

► DU NOUVEAU DU CÔTÉ DES ÉVAPORITES ?



Les roches salifères, des structures clés pour l'industrie du pétrole

Les roches salifères sont un acteur important des bassins pétroliers. Elles forment des couvertures appréciées des pétroliers pour leur capacité de rétention des hydrocarbures, même si elles ont longtemps été un problème pour l'imagerie sismique, car elles occultaient les structures sous-jacentes. Grâce à leur plasticité, elles peuvent prendre des formes tectoniques originales (diapirs, mini-bassins). Avec les argiles, ces roches sont à l'origine des plans de décollement qui structurent les zones de collision mais aussi les bassins sédimentaires où des glissements gravitaires peuvent se produire au niveau d'un plan de décollement salifère. Leur forte conductivité thermique favorise les transferts de chaleur et donc le refroidissement des bassins sédimentaires. Comprendre leur rôle est donc essentiel

aux modélisations de bassin, aux modèles thermiques et aux modèles tectoniques. Par conséquent, comprendre leur origine et leur mise en place est déterminant pour ceux qui élaborent ces modèles.

Origine, mise en place ? Pourquoi se poser, se re-poser ces questions ?

On pense « depuis toujours » que les dépôts salifères résultent de l'évaporation de faibles tranches d'eau marine ou lacustre, grâce à l'action combinée du soleil et de la

sécheresse alternant avec des venues d'eau salées. On parle de marais salants, de sebkhas, de salars, etc. C'est pourquoi ces dépôts sont appelés « évaporites ». La séquence des précipitations est bien connue : le gypse précipite en premier, puis successivement la halite, la carnallite, la polyhalite, la sylvite, la kaïnite et la kiesérite.

Dans les bassins fermés profonds, qui ne présentent pas de faible tranche d'eau, les modèles de génération des évaporites posent problème. Ils partent du principe que les évaporites précipitées en surface « coulent » par gravité au fond du bassin. Il est en effet difficile d'imaginer la formation et le maintien en surface de la saumure dense nécessaire à la précipitation des sels. La descente « préservée » des cristaux de sels à travers une eau sous-saturée est également impossible thermodynamiquement.

Certaines observations sont très troublantes et nécessitent un examen attentif. Ainsi, dans les bassins aptiens du Congo, du Gabon et du Sergipe (Brésil), on trouve des dépôts d'évaporites extrêmement solubles (parfois sur plus de 400m), comme la bischofite ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$), la carnallite ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$) ou la tachyhydrite ($CaMg_2Cl_6 \cdot 12H_2O$) dans une région proche de l'équateur et caractérisée par un climat,



▲ Dépôt salifère (Gypse) surmonté d'une couche de marnes et de sables (Cormeilles en Parisis).

