



Concentrée à la surface du Globe, l'eau n'en est pas moins présente en grande quantité à l'intérieur de la Terre. Elle y joue un rôle majeur en diminuant la résistance des roches, en permettant leur fusion partielle et en transportant des éléments chimiques. Elle interagit à toutes les échelles d'espaces et de temps dans les profondeurs de la croûte et du manteau, que ce soit pendant les séismes, la formation des chaînes de montagnes ou des rifts. Sans eau, il est probable que la tectonique des plaques serait très différente, voire absente de la dynamique terrestre.



L'eau et la dynamique lithosphérique



Laurent Jolivet

PROFESSEUR
 INSTITUT DES SCIENCES DE LA TERRE D'ORLÉANS (ISTO)
 UNIVERSITÉ D'ORLÉANS/INSU-CNRS
 laurent.jolivet@univ-orleans.fr

▲
Schiste bleu de l'île de Syros dans les Cyclades. Le fond de la roche est constitué essentiellement de grenats et de glaucophane, un minéral hydraté bleu (de la famille des amphiboles) qui est stable dans des conditions de pression et de température caractéristiques de la subduction. Les grands minéraux clairs sont des lawsonites, un silicate calcique très riche en eau (environ 14 %), qui reste stable dans les grandes profondeurs (plus de 200 km) des zones de subduction.

Blueschists from Syros Island in the Cyclades. The rock's matrix consists essentially of garnets and glaucophane, a blue hydrated mineral (of the amphibole family) which is stable under the high-pressure and low-temperature conditions characteristic of subduction zones. The large, light-coloured minerals are lawsonites, a highly water-rich (approximately 14%) calcium silicate, which remains stable at the great depths (exceeding 200 km) prevailing in subduction zones.

© L. Jolivet.

Où trouve-t-on l'eau à l'intérieur de la Terre ?

L'eau libre est abondante à la surface de la Terre, mais on pense qu'elle est aussi présente en grandes quantités et sous diverses formes à très grande profondeur, jusqu'à la base du manteau, voire jusque dans le noyau [Bolfan-Casanova (2005) ; Ohtani *et al.*, (2005)]. Dans les dix à vingt premiers kilomètres de la croûte terrestre, l'eau circule en empruntant les fractures qui forment un réseau plus ou moins interconnecté. On estime en général que la limite inférieure de pénétration des fluides libres correspond à la zone de transition entre le régime de déformation cassante et le régime ductile plus profond. Même si, dans les profondeurs du manteau, la concentration des fluides aqueux est faible, le volume du manteau est tel que les quantités d'eau stockées sont très importantes, au moins équivalentes au volume d'eau visible en surface.

“
Le volume d'eau stocké dans le manteau est au moins équivalent au volume d'eau visible en surface.
 ”

On trouve l'eau sous diverses formes dans la Terre profonde. Tout d'abord, elle circule librement dans les fractures ou dans les veines des roches métamorphiques. Si on entre plus avant dans l'intimité des roches, on trouve de l'eau sous forme de films très minces entre les grains minéraux. Cette eau joue un rôle majeur dans la dissolution et l'hydrolyse des minéraux, dans le transport et le dépôt des éléments chimiques dans les roches, ainsi que dans les processus tectoniques. Une grande part de

