



Dynamique de l'eau, de l'érosion à la sédimentation

Philippe Négrel, Christophe Rigollet

► To cite this version:

Philippe Négrel, Christophe Rigollet. Dynamique de l'eau, de l'érosion à la sédimentation. Géosciences, 2011, 13, pp.64-71. hal-00662460

HAL Id: hal-00662460

<https://brgm.hal.science/hal-00662460>

Submitted on 24 Jan 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Dynamique de l'eau, de l'érosion à la sédimentation

L'eau recouvre les trois quarts de la surface de notre planète et son action est primordiale dans les processus d'altération, d'érosion, de transport et de sédimentation. Elle est le moyen de transport des particules par les fleuves vers le milieu marin, elle participe à la diagenèse qui transforme les sédiments : l'eau est au cœur de la plupart des processus d'évolution sédimentaire.



64

ÉROSION



Philippe Négrel

BRGM, ADJOINT AU CHEF DE SERVICE
MÉTÉOROLOGIE, MONITORING, ANALYSE
p.négrel@brgm.fr

Christophe Rigollet

BRGM, ADJOINT AU CHEF DE SERVICE
GÉOLOGIE
c.rigollet@brgm.fr

Le cycle de l'eau

L'eau couvre les trois quarts de la surface de notre planète. Elle constitue les rivières, les nappes souterraines, les lacs, les mers, les océans ; elle est présente dans les sols et est constitutive des êtres vivants. Sous toutes ces formes, l'eau participe à ce que l'on appelle le cycle de l'eau. Depuis quelques 4 milliards d'années, la quantité d'eau présente sur la planète, évaluée à plus d'un milliard de km³ au total, n'a pas changé. C'est toujours le même volume d'eau qui ne cesse de se transformer, passant par les états de vapeur, d'eau liquide, de neige et de glace, qui entretient le cycle permanent de l'eau.

*Depuis 4 milliards d'années,
la quantité d'eau présente
sur la Terre n'a pas changé.*

**Érosion fluviale dans les coulées
récentes des volcans d'Islande.**

*Fluvial erosion in recent lava flows
from volcanoes in Iceland.*

© Ph. Négrel.

L'eau est omniprésente dans tous les processus géodynamiques internes et externes. Il est bien rare que l'explication d'un phénomène géologique ne fasse pas intervenir l'eau, à quelque échelle que ce soit.



La surface de la Terre peut être considérée comme une interface physique entre la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère. La connaissance des interactions entre fluides (au sens large) et roches est importante pour comprendre les phénomènes actuels et déchiffrer les phénomènes passés. En effet, les fluides jouent un rôle fondamental dans la plupart des processus physico-chimiques qui affectent la croûte terrestre. Le cycle de l'eau, ou cycle hydrologique, comprend tous les phénomènes intervenant dans la circulation de l'eau. Les précipitations se transforment en eau de ruissellement, en humidité du sol et en eau souterraine. L'eau souterraine remonte pro-parte vers la surface ; à la surface, l'eau des rivières, des nappes, du sol et de la végétation retourne à l'atmosphère par évaporation et transpiration. Le réseau hydrographique et les aquifères

déterminent à eux seuls l'écoulement des eaux. Le réseau hydrographique superficiel est composé d'arborescences de courants plus ou moins denses et ramifiés. Selon le système fluvial, le réseau peut disperser ou concentrer les eaux avec une capacité de transport très variable. Les aquifères souterrains sont constitués par des formations poreuses, des fractures ouvertes et des réseaux karstiques. Là aussi, de fortes hétérogénéités géologiques influent sur les volumes et l'écoulement des eaux souterraines.

Les rivières et les aquifères (*photos 1a, 1b et 2*) occupent une fonction centrale dans ce système et sont le lieu de processus variés : de l'amont vers l'aval, la rivière est successivement un lieu d'érosion, de transit, puis de dépôt. Dans la partie amont des rivières, les phénomènes



Photos 1a et 1b :
Des petits ruisseaux drainant les planèzes d'Auvergne (gauche) à la fonte des neiges hivernales (débit d'une centaine de litres par seconde) aux rapides du fleuve Congo à Brazzaville (droite) en période de hautes eaux (débit de plus de 55 000 m³/s).