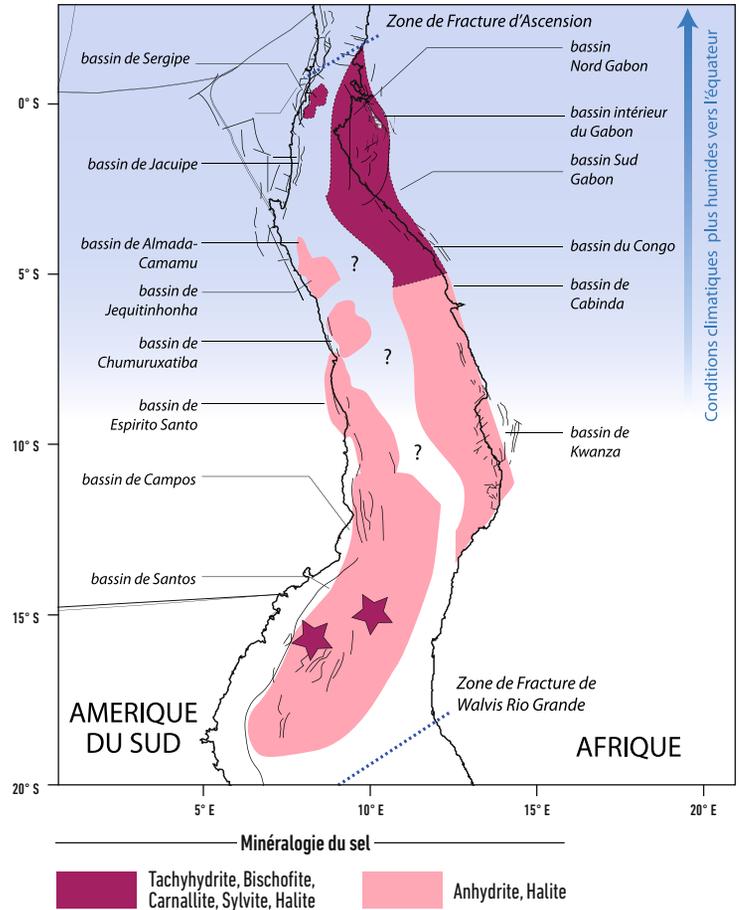
© FRANÇOIS MICHEL, BRGM

►► Efflorescence de sels sur une fracture de l'ophiolite d'Oman : évaporites ou déshydratites ?

© CALASSOU, TOTAL



FIGURE 1
Carte de dépôts salifères à l'Aptien dans l'Atlantique Sud.
 © CHABOUREAU, TOTAL



certes chaud, mais également humide et contrasté (Wardlaw, 1972) (figure 1). Ces accumulations restent mal comprises aujourd'hui. Ces sels nécessitent une forte et constante aridité pour pouvoir être produits à partir d'eau marine. Comment produire la tachyhydrite dont la déliquescence est très rapide au moindre soupçon d'humidité ? Malgré les scénarios les plus optimistes, Chaboureau et al. (2012) montrent par des simulations paléoclimatiques qu'il est pratiquement impossible d'atteindre l'aridité nécessaire à la formation de ces minéraux pendant l'Aptien, au moment de ces dépôts dans l'Atlantique Sud. Il pleut toujours à l'équateur !

On remarque aussi l'absence de sulfates dans certaines séquences « évaporitiques ». S'il est aisé de comprendre comment obtenir uniquement du gypse par évaporation partielle de l'eau de mer, puisqu'il précipite en premier, comment obtenir de la halite pure sans gypse ? Ce ne sont pas les mouvements salifères qui vont raffiner chimiquement à ce point la halite.

La présence de métaux tels que le plomb, le zinc, le fer et le manganèse (Wardlaw et Nicholls, 1972) signale également que d'autres processus opèrent dans le bassin salifère aptien du Congo. Dans un autre contexte, les riches minéralisations (Cu, Zn, Pb...) du Kupferschiefer situé sous les évaporites du Zechstein (Permien supérieur) du nord de l'Europe sont un indicateur intéressant sur lequel nous reviendrons.

On trouve également des turbidites dans le Messinien salifère de la Méditerranée ; or, les turbidites nécessitent une pente importante, un hydrodynamisme, un apport d'eau, qu'il est difficile de concilier avec un système évaporatoire sous faible tranche d'eau.

Enfin, une dernière observation pose problème : on sait depuis l'expérience de Usiglio (1849) que pour obtenir 1 km d'épaisseur de série salifère il faut évaporer une colonne d'eau de mer de 65 km. Il faut donc un très grand nombre de cycles remplissage/évaporation du bassin semi-fermé pour aboutir à ces épaisseurs. Tout en négligeant le caractère dissolvant de l'eau de mer sur les croûtes de sel précédemment formées.

Pour récapituler, le modèle dominant (Warren, 2006) expliquant les séries salifères par le biais de l'évaporation de l'eau de mer a bien du mal à expliquer les fortes épaisseurs, la présence des métaux, les turbidites et les formes cristallines marquant l'aridité extrême présentes à l'équateur.

Existe-t-il d'autres modèles ?

La littérature très récente commence à apporter des idées assez séduisantes et précises.

Pour tenter d'expliquer les observations et les contradictions que nous venons d'évoquer, certains auteurs ont proposé des modèles différents de dépôt des sels : fluides supercritiques en zone de rifting (Hovland et al., 2006) et sels précipités par serpentinisation en zone d'exhumation du manteau (Scribano et al., 2017 ; Hovland et al., 2018). Ces nouveaux modèles autorisent notamment des dépôts considérables de « déshydratites¹ » en eau profonde et ouvrent une

nouvelle perspective pour la compréhension des grands bassins salifères. On pourra ajouter à ces articles celui de Pinto et al. (2017), qui contextualise l'énorme consommation d'eau par serpentinisation lors des phases d'exhumation du manteau, mais sans faire le lien avec la formation des évaporites.

Plusieurs processus thermodynamiques sont à l'œuvre en profondeur dans la production de saumures (voire directement de sels solides) à partir de l'eau de mer en zone d'ouverture océanique. Certains n'impliquent que la chaleur apportée par le rift, d'autres impliquent aussi la consommation d'eau par l'hydratation des minéraux.