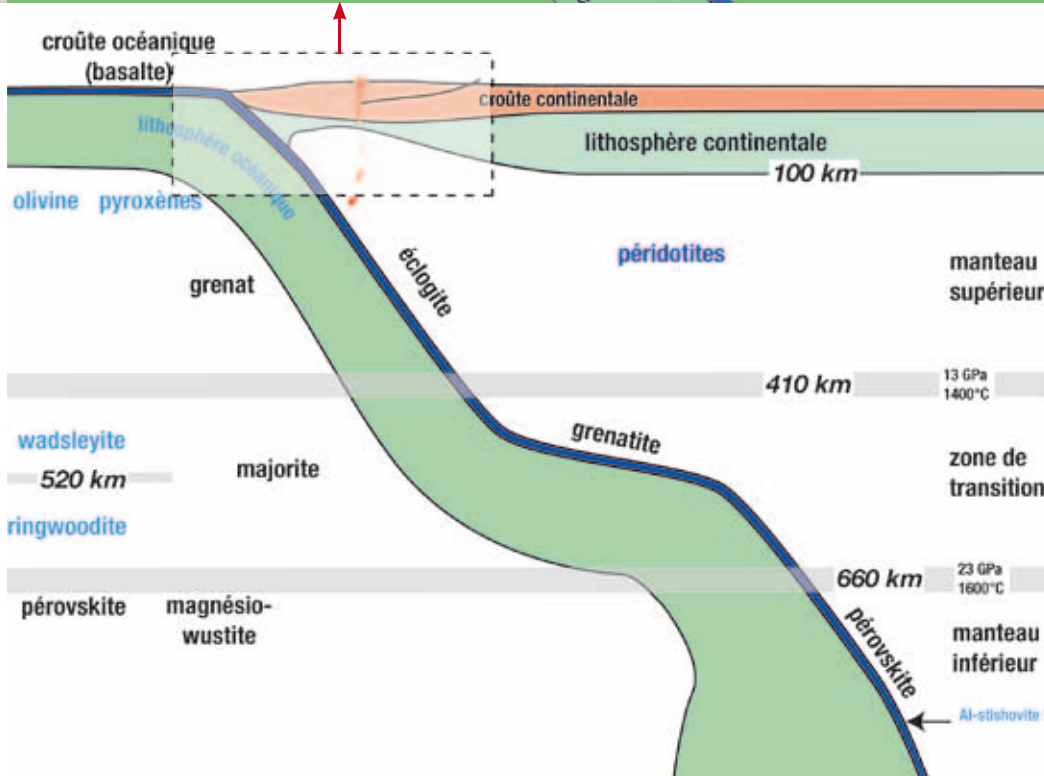
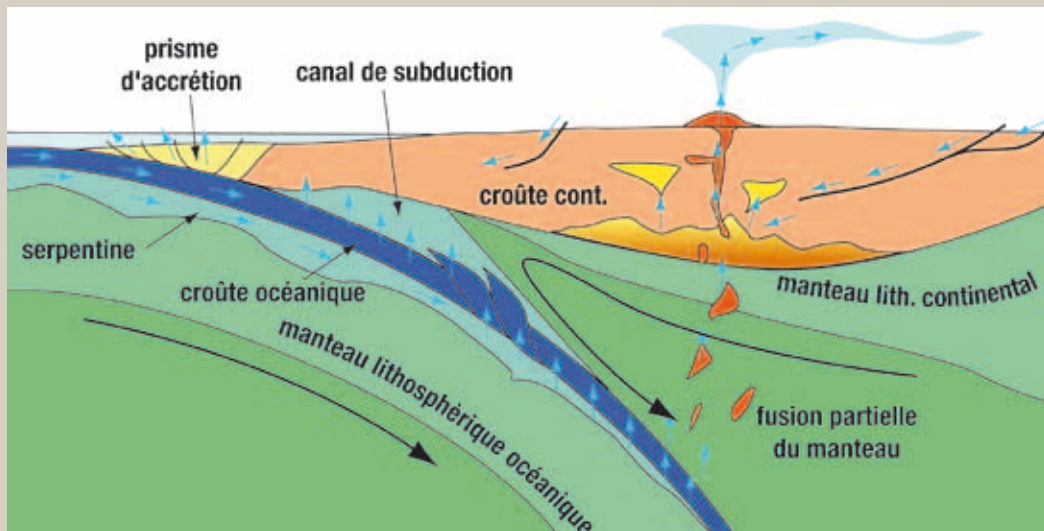


Fig. 1 : Répartition et circulation de l'eau dans la lithosphère et une partie du manteau profond. Les termes en bleu correspondent à des minéraux qui contiennent de l'eau sous forme dissoute comme l'olivine, la wadsleyite et la ringwoodite. Les flèches bleues indiquent les principaux trajets suivis par l'eau.

Fig. 1: Distribution and circulation of water within the lithosphere and part of the lower mantle. Terms in blue correspond to minerals containing water in dissolved form such as olivine, wadsleyite and ringwoodite. Blue arrows indicate the main pathways followed by water.

Source : L. Jolivet, V. Famin, P. Philippot et Ph. Agard. Au plus profond de la Terre. *Pour la Science*, n° 58, janvier-mars 2008.

cette eau est intégrée à la roche dès la formation des sédiments. L'eau de mer, piégée dans la porosité des roches lors de la diagenèse, se retrouve ainsi entraînée en profondeur.