Photos 1a and 1b: (left) Small streams draining the Auvergne Plateaus during the winter snow melt (flow rate of the order of 100 l/s) and (right) the rapids of the Congo River at Brazzaville during a high-water period (flow rate of more than 55,000 m³/s).

© Ph. Négrel.



Photo 2 : Aquifère karstique, Bayahibe, République Dominicaine.

Photo 2: Karst aquifer at Bayahibe, Dominican Republic.

© C. Rigollet.



d'érosion, qu'ils soient chimiques ou mécaniques, prédominent. La charge naturelle d'une rivière apparaît donc comme le produit de l'interaction, soit chimique soit mécanique, entre l'eau de ruissellement et les roches. Dans le premier cas, ce produit est sous forme dissoute [Drever (1988)]. Dans le second, il est sous forme particulaire [Berner et Berner (1987)]. Dans un système fluvial et son bassin versant, le cheminement de l'eau est un continuum depuis les précipitations atmosphériques jusqu'à l'océan, à travers le ruissellement, l'évapotranspiration, l'infiltration, l'écoulement dans les rivières, la zone non saturée (ZNS) et les systèmes aquifères.

À la surface de la Terre, on ne compte plus les torrents, ruisseaux et rivières qui dévalent des montagnes ou les grands cours d'eau qui serpentent en plaine [Gordon et

al. (1992)] (photos 1a et 1b). Toute rivière est un ensemble fonctionnel dont les caractéristiques géomorphologiques évoluent progressivement de la source à l'embouchure. La partie la plus amont du système hydrographique correspond au bassin versant. Les processus d'érosion dominant, c'est de là que provient l'essentiel de la charge sédimentaire du système hydrographique. Les torrents convergent vers l'exutoire, transition entre le relief et la plaine d'inondation, où l'écoulement diverge, la capacité de transport chute et les sédiments les plus grossiers s'accumulent, édifiant un cône alluvial (photo 3).

Au-delà du cône alluvial, à mesure que la pente s'amoindrit, les courants, qui ont déposé leur charge la plus grossière, perdent leur énergie. Ils déposent des particules de plus en plus fines et la base des chenaux est de moins

▲
Photo 3 : Érosion torrentielle et dépôt d'un cône alluvial, Vallée de la Mort, États-Unis.

Photo 3: Torrential erosion and deposition of an alluvial cone in Death Valley, USA.

© C. Rigollet.

“
L'étude des interactions entre les fluides et les roches est nécessaire pour comprendre les phénomènes actuels et déchiffrer les phénomènes passés.
”

“
En période de crue,
les courants sortent des chenaux
et déposent leur charge
dans la plaine d'inondation.”

en moins érosive. En période de crue, les courants sortent des chenaux et déposent leur charge dans la plaine d'inondation (*photo 4*).

Altération et érosion continentale

La destruction mécanique et chimique des roches constitue la source principale des matériaux des sols et par là même des solides transportés par les rivières. Ce phénomène affecte tous les types de roches, qu'elles soient magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires.

L'érosion mécanique produit des fragments de roche. Les variations de température entraînent la dilatation ou la contraction des roches. Soumises à des variations de volume, les roches se fissurent, puis éclatent. Dans les roches composées de minéraux n'ayant pas le même coefficient de dilatation, des microfissures peuvent apparaître à la limite entre les minéraux. Si de l'eau pénètre dans les fissures et gèle, la roche peut éclater par cryofracturation.

L'eau joue également un grand rôle dans l'altération chimique des roches. En raison de la liaison covalente asymétrique qui unit les atomes d'hydrogène à l'oxygène, la molécule d'eau est un dipôle. Cette nature bipolaire permet l'établissement de liaisons hydrogène entre les molécules d'eau qui s'organisent en groupes tétraédriques, une structure lui conférant des propriétés de solvant [Drever (1988)]. L'hydratation consiste en l'incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu hydratés, ce qui produit un gonflement du minéral et favorise la destruction de la roche. L'hydrolyse consiste en la destruction, par l'eau, d'un édifice moléculaire et sa transformation en d'autres édifices moléculaires (*photo 5*). Enfin, la dissolution produit la solubilisation des calcaires, des dolomies et des roches évaporitiques, grâce à l'action du CO₂ dissous dans l'eau (*photo 6*).

