

Méthodes de quantification des flux de CO_2 induit par l'altération des roches volcaniques mafiques

Matthieu Courcelles^{1*}, Eloi Le Brun Planquette¹, and Robin Teyssier¹

¹Institut de Physique du Globe, Université Paris-Cité, Paris, France.

*Address correspondence to: courcelles@ipgp.fr

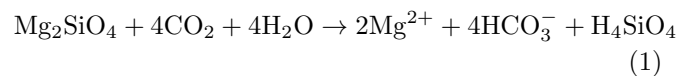
1 Introduction

L'érosion des chaînes de montagnes et des vastes provinces volcaniques basaltiques (trapps) repose en grande partie sur la transformation chimique d'importantes quantités de minéraux silicatés. L'altération chimique des massifs montagneux, couplée à la pédogenèse des sols volcaniques, pourrait jouer un rôle majeur dans la capture et le stockage du dioxyde de carbone atmosphérique, en le transférant vers les océans sous forme de bicarbonates, puis en l'immobilisant durablement sous forme de carbonates sédimentaires. Les roches mafiques, particulièrement altérables, représentent une grande part des flux de carbone issus de l'atmosphère. Cependant, il demeure difficile de caractériser avec précision l'ampleur de ces flux de CO_2 et leur contribution effective au cycle du carbone. En effet, il s'agit d'un système ouvert, avec des composantes spatiales et temporelles étendues et complexes. Dans le contexte actuel du changement climatique, les quantifier est nécessaire afin de mieux comprendre ces mécanismes essentiels et leurs potentiels effets tampons. Nous nous intéresserons aux différentes méthodes de quantification de ces flux. Deux approches existent : la quantification par flux fluviaux, qui permet d'estimer la consommation de CO_2 à l'échelle du bassin versant dans son ensemble, à l'instant de la mesure (à l'échelle géologique) (Gaillardet et al., 1999), et le bilan de masse du sol, qui enregistre la déplétion locale intégrée d'une portion de sol, à l'échelle du profil, et sur des temps longs (Chadwick et al., 1990). L'objectif est de mettre en évidence les apports respectifs de chacune de ces méthodes.

2 Mécanismes d'altérations et captage du CO_2

Les principaux mécanismes de captage du CO_2 atmosphérique sont bien connus et documentés dans la bibliographie scientifique. On retrouve l'hydrolyse des minéraux silicatés, reposant sur la réaction entre un minéral silicaté (dit primaire), du CO_2 atmosphérique et de l'eau liquide. Mais aussi le captage du CO_2 lors de la photosynthèse (Gaillardet et al., 1999). L'hydrolyse des minéraux silicatés résulte de l'interaction entre l'atmosphère, les eaux de ruissellement et les minéraux du sol. Cela induit la création d'un minéral résiduel (phase solide du minéral primaire restante après altération), la consommation de CO_2 atmosphérique, à présent dissous sous la forme d'ions bicarbonates (Dessert et al., 2003), ainsi que la création d'un potentiel minéral secondaire issu de l'altération du minéral primaire. Cette réaction dépend de la quantité d'eau qui circule réellement dans le système, du temps de contact eau-roche, de la température et de la capacité de la solution à transporter les produits dissous (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^-). Ces notions sont exprimées par l'équation empirique $f(CO_2) = R_f \times e^{0.00642T}$, qui exprime le flux de CO_2 ,

avec, R_f , le runoff, c'est-à-dire la quantité de ruissellement effectif, exprimé en mm/an. $R_f = P - ET$ (précipitation - évapotranspiration), et T la température (Dessert et al., 2003). On peut prendre pour exemple l'hydrolyse de l'olivine (1).



Le CO_2 dissous de cette manière finira en partie, par sédimenter au fond d'un bassin sédimentaires (principalement dans les océans), et sera ainsi stocké durablement sous forme minérale (Dessert et al., 2003). Ces réactions d'hydrolyse sont donc un des moteurs du stockage de la pompe à carbone. Au delà de 26 ka, la séquestration du CO_2 par altération des minéraux silicatés devient majoritaire dans les sols volcaniques par rapport au carbone organique, puis devient dominant au delà de 166 ka (Zehetner et al., 2024).