L'eau est présente dans les minéraux essentiellement sous deux formes. Elle peut faire partie intégrante de leur formule chimique, l'ion OH⁻ étant intégré dans la structure cristalline. Les exemples les plus classiques sont les micas ou les argiles, mais des minéraux moins connus comme les amphiboles, la lawsonite, la chlorite contiennent également des proportions d'eau importantes (jusqu'à 14 % dans la lawsonite ou la chlorite).

L'eau peut également être sous forme dissoute dans des minéraux dont la formule chimique n'en contient pas. On peut ainsi observer des proportions significatives d'eau dans des minéraux normalement anhydres tels que l'olivine ou le quartz. Dans ces deux cas, l'eau contenue dans les minéraux joue un rôle majeur dans les processus de déformation et de recristallisation métamorphique.

L'eau entre dans les profondeurs de la Terre par les failles normales comme celles qui fracturent la croûte océanique dans les rifts médio-océaniques. Cette eau peut descendre profondément dans la croûte, voire

h1b-2
d7-h1a

h1b-2
h3a

h1b

h3

h3G

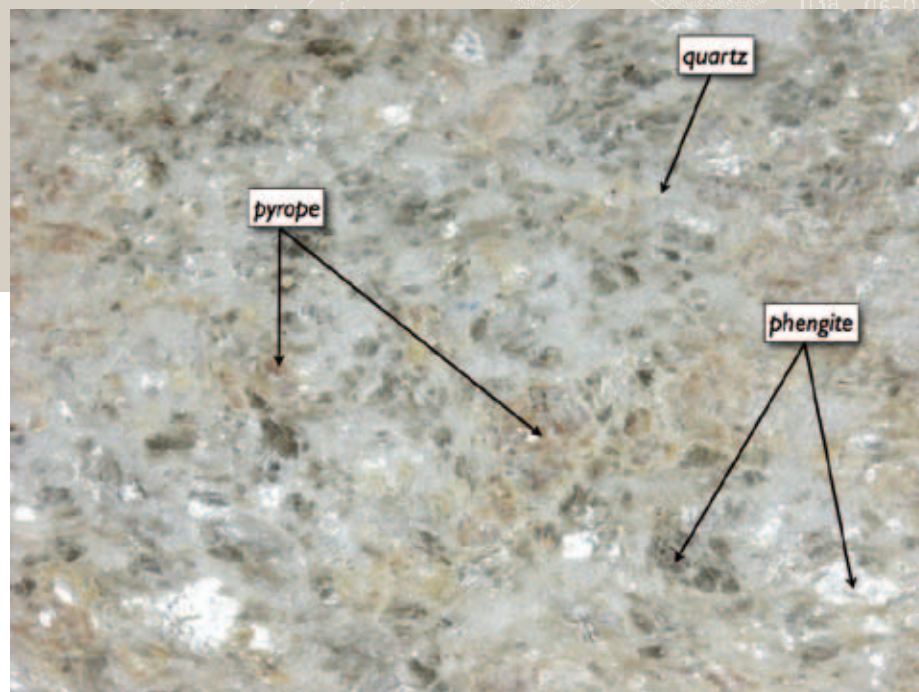
h3a d6-h1a

Dans les régions de magmatisme d'arc, la richesse en eau des magmas est à l'origine d'un volcanisme explosif très dangereux.

jusque dans le manteau. Mais c'est essentiellement par les zones de subduction qu'une grande partie de l'eau s'introduit dans le manteau [Schmidt et Poli (1998)]. L'eau emprisonnée dans les sédiments, dans la croûte ou dans le manteau pénètre à l'intérieur de la Terre, où elle est stockée au sein de phases minérales hydratées telles que la lawsonite, les amphiboles ou la serpentine. Elle se répartit dans le manteau grâce à la convection, en particulier dans la zone de transition entre le manteau supérieur et le manteau inférieur, entre 450 et 670 km de profondeur. Lors de la subduction, une part importante de cette eau est relâchée par des réactions de déshydratation. Elle provoque la fusion partielle du manteau situé au-dessus de la plaque plongeante et, en conséquence, facilite l'émission de produits volcaniques en surface : c'est le magmatisme d'arc. Dans ces régions, la richesse en eau des magmas est à l'origine d'un volcanisme explosif très dangereux. Il est difficile de faire le bilan volumétrique de l'eau qui entre et qui ressort du manteau, mais il est vraisemblablement équilibré.