L'altération des roches produit des particules qui sont transportées par les processus physiques (cours d'eau, vent ou glace) vers le milieu de dépôt pour former un sédiment (*photo 5*). Finalement, les processus de diagenèse transforment le sédiment en roche [Campy et



▲ **Photo 4 : Alternance de grès chenalisés lenticulaires, de grès de débordement tabulaires et d'argiles rouges de plaine d'inondation, Olson, Espagne.**

Photo 4: Alternating layers of lenticular channel sandstone, tabular overflow sandstone and red clay from the floodplain (Olson, Spain).

© C. Rigollet.



▲ **Photo 5 : Argiles d'altération (altérites de micaschistes précambriens), forêt de Leppo, France.**

Photo 5: Clay deposit produced by weathering (Precambrian micaschist alterites), (Leppo Forest, France).

© C. Rigollet.



Photo 6 : Altération actuelle, par dissolution, d'une formation évaporitique éocène, Cardona, Espagne.

Photo 6: Present-day weathering, by dissolution, of an Eocene evaporite (Cardona, Spain).

© C. Rigollet.

Macaire (1989)]. Envisagé d'un point de vue dynamique, le couple érosion-sédimentation dépend fondamentalement des conditions tectoniques et bioclimatiques.

Le point d'entrée vers le milieu océanique

Les produits de l'altération chimique et de l'érosion mécanique, transportés par les rivières, rejoignent le milieu océanique au niveau des estuaires ou des deltas, zones de transition entre milieu continental et marin [Meybeck et Ragu (1996)]. En règle générale, lorsque le fleuve a une influence dominante, un delta se forme ; si l'influence marine est dominante, l'embouchure du fleuve a la morphologie d'un estuaire.

Les estuaires sont caractérisés par un fort contraste hydrodynamique entre des marnages importants et des courants de haute énergie (crues, marées). Le marnage a lieu sur toute la surface de l'estuaire à marée étale et/ou dans les zones calmes et protégées, lorsque les conditions hydrodynamiques sont favorables à la décantation des particules en suspension. Lorsqu'elles sont encore en suspension dans l'eau, ces particules constituent un « bouchon vaseux » situé à la transition entre les eaux marines salées et les eaux douces

chargées de matière en suspension et de nutriments en solution. Zone de turbidité maximale, le bouchon vaseux se déplace au rythme des marées. La sédimentation des estuaires est également caractérisée par d'importantes accumulations de sables transportés par les courants de marée.

Dans le cas des deltas, la partie visible (la plaine deltaïque et la côte) présente une morphologie caractéristique en éventail. La plaine deltaïque est composée de chenaux sableux et d'une plaine d'inondation argileuse. Les courants fluviaux, lorsqu'ils arrivent au niveau du delta, sont freinés par une eau de mer « immobile » et perdent leur charge sédimentaire. La fraction granulométrique la plus grossière se dépose et constitue le front de delta (accumulations sableuses). Au-delà,

“ Lorsque le fleuve a une influence dominante, un delta se forme ; si l'influence marine est dominante, l'embouchure est un estuaire. ”

l'énergie s'affaiblit considérablement et la partie profonde du delta n'est plus qu'une accumulation de particules fines (silts et argiles).

Au niveau du front de delta, la morphologie du trait de côte dépend du volume des apports de matière solide par les rivières, de l'énergie relative des rivières, de la houle, des courants littoraux et de la marée. Le volume de sédiments préservés au niveau d'un delta dépend de trois paramètres physiques : le taux de sédimentation, le niveau marin relatif et le taux de subsidence. La progradation du delta est la plus forte en période de stabilité ou de descente du niveau marin, avec un apport détritique suffisant à partir du continent par les processus d'érosion. Lorsque le niveau marin est stable, les chenaux se multiplient et migrent latéralement, la surface du delta augmente et son taux de croissance ralentit.