Du fait de leur composition et mécanisme de formation, les roches volcaniques mafiques, notamment les basaltes, majoritairement constitué de nésosilicates (olivine), inosilicates (pyroxènes) et feldspaths (anorthite) sont très sensibles à l'altération. Ces minéraux à faible énergie d'activation sont thermodynamiquement

instables aux conditions de pression et température de surfaces, et donc plus sujets aux réactions d'hydrolyse, permettant de fait une forte consommation de CO_2 (Goldich, 1938). De plus l'intensité de l'altération chimique varie en fonction du climat, elle est bien plus intense grâce aux apports hydriques dans les régions humides. Les températures élevées sont aussi un facteur qui influence positivement sur les vitesses réactionnelles. Ces effets sont représentés sur la Figure 1, où on remarque que l'intensité de l'altération suit globalement une distribution latitudinale et c'est dans les zones équatoriales et tropicales que l'on trouve les CWR (Chemical Weathering Rate) les plus élevés. Ces CWR sont plus faibles dans les ceintures désertiques. En dépit de cette forte susceptibilité à l'altération, les roches volcaniques ne représentent que 8% des roches affleurant à la surface de notre planète, dont seulement une partie sont mafiques (Hartmann and Moosdorf, 2012) mais induisent entre 30 et 35% des flux de CO_2 dus à l'altération des roches silicatés (Dessert et al., 2001). À l'inverse, les roches sédimentaires silicoclastiques représentent environ 48% des roches affleurantes (Hartmann and Moosdorf, 2012). Elles sont néanmoins moins sensibles aux réactions d'hydrolyses, du fait de leurs mécanismes même de formation. Ces roches résultent déjà de l'altération et de l'érosion de roches mères. Leur composition chimique en est donc impactée ; on y retrouve généralement uniquement les éléments les plus stables, étant donné que les éléments les plus mobiles sont déjà partis en solution. Leur minéralogie est aussi impactée puisque les minéraux secondaires sont également plus stables et moins sensibles à l'altération chimique, car plus adaptés aux conditions thermodynamiques.

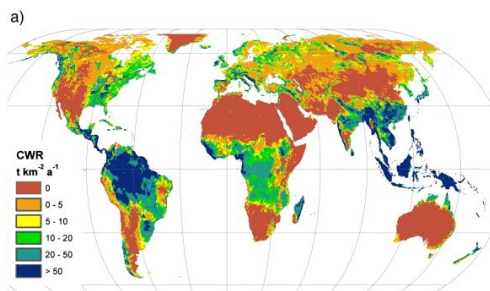


Figure 1: Carte de l'intensité des altérations chimiques calculée à partir des données de Run-off et lithologie (CWR=Chemical Weathering Rate) (d'après (Hartmann et al., 2014)).

3 Méthodes de quantification des flux de CO_2

3.1 Quantification par les flux fluviaux

Cette première méthode utilise les concentrations en ions contenus dans les eaux des fleuves pour remonter aux taux d'altération et aux lithologies des bassins

drainés et altérés par ces eaux. Les concentrations élémentaires dépendent des processus d'évaporation océanique qui sont à l'origine de l'eau météorique. La Figure 2 présente un de ces rapports sur lesquels des compositions de références sont mises en évidence ainsi que les rapports de fleuves majeurs. Les lithologies des grands bassins peuvent être complexes et composites. Par des méthodes inverses, il est possible d'estimer le partitionnement lithologique du bassin. Ainsi le modèle proposé dans Gaillardet et al. (1999) repose sur l'idée que les rivières intègrent l'ensemble des processus d'altération d'un bassin versant.

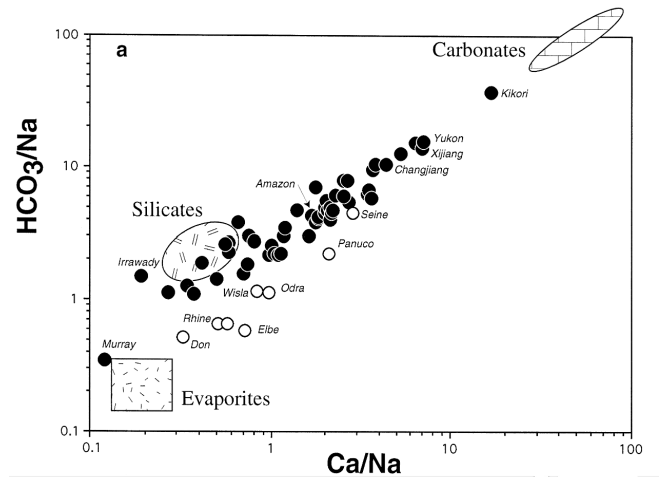


Figure 2: Diagrammes de mélange utilisant des rapports molaires normalisés au Na dans la phase dissoute des 60 plus grands fleuves. D'après Gaillardet et al. (1999)