Où est l'eau dans la lithosphère ?

La question se pose différemment pour la lithosphère continentale et la lithosphère océanique. Dans le cas des océans, le problème est relativement simple car la lithosphère est renouvelée en permanence. L'eau pénètre essentiellement dans la croûte et dans le manteau par les failles et les fractures de la région du rift médio-océanique. Un circuit de type convectif s'établit avec une descente d'eau de mer froide et une remontée d'eau chaude chargée en éléments métalliques par les sources hydrothermales telles que les fumeurs noirs. Les observations des séries ophiolitiques affleurant dans les chaînes de montagnes montrent que l'eau de mer pénètre jusqu'à la base de la croûte (entre 4 et 10 km) et parfois au sommet du manteau, transformant les gabbros en amphibolites et les péridotites en serpentinites. Cette injection d'eau dans le manteau, et la transformation des roches en serpentinites, a des conséquences très importantes sur la géodynamique interne, car les phases hydratées sont en général peu résistantes.



▲ Photo 1 : Quartzite à pyrope et phengite (mica blanc) du massif de Dora Maira dans les Alpes occidentales. Malgré un enfouissement supérieur à 100 km, cette roche contient des minéraux hydratés (micas blancs) en proportions importantes.

Photo 1: Quartzite containing pyrope and phengite (white mica) from the Dora Maira Massif in the western Alps. Although buried at depths exceeding 100 km, this rock contains hydrated minerals (white mica) in large proportions.

© L. Jolivet.

Le cas de la lithosphère continentale est plus complexe. Son histoire géologique peut être très longue, de plusieurs milliards d'années dans certains cas, et sa structure beaucoup plus hétérogène. L'eau de la lithosphère continentale a trois origines : l'eau des sédiments, l'eau circulant dans les failles et les zones de déformation en général, et l'eau contenue dans les magmas, qu'ils soient d'origine mantellique ou crustale. Tant que les sédiments ne sont pas impliqués dans des processus tectoniques, l'eau des sédiments ne joue pas de rôle majeur dans la géodynamique. Mais, lorsqu'ils sont enfouis en profondeur, parfois sous une chaîne de montagne, une série de réactions métamorphiques conduisant souvent à la déshydratation des roches va redistribuer cette eau. Les phyllosilicates (argiles, micas...) sont les porteurs privilégiés de l'eau dans la croûte continentale. Une part significative de l'eau reste intégrée à des phases minérales hydratées jusqu'à de grandes profondeurs, puisque les roches métamorphiques d'ultra-haute pression du massif de Dora Maira, dans les Alpes, enfouies à plus de 100 km de profondeur, conservent des quantités importantes de micas blancs [Chopin et Schertl (1999)].

►
Photo 2 : Comportement des roches en fonction de leur composition minéralogique et de leur teneur en eau. Dans ce gneiss, les parties les plus riches en micas (en blanc), sont partiellement fondues, alors que les parties les plus basiques, anhydres, restent intactes (affleurement de la Province des Gneiss dans l'ouest de la Norvège).

Photo 2: Behaviour of rocks according to their mineralogical composition and water content. In this gneiss, the portions containing the most mica (white) have been partially melted, whereas the drier, more basic, anhydrous portions have remained unaltered (the Gneiss Province outcrop in western Norway).

© L. Jolivet.



► L'ORIGINE DES EAUX PROFONDES DÉTERMINÉE À PARTIR DES ISOTOPES DE L'OXYGÈNE ET DE L'HYDROGÈNE

Catherine Lerouge - BRGM - c.lerouge@brgm.fr

L'eau présente à la surface de la Terre résulte pour une grande part de l'intense dégazage qui a eu lieu après son accréation. De nos jours, le volume d'eau libéré par le globe, dû essentiellement au dégazage des magmas (figure 1), équivaut à peu près au volume d'eau entrant. De grands volumes d'eau pénètrent en effet dans la lithosphère en passant par les pores, les fractures de la couverture sédimentaire (330 106 km³) (1) et les structures tectoniques (dorsales médio-océaniques, décollements lithosphériques), jusque dans

l'asthénosphère via les zones de subduction. Ensemble, lithosphère et asthénosphère contiennent un volume d'eau évalué à 400 106 km³ (1).

La géochimie des isotopes stables de l'oxygène (rapport isotopique ¹⁸O/¹⁶O) et de l'hydrogène (rapport isotopique D/H) permet de retracer l'origine de ces eaux (figure 2).