Les particules les plus grossières (sables) arrachées au continent se déposent au niveau des estuaires ou des deltas, ou sont déplacées le long de la côte et sur le

plateau continental. En revanche, les particules les plus fines et les éléments dissous migrent bien au-delà du plateau continental.

Dans le milieu marin profond

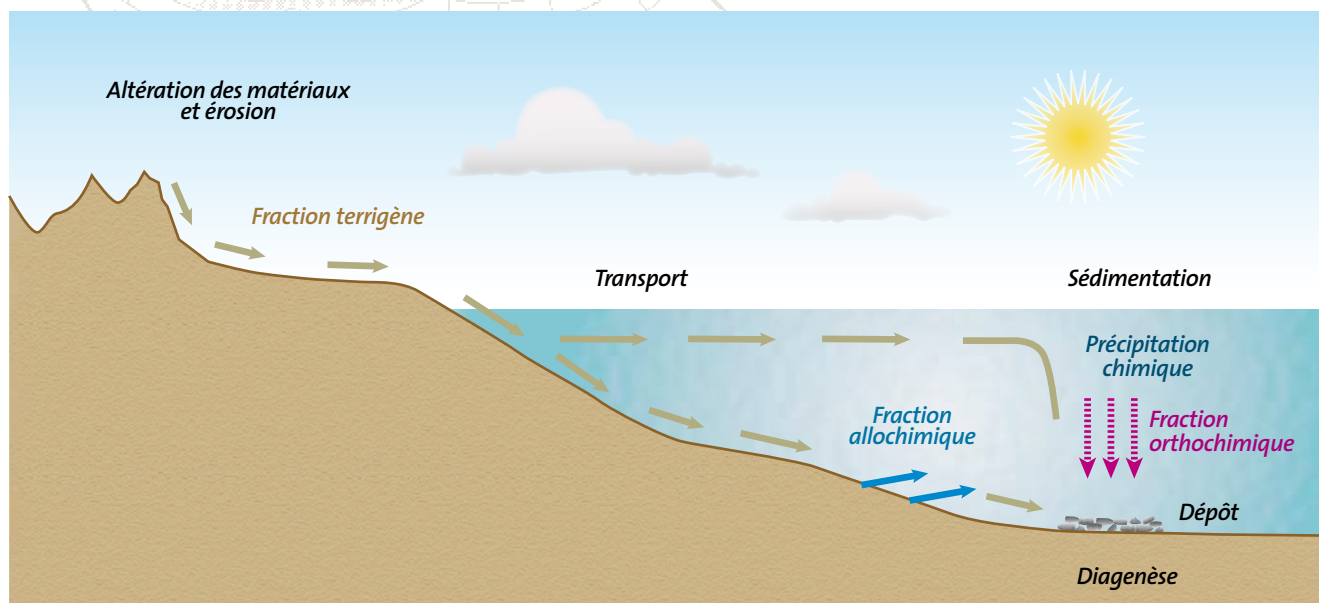
Bien au-delà des côtes agitées, la sédimentation est dominée par la décantation des particules en suspension dans l'eau de mer. Une partie de ces particules, dites terrigènes, vient du continent (origine fluviale ou éolienne), avec une dilution croissante vers le centre du bassin. Une autre partie, qui vient de la sédimentation dite pélagique, se répartit uniformément à l'échelle de tout l'océan. Elle provient de la décantation des particules d'origine biologique qui nagent et flottent dans la tranche d'eau (necton et plancton). Lorsque les dépôts sont composés à la fois par la décantation de particules fines d'origine terrigène et de particules pélagiques, on parle d'hémipélagites (*photo 7*). Parfois la tranquillité du milieu est perturbée par l'arrivée d'un courant turbide qui apporte des sédiments plus grossiers (les turbidites).

Photo 7 : Hémipélagites dans le bassin vocontien, avec intercalation de grès turbiditiques, Rosans, France.

Photo 7: Hemipelagites in the Vocontian Basin, interbedded with turbiditic sandstones (Rosans, France).

© C. Rigollet.