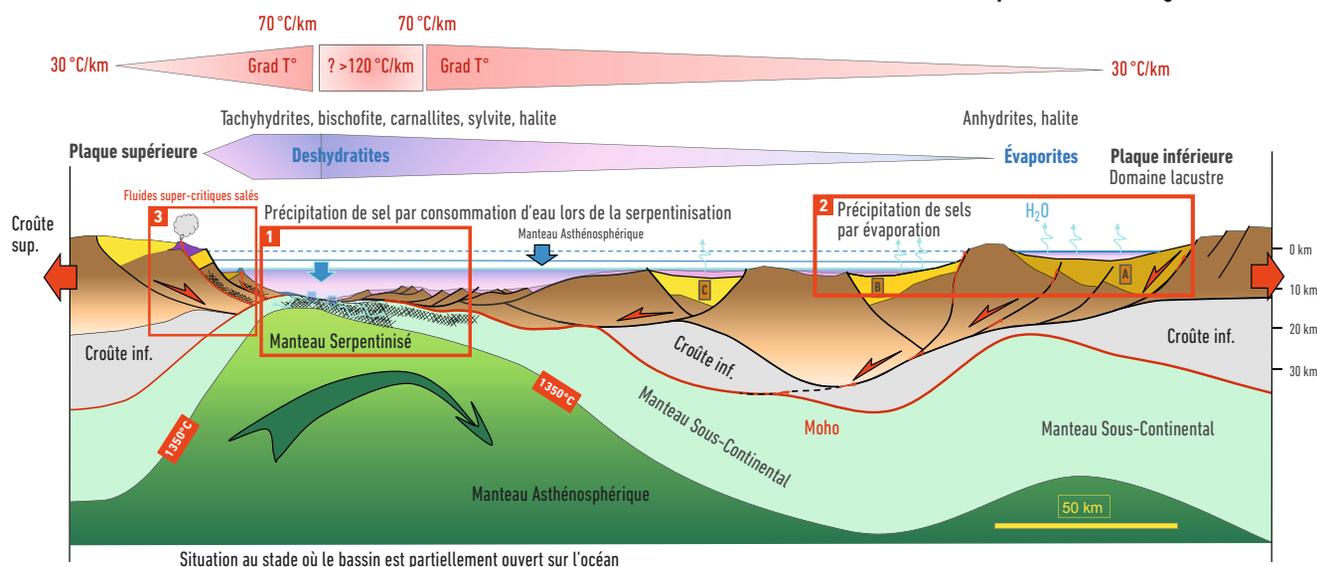
La fracturation liée au rift permet à l'eau de mer de pénétrer en profondeur. Lorsqu'elle atteint une température de 407°C et une pression de 300 bars, l'eau de mer subit une transition de phase : l'eau, qui prend un état de vapeur supercritique, se sépare d'une saumure très riche en NaCl ou même de sels solides. On pourrait imaginer des chemins de migration spatialement et



¹ Deshydratite : Roche salifère issue de la précipitation d'une saumure sursaturée lors de la consommation d'eau pure par une réaction minérale

Evaporites versus Deshydratites en zone de marge passive
 Depuis la phase d'exhumation mantélique jusqu' à l'océanisation

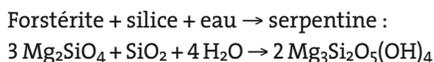
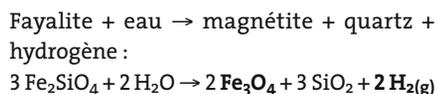
FIGURE 2 / Schéma synthétique des lieux de production des « déshydratites » et des évaporites sur une marge. © CALASSOU, TOTAL



temporellement différents pour ces deux types de fluides, pour produire d'un côté une eau douce et de l'autre une saumure sursaturée en sels.

On notera que les solubilités des différents sels issus de l'eau de mer varient significativement avec la température et la pression. Ce processus va trier les sels et permet d'obtenir, par exemple, une halite raffinée pratiquement pure d'un côté et des sels de magnésium et de calcium de l'autre. Hovland *et al.* (2018) expliquent ainsi l'existence des saumures profondes (> 4 000 m) du fond de la Méditerranée (Bannock, Atlantis, Urania, Discovery), qui sont enrichies en magnésium et appauvries en sodium.