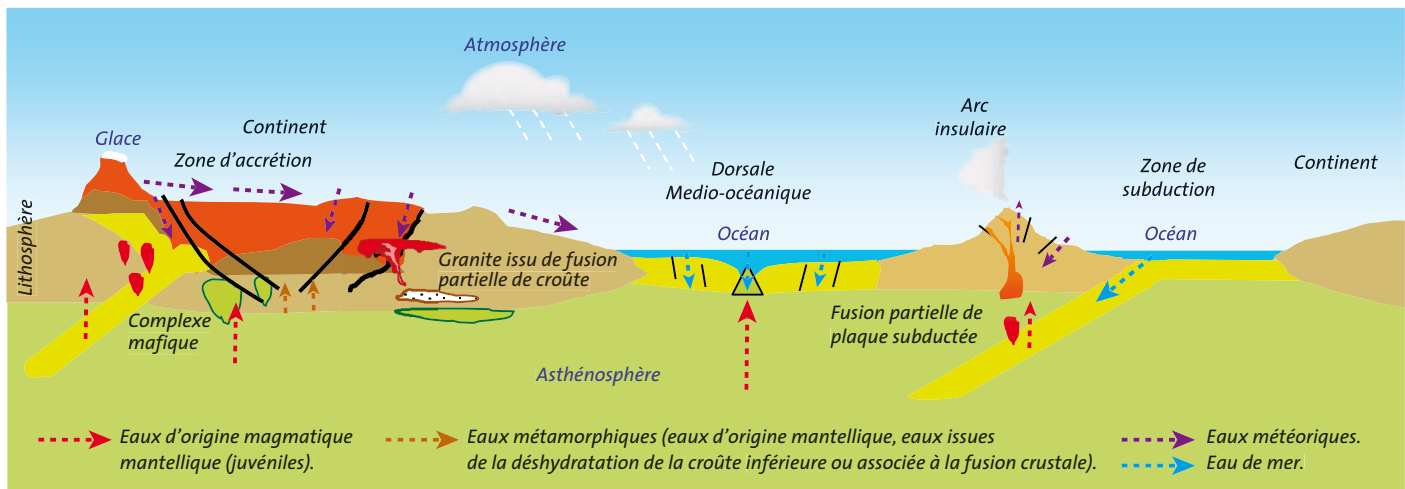
Les eaux de surface, eau de mer et eaux météoriques, ont été échantillonnées sur l'ensemble de la surface de la Terre et ont fait l'objet

d'analyses systématiques. Les eaux d'origine mantellique ont été essentiellement analysées par extraction de l'eau contenue dans les roches volcaniques telles que les basaltes des rides médio-océaniques.

Les eaux présentes dans la lithosphère ont souvent une origine mixte. Ce sont : 1) des eaux de surface ayant pénétré dans la croûte par les réseaux de fractures et failles, ou 2) des eaux résultant de la déshydratation des roches profondes ou du dégazage magmatique, et remontant

via des structures tectoniques. Ces eaux circulant à travers la lithosphère interagissent avec les roches. Elles sont à l'origine de précipitations dans les fractures et de modifications minéralogiques ; une partie est piégée dans les minéraux soit sous la forme d'inclusions fluides, soit incorporée dans leur réseau cristallin (minéraux hydroxylés).

Les compositions isotopiques en oxygène et en hydrogène de ces eaux peuvent être mesurées directement à partir de l'eau contenue par



▲ Fig. 1 : Coupe simplifiée de la surface de la Terre montrant les principales circulations d'eau entre atmosphère, lithosphère et asthénosphère.

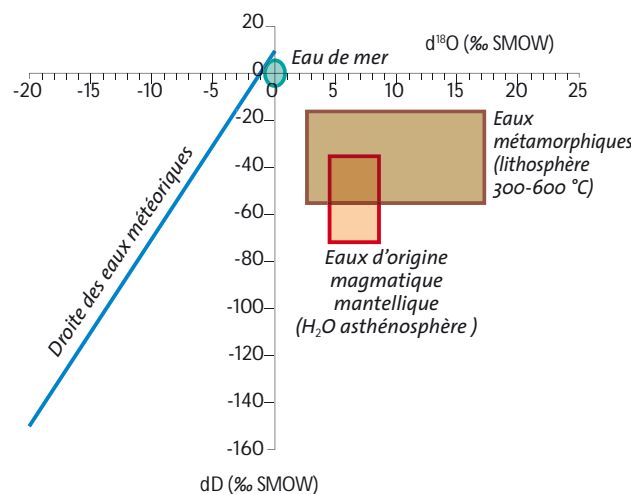
Fig. 1: Schematic cross-section of the Earth showing the major water fluid transfers between atmosphere, lithosphere and asthenosphere.