Autant les sédiments terrigènes peuvent être classés par leur granulométrie (galets, sables, silts, argiles...), autant les sédiments hémipélagiques sont classés selon leur nature : lithogènes (dérivés de l'érosion des roches) ; biogènes (dérivés d'organismes vivants, fraction allochimique) ; bio-chimiques (précipités dans l'eau de mer, fraction orthochimique) (figure 1).

Le rôle de l'eau est multiple : agent de transport, de précipitation, d'altération... Le matériel transporté finit par s'accumuler dans un bassin de sédimentation pour former des dépôts stratifiés sur des épaisseurs qui peuvent atteindre plusieurs milliers de mètres [Chamley (1990)]. Les sédiments gorgés d'eau se déposent en couches successives dont la composition, la taille des particules, la couleur, etc., varient selon la nature des sédiments apportés. Il est essentiel de considérer un dépôt comme un ensemble composé, à l'origine, de particules et d'eau. Dans certains sédiments, comme les boues argileuses, l'eau peut représenter plus de 90 % du volume total du sédiment.

L'eau et la diagenèse

La diagénèse regroupe l'ensemble des processus qui contribuent à l'évolution des sédiments après leur dépôt : compaction, déshydratation, dissolution, cimentation, épigénisation et métasomatose. L'eau est impliquée dans la plupart des phénomènes diagénétiques. On distingue la diagenèse précoce, qui a lieu immédiatement après le dépôt des sédiments, et la diagenèse tardive qui a lieu plus en profondeur, au cours de l'enfouissement.

Au cours de la diagenèse précoce, l'évolution du sédiment est principalement contrôlée par des phénomènes biologiques et la circulation des fluides. La saturation et l'origine de l'eau permettent de distinguer quatre environnements : phréatique marin, vadosé marin, phréatique météoritique et vadosé météorique. Les ciments précoces présentent des spécificités minéralogiques, cristallographiques et géométriques parfaitement identifiables en lames minces.

Les effets de la diagenèse tardive se superposent à ceux de la diagenèse précoce. La compaction par exemple correspond au tassement d'une couche sous l'action des sédiments qui lui sont superposés. Par la pression exercée, l'eau interstitielle du sédiment est expulsée. La compaction peut provoquer des phénomènes de dissolution des grains et ciments précoces et des phénomènes de dissolution au contact entre les grains. Ces processus de dissolution enrichissent les eaux interstitielles en éléments dissous.

Associée à la compaction, la précipitation des substances dissoutes dans les eaux interstitielles contribue à la

▲
Fig. 1 : Cycle continent-océan des sédiments.

Fig. 1: Sediment cycling in the continent-ocean continuum.

Dans certains sédiments, comme les boues argileuses, l'eau peut représenter plus de 90 % du volume total du sédiment.

lithification des sédiments. Dans les milieux poreux, la cimentation réduit la porosité par précipitation minérale sous forme cristalline (cimentation de calcite ou de silice par exemple). De même, le phénomène inverse à la précipitation, la dissolution des ciments et/ou des grains, permet de créer une porosité secondaire dans la roche.

Au cours de la diagenèse, on assiste également à des processus d'épigénisation correspondant à la transformation d'un minéral en un autre de même composition, mais avec un changement de structure cristalline (par exemple, l'aragonite se transforme en calcite). Le phénomène se produit soit par une dissolution préalable du minéral préexistant, soit par un simple échange (diffusion). Enfin, la métasomatose a lieu à plus grande échelle. Elle correspond à la substitution d'un minéral par un autre, sans changement de volume... Dans ces deux derniers cas, l'eau joue un rôle prépondérant.

Le devenir des sédiments dans le cycle géodynamique

Zones de subduction et rides médio-océaniques sont des mécanismes structurants de la dynamique terrestre. Les zones de subduction permettent le retour de la lithosphère océanique vers le manteau, compensant ainsi l'accrétion au niveau des rides océaniques. Ce cycle des matériaux qui constituent la lithosphère subdivisée en plaques tectoniques mobiles est appelé cycle de Wilson.

