



Comment l'océan acquiert-il sa composition chimique ?

Valérie Chavagnac

Catherine Jeandel

A toute époque géologique, l'état chimique de l'océan détermine sa capacité à absorber du gaz carbonique, donc à participer à la régulation du climat. Cet état dépend du bilan entre les apports et départs d'éléments chimiques à l'océan, deux termes particulièrement complexes à quantifier. Cet article dresse l'état de nos connaissances sur les apports dissous et solide entre océan et continent d'une part et océan et croûte océanique (soit les flux hydrothermaux) d'autre part.

UN OCÉAN EN CONTACT

Depuis 150 ans, la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère augmente de façon exponentielle en raison des activités humaines, induisant un réchauffement du climat. L'océan soustrait annuellement 25 % du flux anthropique de CO₂. Cette capacité de « puits » dépend de son état chimique global. Or l'océan échange en permanence de la matière et de l'énergie avec les autres enveloppes superficielles de la Terre que sont l'atmosphère, les calottes polaires ainsi que les croûtes terrestres continentale et océanique. Ces échanges en font un acteur majeur de notre environnement planétaire. L'identification et la quantification de ces échanges restent cependant un enjeu pour les océanographes.

La géochimie peut apporter des réponses sur la nature de ces échanges. La composition chimique de l'océan représente un état d'équilibre budgétaire élémentaire entre *i)* les sources – *i.e.* les produits d'érosion continentale, l'inte-

raction océan-atmosphère, les réactions hydrothermales à l'interface croûte océanique-océan, et les apports anthropiques - et *ii)* les puits – *i.e.* la précipitation de minéraux secondaires, l'enfouissement sédimentaire, l'évaporation et les processus biologiques et physico-chimiques de la colonne d'eau (Figure 1). Les premiers bilans budgétaires établis à la fin des années 1970s suggéraient des flux hydrothermaux du même ordre de grandeur que les apports continentaux (Edmond *et al.*, 1979). De nos jours, le bilan élémentaire de l'océan est constamment remis en question en raison des progrès des observations. L'une des missions fondamentales des océanographes est de quantifier les apports d'éléments chimiques à l'océan et de comprendre leur comportement au sein de celui-ci, en d'autres termes comprendre les cycles biogéochimiques globaux, en particulier mieux quantifier les flux d'origines continentale et hydrothermale, étape incontournable pour évaluer la réponse de ces cycles au changement global.

L'OCÉAN, BIEN PLUS QUE DE L'EAU SALÉE

Les géochimistes tracent le transport, la dispersion et le comportement de tout élément chimique dans le domaine marin. L'océan est composé d'eau et de sel, sel dont la composition chimique est relativement constante. La salinité de l'eau de mer est d'environ 35 grammes par litre d'eau mais peut varier significativement d'une région du globe à l'autre (10 g/l dans la Mer Baltique, 275 g/l dans la Mer Morte). La composition chimique de l'eau de mer est fonction du temps moyen de séjour (temps de résidence) de chaque élément dans l'océan. Ce temps de résidence représente l'abondance d'un élément dans le réservoir océanique divisée par le bilan des flux entrants (sources) ou sortants (puits). Tous les ions majeurs inertes chimiquement (dit éléments conservatifs) ont des temps de résidence de l'ordre du million d'années – soit bien supérieur au temps de mélange de l'océan, de l'ordre de 1 000 ans, alors que les ions mineurs – dont la distribution est modifiée par les réactions chimiques (adsorption, oxydo-réduction...) et l'activité biologique au sein du milieu marin – ont des temps de résidence de l'ordre de quelques dizaines aux milliers d'années. Ces espèces chimiques à l'état de traces dans l'eau de mer sont donc des éléments clés dans notre compréhension de la composition chimique de

l'océan, puisque leurs distributions et comportements différenciés nous informent sur les processus qui déterminent ces distributions. En analysant des masses d'eau actuelles ainsi que des matériaux géologiques (qui enregistrent la composition chimique de l'eau de mer), il est possible d'évaluer la variation temporelle et spatiale des apports élémentaires à l'océan. Cependant, une telle approche ne permet pas de déterminer l'origine de ces flux et d'éventuels processus d'échange ou de mélange. Cette limitation des traceurs chimiques est comblée en associant les systèmes isotopiques qu'ils soient radiogéniques, c'est-à-dire descendants d'éléments radioactifs naturels (Sr, Nd, Hf, Pb) ou stables (O, C, N, Li, Cr, Fe, Mo...).