Un autre processus impliquant chaleur et réaction minérale produit des saumures : la serpentinisation des roches mantelliennes. Ainsi, la transformation d'un mètre cube de péridotite en serpentine par l'eau de mer produit 10,5 kg de sels. La réaction se présente de la façon suivante pour les pôles ferreux (fayalite) et magnésien (forstérite) de l'olivine :



Les deux réactions consomment de grandes quantités d'eau parfaitement pure. Les sels de l'eau de mer vont donc se concentrer dans la saumure résiduelle. La précipitation de serpentine provoquant une augmentation de volume de 40 %, elle engendre une très forte pression de cristallisation qui expulse la saumure lors de la fracturation hydraulique de la roche. Elle va aussi se charger en métaux par dissolution des minéraux du manteau.

Fluides supercritiques et serpentinisation peuvent sans aucun doute se combiner pour générer ces « déshydratites », qui seraient ensuite injectées au fond de la mer par les systèmes de failles liées au rift. On constate que dans l'histoire des rifts les sels se mettent en place exactement au moment où le manteau est proche de l'exhumation ou lors de l'exhumation. On notera par ailleurs que la mise en place de ces saumures hydrothermales et de ces déshydratites n'exclut en rien la production classique d'évaporites dans les bassins côtiers.

Les deux processus peuvent être concomitants, car lors des premières phases

d'exhumation du manteau les marges conjuguées dessinent des bassins partiellement fermés dans lesquels la consommation d'eau par serpentinisation peut atteindre 300 à 400 m de colonne d'eau par km² de manteau exhumé (Pinto *et al.*, 2017). Ce phénomène va entraîner une baisse relative du niveau marin qui sera favorable à l'évaporation des bassins proximaux des marges.

Comment ces sels hydrothermaux, ces « déshydratites », se mettent-ils en place ? Voilà un sujet que la communauté des géosciences doit s'approprier. Un champ de recherche passionnant s'ouvre devant nous. —

Éric C. GAUCHER

Spécialiste Géochimie, TOTAL
 ✉ eric.gaucher@total.com

Sylvain CALASSOU

Géologue, Chef de Projet, TOTAL
 ✉ sylvain.calassou@total.com

Aurélien VIRGONE

Spécialiste Carbonates, TOTAL
 ✉ aurelien.virgone@total.com

Anne-Claire CHABOUREAU

Géologue, TOTAL
 ✉ anne-claire.chaboureau@total.com

BIBLIOGRAPHIE

Chaboureau, A.C., Donnadieu, Y., Sepulchre, P., Robin, C., Guillocheau, F. and Rohais, S. (2012) - The Aptian evaporites of the South Atlantic: A climatic paradox? *Climate of the Past* 8, 1047-1058. Hovland, M., Kuznetsova, T., Rueslåtten, H., Kvamme, B., Johnsen, H.K., Fladmark, G.E. and Hebach, A. (2006) Sub-surface precipitation of salts in supercritical seawater. *Basin Research* 18, 221-230. Hovland, M., Rueslåtten, H. and Johnsen, H.K. (2018) - Large salt accumulations as a consequence of hydrothermal processes associated with 'Wilson cycles': A review Part 1: Towards a new understanding. *Marine and Petroleum Geology*. Scribano, V., Carbone, S., Manuella, F.C., Hovland, M., Rueslåtten, H. and Johnsen, H.K. (2017) - Origin of salt giants in abyssal serpentinite systems. *International Journal of Earth Sciences* 106, 2595-2608. Pinto, V.H.G., Manatschal, G., Karpoff, A.M., Ulrich, M. and Viana, A.R. (2017) - Seawater storage and element transfer associated with mantle serpentinization in magma-poor rifted margins: A quantitative approach. *Earth and Planetary Science Letters* 459, 227-237. Usiglio, M.J. (1849) - Études sur la composition de l'eau de la Méditerranée et sur l'exploitation des sels qu'elle contient. *Annales Chimie Physique* ser. 3, 172-191. Wardlaw, N.C. (1972) - Unusual marine evaporites with salts of calcium and magnesium chloride in cretaceous basins of Sergipe, Brazil. *Economic Geology* 67, 156-168. Wardlaw, N.C. and Nicholls, G.D. (1972) - Cretaceous evaporites of Brazil and West Africa and their bearing on the theory of continent separation, *International Geological Congress 24th Session*, pp. 43-55. Warren, J.K. (2006) *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer, Würzburg.