La subduction et la fusion de la lithosphère océanique sont associées à une activité magmatique forte donnant naissance aux arcs volcaniques édifiés sur la plaque chevauchante. Deux chemins s'offrent aux sédiments marins dans les fosses océaniques : former des prismes d'accrétion (structures tectoniques compressives qui comblent la fosse de subduction) ou s'enfoncer dans la zone de subduction en accompagnant la plaque plongeante.

Le rôle des sédiments marins dans la genèse des laves d'arc volcanique le long des zones de subduction est important. En accompagnant la plaque plongeante, les sédiments terrigènes et pélagiques gorgés d'eau, dont l'épaisseur peut dépasser les 1 000 mètres, favorisent la fusion des roches grâce à l'eau qu'ils apportent et participent aux matériaux qui constitueront des magmas.

Ces sédiments étant plus riches que le manteau en éléments traces, leur participation à la genèse des laves d'arc peut avoir d'importantes conséquences sur la signature chimique de ces laves. Comme les sédiments associés aux zones de subduction ont des compositions chimiques variables d'une zone à l'autre, cette variabilité se retrouve dans les laves des différents arcs volcaniques. *Pour en savoir plus sur ce sujet, voir l'article de L. Jolivet « L'eau et la dynamique lithosphérique » dans ce numéro.*

Dans le cycle de Wilson, les séries sédimentaires peuvent également être remaniées lors des phénomènes de surrection, comme par exemple les orogènes ou les déformations intraplaques de grande longueur d'onde (flambage lithosphérique, ≥ 500 km). Ces exhaussements des terrains, soumis à l'érosion, ont eu pour conséquence de modifier les sens d'écoulement et les caractéristiques chimiques des aquifères, conditionnant l'évolution diagénétique des sédiments et des profils d'altération. L'érosion des sédiments anciens alimente alors de nouveaux systèmes sédimentaires, dont les directions de transport d'écoulement et les aires de dépôts seront contrôlées par la topographie résultant des mêmes contraintes tectoniques.

Le devenir d'une partie des sédiments dans la dynamique lithosphérique et le dépôt des sédiments terrigènes sont donc intimement liés aux grandes périodes érosives des temps géologiques. Ainsi, au Crétacé inférieur, en liaison avec l'ouverture du golfe de Gascogne, la marge nord du rift formait un épaulement axé sur la Bretagne méridionale et l'ouest du Massif central. Cette zone élevée, dont l'altitude pouvait atteindre 1 500 à 3 000 mètres (par analogie avec les rifts actuels), était soumise à l'érosion et à l'altération. Au nord-est de cet épaulement s'individualisa une gouttière orientée vers les bassins de Londres et de Paris, recueillant les produits d'érosion de ces zones plus élevées et s'ouvrant vers le sud-est en direction de l'océan téthysien, à travers l'actuel seuil de Bourgogne. Au Tertiaire, les contraintes tectoniques compressives à l'origine de la formation des Alpes et des Pyrénées provoquèrent une importante déformation intraplaque à grande longueur d'onde qui flexura le bassin de Paris et supprima progressivement sa subsidence. Les séries sédimentaires mésozoïques, comme par exemple celles du seuil de Bourgogne, furent alors altérées et remaniées pour alimenter de nouveaux systèmes sédimentaires qui comblèrent les bassins voisins. ■



Water dynamics, from erosion to sedimentation processes

The water cycle plays a central role in the Earth system. Weathering and erosion of all rock types are the main source of soils and solid matter transported by rivers, and the role of water is predominant in these processes. Erosion, transit and sediment deposition punctuate the land-ocean continuum. Once they have moved beyond the barrier between continent and ocean (estuaries or deltas), suspended solids transported by rivers combine with particles that are solely marine in origin and, through sedimentary and diagenetic processes, form sediment. The sediment cycle continues with the passage of materials into oceanic trenches and subduction zones. Another aspect of sediment behavior in lithospheric dynamics concerns extended erosive periods that occurred in the course of geologic time. Isostatical variations in seawater levels and large lithospheric strains (≥ 500 km) induced changes in the aquifer chemistry, diagenetic impact, weathering profiles and creation of erosional surfaces.