En résumé, notre compréhension des cycles biogéochimiques globaux a fortement gagné en efficacité ces dernières années en associant les approches élémentaires et isotopiques pour un certain nombre d'éléments chimiques présentant des réactivités différentes aux conditions environnementales. Parmi les découvertes les plus récentes, les apports continents-océan et les flux d'origine hydrothermale sont en passe d'être complètement réévalués (Jeandel et Oelkers, 2015; Resing *et al.*, 2015; Chavagnac, 2015).

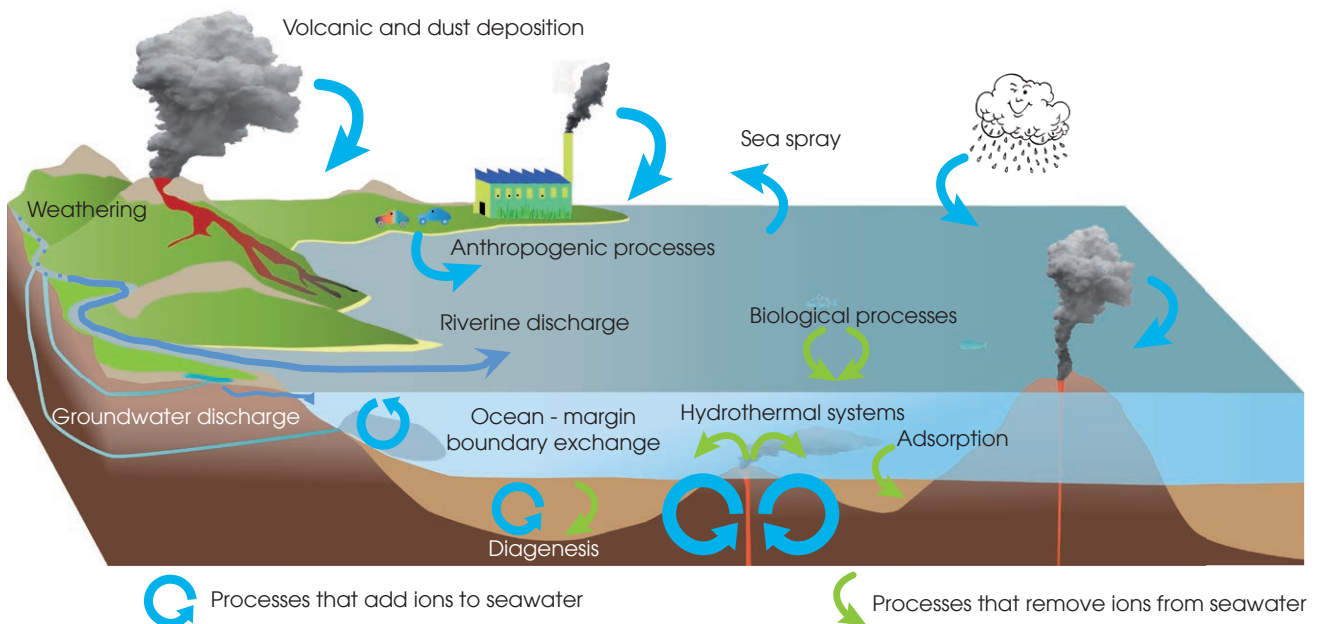


Fig. 1 — Sources et puits des éléments chimiques contrôlant la composition chimique de l'océan.