© C. Lerouge, BRGM.

► Fig. 2 : Compositions isotopiques en oxygène et hydrogène des principaux réservoirs d'eau connus : asthénosphère, lithosphère et atmosphère. Les compositions isotopiques de l'eau sont exprimées en unités d pour mille par rapport au standard international SMOW (Standard Mean Ocean Water), définies par l'équation : $\left(\frac{[^{18}\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{échantillon}}}{[^{18}\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$ (‰ SMOW)

Fig. 2: Oxygen and hydrogen isotopic compositions of the main water reservoirs: asthenosphere, lithosphere and atmosphere. Isotopic data are given in the standard d notation relative to the international standard SMOW, following the equation: $\left(\frac{[^{18}\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{sample}}}{[^{18}\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000$ (‰ SMOW)

© C. Lerouge, BRGM



les inclusions fluides, mais les volumes sont infimes. Elles peuvent aussi être déterminées indirectement à partir des minéraux issus des fluides aqueux. En effet, ces minéraux ont une composition isotopique représentative de celle du fluide, qui dépend de la température de formation du minéral. L'origine des eaux peut ensuite être déterminée en comparant leur composition isotopique avec celle des principaux réservoirs connus (figure 2).

(1) - Données provenant du site <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.eau.html>.

“ La partie supérieure de la croûte continentale est parcourue d'un réseau de failles et de veines plus ou moins interconnectées qui autorise la circulation de l'eau à grande échelle. ”

Une part importante de l'eau peut être relâchée dans la croûte (zone de subduction), auquel cas elle va diminuer le point de fusion des roches de composition granitique, provoquant une fusion partielle et donnant naissance à des magmas granitiques tels que ceux du Baltoro ou du Manaslu en Himalaya.

Lorsque la fusion partielle et la production de magma granitique sont importantes – comme c'est le cas dans les chaînes de montagnes très matures ou pendant les épisodes d'écroulement post-orogénique –, la montée des magmas riches en eau vers les parties supérieures de la croûte va contribuer à « assécher » la croûte inférieure. Celle-ci est alors caractérisée par des lithologies plus anhydres comme des granulites par exemple. Par ailleurs, l'observation de zones de déformation intense – grands chevauchements, grandes failles normales à faible pendage, grands décrochements – révèle des phases minérales hydratées et des veines minéralisées, montrant que de l'eau a circulé jusqu'à des profondeurs supérieures à 20 km [Famin *et al.*, (2004)]. La partie supérieure de la croûte continentale est parcourue d'un réseau de failles et de veines plus ou moins interconnectées qui autorise la circulation de l'eau à grande échelle. Plus profondément, à des températures supérieures à 350-400 °C, la circulation des fluides est beaucoup plus limitée ; la production de fluides par des réactions métamorphiques est essentiellement locale. Dans la croûte continentale, la zone de transition entre la déformation cassante et la déformation ductile joue donc un rôle majeur dans la répartition de l'eau et, comme nous le verrons par la suite, dans la déformation.

Il y a également de l'eau dans le manteau, sous la lithosphère continentale, comme le montrent les enclaves remontées par certains volcans. Il s'agit d'une question de première importance, car la présence ou l'absence d'eau dans le manteau lithosphérique sous-continentale conditionne en grande partie sa résistance.

Comment l'eau interagit-elle avec la déformation ?

L'eau joue un très grand rôle dans les processus tectoniques en rendant les roches plus facilement déformables. C'est un point d'importance majeure car, pour que de grands déplacements soient possibles (déplacements des plaques les unes par rapport aux autres, glissements de plusieurs centaines de kilomètres le long de grandes failles), il faut que les roches soient, localement, suffisamment peu résistantes pour être fortement déformées. Or, l'eau est au premier plan des acteurs de ces processus de déformation.