Pour obtenir le flux d'un élément dissous dans un cours d'eau on multiplie la concentration de cet élément dans la rivière par le débit de celui-ci. Ici on s'intéresse particulièrement à l'altération des silicates, ainsi d'après Gaillardet et al. (1999), le flux attribuable aux silicates (F_{sil}) obtenu par correction des apports atmosphériques (F_{atm}) et carbonatés (F_{carb}) est :

$$F_{sil} = F_{total} - F_{atm} - F_{carb}. \quad (2)$$

3.2 Quantification par bilan de masse pédo-logique

On peut quantifier la perte ou le gain relatif τ_j d'un élément mobile j (Ca, Mg, Na, K) par rapport à un élément immobile i (Ti, Zr) dans un profil pédologique d'un sol altéré s dont les variations de volumes ont été corrigée, et qui provient d'une roche mère p , avec l'équation 3. Cela permet d'estimer la déplétion cumulative associée à l'altération chimique.

$$\tau_j = \frac{\left(\frac{C_{j,s}}{C_{i,s}}\right)}{\left(\frac{C_{j,p}}{C_{i,p}}\right)} - 1. \quad (3)$$

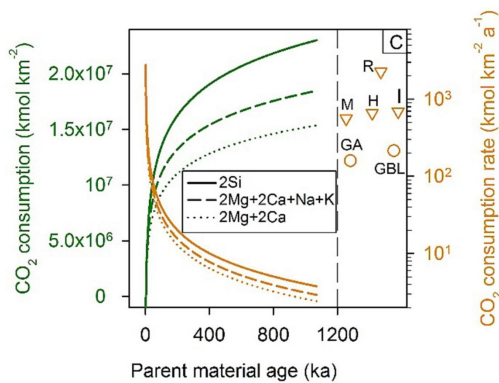


Figure 3: Modèles de consommation et taux de consommation de CO_2 en fonction de l'âge de la roche mère et de la réaction d'altération considérée (Zehetner et al., 2024)

L'approche développée par Chadwick et al. (1990) repose sur un bilan de masse géochimique comparant le sol altéré à la roche mère. Elle utilise des éléments supposés immobiles (Ti ou Zr) comme références internes afin de corriger les effets de dilution ou de concentration liés aux variations de volume lors de la pédogenèse. La comparaison des rapports entre éléments mobiles (Ca, Mg, Na, K) et les éléments immobiles permet ainsi de quantifier les pertes ou gains relatifs dus à l'altération, puis d'estimer les transferts massiques intégrés à l'échelle du profil. À partir des pertes de cations issues des silicates, il est ensuite possible d'estimer le flux de CO_2 consommé par l'altération chimique en fonction de l'âge (Figure 3).

4 Applications à des cas d'étude

4.1 Chronoséquence basaltique des Galapagos

L'archipel des Galapagos constitue un cadre idéal pour étudier l'altération chimique. Il s'agit d'une île volcanique formée par un point chaud, où les surfaces basaltiques présentent des âges bien contraints allant de quelques milliers à plus d'un million d'années. La forte variabilité climatique de la région, combinée à une lithologie relativement homogène permet de distinguer les effets du temps et du climat sur les processus d'altération. C'est dans ce cadre que l'étude réalisée par Zehetner et al. (2024) a proposé une analyse des taux d'altération. Il y est mis en place une approche pédologique, via l'étude de la perte d'éléments, du calcul d'indices d'altérations et de bilans de masses développée par Chadwick et al. (1990). Cette étude a permis de mettre en avant la présence d'une altération progressive sur ~ 1 Ma. Néanmoins ces résultats sont fortement locaux avec une forte variabilité à l'échelle, de l'archipel, d'un versant ou de l'altitude. Ils dépendent fortement des conditions microclimatiques ce qui rend une généralisation hasardeuse. Néanmoins ils offrent une étude locale très détaillée sur des temps géologiques.

4.2 Loi d'altération basaltique par Dessert et al. (2003)

Dessert et al. (2003) propose une loi d'altération des basaltes pour estimer les consommations de CO_2 . Cette étude se base sur l'approche développée par Gaillardet et al. (1999) en s'intéressant aux flux fluviaux de afin de calibrer la dépendance climatique (au températures et run-off). Cela fournit des taux d'altération instantanée. Afin de donner la cinématique d'altération à long terme, Dessert et al. (2001) extrapole ces lois d'altérations à l'aide de modèles climatiques passés afin d'obtenir une estimation des flux de CO_2 passés. Cependant ces estimations reposent sur des simplifications fortes ce qui limite la prise en compte des hétérogénéités locales et des rétroactions complexes du système climatique.