FLUX ENTRE CONTINENTS ET OCÉANS

Les terres émergées qu'elles soient récentes ou anciennes, subissent des processus d'altération mécanique et chimique. Les produits dérivés de l'érosion continentale entrent dans le domaine marin sous forme dissoute ou particulaire, organique ou minérale et sont transportés par les vents ou les fleuves. Si les lieux privilégiés de ces interactions entre océan et continent sont les zones côtières, les vents et les courants marins font que l'océan ouvert est aussi largement affecté. Jusque récemment, les bilans océaniques des éléments chimiques ne prenaient que deux types d'apport en considération : les apports dissous des rivières et pluies auxquelles vient s'ajouter une fraction de quelques pourcents (selon l'élément), libérée par dissolution des poussières. Cette fraction peut avoir un effet local important : par exemple, l'exportation du flux de carbone particulaire dans l'océan Atlantique équatorial peut être multipliée par 4 en cas de tempête de poussière provenant du Sahara, car ces eaux se trouvent soudainement fertilisées en fer, élément nutritif apporté par cette matière (Chavagnac *et al.*, 2007). Cependant, ces types d'apport sont sporadiques dans le temps et l'espace, contrastant avec les plateaux continentaux et marges océaniques, exutoires de la matière érodée d'origine continentale. En effet, les flux de matière solide déchargés par les fleuves représentent 50 fois les apports atmosphériques (Milliman et Farnsworth, 2011). En outre, une fois déposés les sédiments subissent des réactions qui libèrent des éléments chimiques vers la mer alors que d'autres viennent s'y piéger ; ils sont donc à la fois des sources et/ou des puits d'éléments ou de certains composés pour le milieu marin ouvert. Déterminer les flux nets d'apports à l'océan est par conséquent une gageure, d'autant plus importante que cette interface continent-océan est aussi celle qui véhicule les apports anthropiques.

Les travaux les plus récents suggèrent que les sédiments sont une source très significative d'éléments chimiques tels que le fer, source jusqu'ici négligée (Jeandel et Oelkers, 2015; Tagliabue *et al.*, 2014). Cette évolution récente de la quantification des flux entre continent et océan aura

pour conséquence de modifier les modèles biogéochimiques, en particulier ceux qui décrivent le cycle du carbone. Ceci illustre combien la recherche en océanographie est vivante et toujours susceptible de se questionner.

LES FLUX HYDROTHERMAUX

La circulation hydrothermale est due à la pénétration et la percolation dans la croûte océanique et les sédiments marins d'eau de mer. Lors de ce trajet, de nombreuses réactions chimiques prennent place et altèrent les roches traversées, transformant l'eau de mer initiale en un fluide hydrothermal acide, réduit et chaud (jusqu'à 410 °C). Ainsi, certains éléments majeurs de l'eau de mer, tels que le magnésium sont stockés dans la roche pour former un assemblage minéralogique secondaire – il s'agit d'un puits de Mg, alors que les métaux lourds (Fe, Mn, Cu, Zn...) et alcalins s'enrichissent jusqu'à des facteurs 10⁶ – il s'agit d'une source. À la surface du plancher océanique ces fluides hydrothermaux se mélangent avec l'eau de mer ambiante neutre, froide et oxygénée produisant la formation d'un panache hydrothermal, d'où le nom de « fumeurs noirs » pour décrire ces systèmes. Une grande proportion des flux de métaux dissous (>90%) précipitent sous forme de particules poly-métalliques, de sulfures, de sulfates et d'oxy-hydroxydes, entraînant souvent d'autres éléments dissous dans l'eau de mer environnante qui sont adsorbés par ces particules (REE, V, P...). En outre, la source hydrothermale de Fer peut être détectée et tracée dans la colonne d'eau profonde depuis son site d'émission à l'axe des dorsales sur une distance de plus de 4300 km (Resing *et al.*, 2015). Le bilan élémentaire n'est donc pas aussi simple en terme de puits et de source, tout reste à déterminer les facteurs clefs organiques et minérales contrôlant le devenir des éléments dans le domaine océanique. Ces systèmes hydrothermaux de haute température se localisent à l'axe des dorsales océaniques et aux arcs volcaniques. Ces derniers sont associés à des gros volcans sous-marins dont les sommets peuvent se situer à quelques centaines de mètres sous la surface de l'océan, modifiant de ce fait la composition chimique de la partie supérieure de la colonne d'eau.



