de calcite, sa température et âge de cristallisation, ainsi que la source des fluides, ce qui représente une première à l'échelle internationale.

2 Résultats

Les températures obtenues par la méthode Δ_{47} sur les cristaux de calcite des brèches et des filons varient de 33°C à 41°C. Pour ces températures, les $\delta^{18}\text{O}$ des fluides minéralisateurs associés sont compris entre -3,3 et -5,1‰ ($\pm 1\text{‰}$); compatibles avec les $\delta^{18}\text{O}$ des eaux météoriques typiques du Bassin Parisien. Les âges déterminés par la méthode U-Pb sont de 40 Ma.

Echantillon	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	T Δ_{47} (°C)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{fluide}}$ (‰, SMOW)
C3b1 Calcite filon	2.12	-8.84	41	-3.3
B1a Calcite filon	2.07	-9.00	33	-5.1
A7 Ciment brèche	2.77	-8.31	37	-3.6
A6A Ciment brèche	2.02	-9.01	41	-3.7
B7B Ciment brèche	2.75	-8.51	35	-4.2

Tableau 1: Données de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ et températures Δ_{47} de cristallisation des cristaux de calcite bréchiques et filoniennes en bordure du fossé de Gondrecourt et calcul du $\delta^{18}\text{O}$ du fluide minéralisateur associé.

Conclusions

- (1) Les températures obtenues par la méthode Δ_{47} sur les cristaux de calcite des brèches et des filons varient de 33°C à 41 °C. En prenant en compte un gradient géothermique de 25°C/km (Landrein et al., 2013), une érosion de l'ordre de 300 m, la température de surface à l'Eocène est comprise entre 26 et 34°C, sans qu'il y ait de variation significative entre les brèches et les filons.
- (2) Pour les températures de cristallisation, les $\delta^{18}\text{O}$ des fluides minéralisateurs sont compris entre -3,3 et -5,1‰, compatibles avec les variations de $\delta^{18}\text{O}$ des eaux météoriques aux latitudes du Bassin de Paris. Ceci implique une source météorique des eaux.
- (3) L'âge isochrone ^{238}U - ^{206}Pb obtenu sur les cristaux de calcite est de 40 ± 4 Ma impliquant qu'au moins les premiers stades de fonctionnement du fossé sont éocènes.

Références bibliographiques

- Andre, G., Hibschi, C., Fourcade, S., Cathelineau, M., Buschaert, S., 2010. Chronology of fracture sealing a meteoric fluid environment: Microtectonic and isotopic evidence of major Cretaceous events in the eastern Paris Basin (France). *Tectonophysics*, 490: 214-228.
- Blaise, T., Barbarand, J., Kars M., Ploquin, F., Aubourg, C., Brigaud, B., Cathelineau, M., El Albani, A., Gautheron, C., Izart, A., Janots, D., Michels, R., Pagel, M., Pozzi, J.-P., Boiron, M.-C., Landrein P. 2014. Reconstruction of low burial (< 100 °C) in sedimentary basins: A comparison of geothermometer sensitivity in the intracontinental Paris Basin. *Marine and Petroleum Geology*. 53: 71-87
- Bonifacie, M., Calmels D., J. Ferry, J. Horita, C. Vasconcelos, B. Passey, J. Eiler. in prep for *Geochimica Cosmochimica Acta* Calibration of the « clumped » isotope thermometer to dolomites and high temperatures..
- Bonifacie, M. Eiler. J. 2013 Clumped isotope thermometry of marbles as an indicator of the closure temperatures of calcite and dolomite with respect to solid-state reordering of C-O bonds, *Mineralogical magazine*, 77, 735.
- Bonifacie, M. D. Calmels, A. Katz. 2013 Calibration du géothermomètre $\Delta 47$ pour la calcite et la dolomite: vers une meilleure quantification de l'histoire thermique et des paléocirculations des bassins. ASF Conférence 2013
- Brigaud, B., Durlot, C., Deconinck, J.-F., Vincent, B., Thierry, J., Trouiller, A., 2009. The origin and timing of multiphase cementation in carbonates: Impact of regional scale geodynamic events on the Middle Jurassic Limestones diagenesis (Paris Basin, France). *Sedimentary Geology* 222, 161-180.
- Bristow, T.F., Bonifacie, M., Derkowski, A. Eiler, J. M. Grotzinger, J.P. 2011 A hydrothermal origin for isotopically anomalous cap dolostone cements from south China, *Nature*, 474, 68-71.
- Buschaert, S., Fourcade, S., Cathelineau, M., Deloule, E., Martineau, F., Ayt Ougoudal, M., Trouiller, A., 2004. Widespread cementation induced by inflow of continental water in the eastern part of the Paris basin: O and C isotopic study of carbonate cements. *Applied Geochemistry* 19, 1201-1215.
- Calmels, D., Bonifacie M., Katz, A., Siebert J. Carbonate clumped isotope fractionation during phosphoric acid digestion of calcite, dolomite and aragonite minerals, *Goldschmidt Conference* 2014
- Eiler. J.M., 2007 "Clumped-isotope" geochemistry-The study of naturally-occurring, multiplysubstituted isotopologues, *EPSL*, 262, 309-327
- Huntington, K., Eiler J., Affek H., Bonifacie, M, Guo, W., Yeung L., et al., 2009. Methods and limitations of analyses of « clumped » CO₂ isotopes ($\Delta 47$) by gas source isotope ratio mass spectrometry, *Journal of Mass Spectrometry*, 44, 1318-1329.
- Landrein P., Vigneron G., Delay J., Lebon P., Pagel M. 2013 - Lithologie, hydrodynamisme et thermicité dans le système sédimentaire multicouche recoupé par les forages Andra de Montiers-sur-Saulx (Meuse). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 184, 6, 519-543.
- Pisapia, C., Deschamps, P., Hamelin, B., Battani, A., Buschaert, S., David, J., 2011. U/Pb dating of geodic calcites: A tool for paleohydrological reconstructions. *Mineralogical Magazine, Goldschmidt Conference Abstracts*, 75(3): 1647.
- Vincent, B., Emmanuel, L., Houel, P., Loreau, J.-P., 2007. Geodynamic control on carbonate diagenesis: Petrographic and isotopic investigation of the Upper Jurassic formations of the Paris Basin (France). *Sedimentary Geology* 197, 267-289