4.3 Complémentarité des deux approches

L'étude des chronoséquences basaltiques appliquée par Zehetner et al. (2024) permet d'obtenir une vision locale, très détaillée et longue durée des taux d'altération. Dessert et al. (2003), avec son approche fluviale propose une vision instantanée, globale. Ensemble ces méthodes permettent une compréhension multi-échelle de l'altération et de la consommation de CO_2 , permettant une meilleure compréhension de la dynamique de la pompe à carbone et de son possible impact climatique.

Il pourrait être intéressant de combiner ces approches à une étude de paléo-chronoséquences utilisant la méthode présentée par Zehetner et al. (2024) et en l'appliquant à des paléosols dans les Trapps du Decan. Ce cadre est particulièrement pertinent puisqu'on y trouve des volumes basaltiques massifs dont les archives pédologiques peuvent être datées, offrant un terrain idéal pour évaluer l'impact de l'altération des roches volcaniques mafiques à l'échelle locale et globale. Cette approche permettrait de combiner des estimations globales de taux d'altération, à des enregistrements locaux datés ($^{40}Ar/^{39}Ar$, U-Pb) et localisés (paléolatitudes, paléoclimats). Cela représenterait un intérêt double, l'intégration du climat local dans l'estimation des taux d'altération dans cette région majeure pour le climat du Cénozoïque et obtenir une vision multi-échelle, reliant flux instantanés aux bilans d'altération longue durée.

5 Conclusion

L'altération des silicates mafiques constitue un puits de CO_2 , par hydrolyse des minéraux primaires et transfert du carbone dissous vers un stockage à long terme. La quantification de ce phénomène reste complexe, car elle est fortement contrôlée par les variations climatiques et hydrologiques, ce qui implique des rétroactions sur le

cycle du carbone.

Deux méthodes complémentaires dominent pour estimer ces flux. L'approche fluviale, à l'échelle du bassin versant, fournit une estimation instantanée à partir des flux d'ions dissous exportés par les cours d'eau. Le bilan de masse pédologique, plus local mais moyenne sur le long terme, quantifie les pertes et gains d'éléments par comparaison entre le sol et la roche mère, et permet d'en déduire une consommation cumulée de CO_2 au cours de la pédogenèse.

Dans ce cadre, les Galápagos offrent des conditions particulièrement favorables pour quantifier et contraindre ces mécanismes, grâce à des surfaces basaltiques d'âges bien définis et à une forte variabilité climatique sur une lithologie relativement homogène. Enfin, dans le contexte du changement climatique, améliorer ces estimations notamment par une meilleure séparation des sources, la prise en compte des carbonates, des apports anthropiques, des apports atmosphériques et combiner les approches fluviales et pédologiques est essentiel pour mieux évaluer la contribution réelle de l'altération basaltique au cycle du carbone et son rôle potentiel à long terme.

References

- Chadwick, O. A., Brimhall, G. H., and Hendricks, D. M. (1990). From a black to a gray box — a mass balance interpretation of pedogenesis. *Geomorphology*, 3(3-4):369–390.
- Dessert, C., Dupré, B., François, L. M., Schott, J., Gaillardet, J., Chakrapani, G., and Bajpai, S. (2001). Erosion of Deccan Traps determined by river geochemistry: impact on the global climate and the $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio of seawater. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(3-4):459–474.
- Dessert, C., Dupré, B., Gaillardet, J., François, L. M., and Allègre, C. J. (2003). Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chemical Geology*, 202(3-4):257–273.
- Gaillardet, J., Dupré, B., Louvat, P., and Allègre, C. (1999). Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology*, 159(1-4):3–30.
- Goldich, S. S. (1938). A Study in Rock-Weathering. *The Journal of Geology*, 46(1):17–58.
- Hartmann, J. and Moosdorf, N. (2012). The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(12):2012GC004370.
- Hartmann, J., Moosdorf, N., Lauerwald, R., Hinderer, M., and West, A. J. (2014). Global chemical weathering and associated P-release — The role of lithology, temperature and soil properties. *Chemical Geology*, 363:145–163.
- Zehetner, F., Gerzabek, M. H., Shellnutt, J., Chen, P.-H., Candra, I. N., Huang, K.-F., and Lee, D.-C. (2024). Chemical weathering along a one-million-year soil age gradient on the Galápagos Islands. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 371:95–110.