À côté de ces circulations de fluides chauds, il existe une circulation de fluide froid ($T^{\circ} < 100^{\circ}\text{C}$) dans les flancs de dorsales, dans les plaques océaniques plongeantes. Ces fluides hydrothermaux froids présentent une composition chimique radicalement différente de celle des fumeurs noirs puisqu'ils sont basiques, enrichis en alcalins mais appauvris en métaux. Ces systèmes hydrothermaux de basse température sont encore méconnus (extension géographique, variabilité temporelle des décharges, etc.) parce qu'ils ne génèrent pas des anomalies physiques et chimiques dans la colonne d'eau comme le font les systèmes « chauds » traçables avec l'instrumentation marine actuellement disponible. Les détecter dans l'océan profond est une tâche extrêmement difficile à réaliser. Pourtant, de tels systèmes peuvent être d'une importance fondamentale pour les bilans et les grands cycles géochimiques.

On voit donc qu'en cinquante ans de recherche, on est passé de la découverte des premières manifestations de l'activité hydrothermale du fond océanique, à celle d'une grande variété de phénomènes, à la fois de hautes et de basses températures. Il est donc clair que la circulation des fluides dans la croûte océanique et dans les sédiments marins est un phénomène d'une grande diversité et d'une grande ampleur. Elle reste cependant mal connue et ses implications sur la composition chimique de la croûte océanique et de l'océan et sur les transferts de matière et de chaleur sont peu contraintes. Par exemple, on estime ainsi que la quantité d'eau circulant hors axe est de 10 à 100 fois plus importante que celle liée aux systèmes hydrothermaux à l'axe (Bickle et Elderfield, 2004; Elderfield et Schultz, 1996). Une meilleure quantification des flux hydrothermaux ne pourra se réaliser que si la caractérisation de la géométrie et le moteur (thermique? tectonique?) de circulation hydrothermale ainsi que les mécanismes des interactions eaux-roches sont parfaitement compris.

RÉFÉRENCES

- BICKLE M. and ELDERFIELD H. – *Hydrothermal Fluxes in a Global Context*. In *Hydrogeology of the Oceanic Lithosphere*. Eds DAVIS E. and ELDERFIELD H., Cambridge University Press, 677-690, 2004.
- CHAVAGNAC V. – *When the Crusts Meet the Ocean...* Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Toulouse, 201 pp, 2015.
- CHAVAGNAC V., WANIEK J.J., ATKIN D., MILTON J.A., LEIPE T., GREEN D.R.H., BAHLO R., HAYES T.E.F. and SCHÜLTZ-BULL D.E. – *Source of Lithogenic Derived Element Fluxes to the Deep Subtropical North East Atlantic Ocean*. *Geophysical Research Letters*, 34, L21604, doi:10.1029/2007GL030985, 2007.
- EDMOND J.M., MEASURES C., MAGNUM B., GRANT B., SCLATER F.R., COLLIER R., HUDSON A., GORDON L.I. and CORLISS J.B. – *On the Formation of Metal-Rich Deposits at Ridge Crests*. *Earth Planetary Science Letter*, 46: 19-30, 1979.
- ELDERFIELD H. and SCHULTZ A. – *Mid-Ocean Ridge Hydrothermal Fluxes and the Chemical Composition of the Ocean*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24: 191-224, 1996.
- JEANDEL C. and OELKERS E.H. – *The Influence of Terrigenous Particulate Material Dissolution on Ocean Chemistry and Global Element Cycles*. *Chemical Geology*, 404 : 41-51, 2015.
- MILLIMAN J.D. and FARNSWORTH K.L. – *River Discharge to the Coastal Ocean. A Global Synthesis*. Cambridge University press. 382 pp, 2011.
- RESING J.A., SEDWICK P.N., GERMAN C.R., JENKINS W.J., MOFFETT J.W., SOHST B.M. and TAGLIABUE A. – *Basin-Scale Transport of Hydrothermal Dissolved Metals across the South Pacific Ocean*. *Nature*, 523(9), doi : 10.1038/nature14577, 2015.
- TAGLIABUE A., WILLIAMS R.G., ROGAN N., ACHTERBERG E.P. and BOYD P.W. – *A Ventilation-Based Framework to Explain the Regeneration-Scavenging Balance of Iron in the Ocean*. *Geophysical Research Letters*, 41, 7227-7236, 2014.