Par sa seule présence, et en dehors de toute modification de la minéralogie, l'eau rend les roches plus déformables. Sous la forme de films très minces entre les grains, l'eau est un agent lubrifiant qui se révèle très efficace. Par ailleurs, l'eau transporte des éléments chimiques en solution d'un point à l'autre de la roche, entraînant des dissolutions à certains endroits et des recristallisations en d'autres.

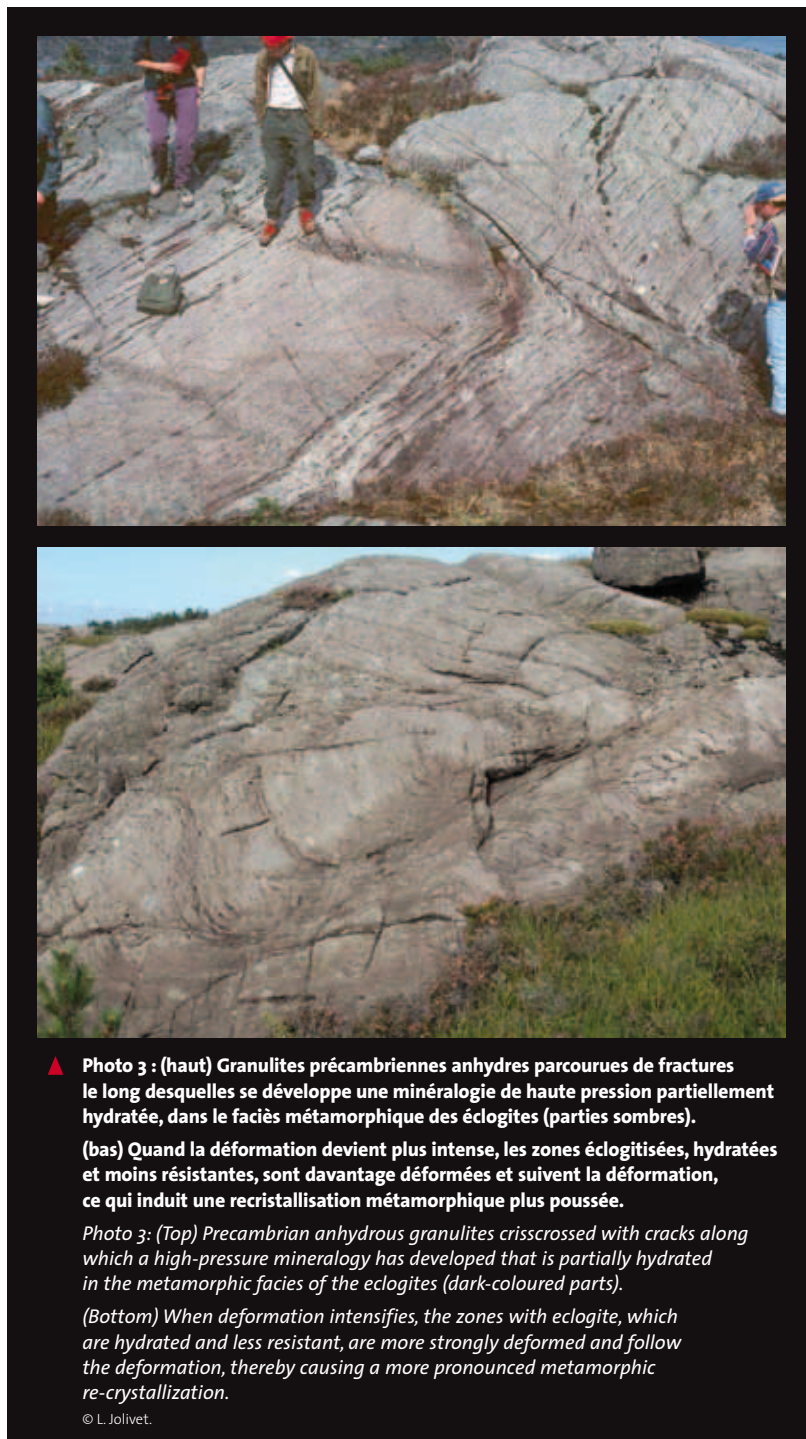
Un deuxième processus contribue à affaiblir les roches. Lors de l'enfouissement, la minéralogie des roches se transforme en s'adaptant à l'augmentation de la pression et de la température : c'est le métamorphisme. En présence d'eau, des phases cristallines hydratées, comme les micas, vont se former. L'eau ayant tendance à s'insinuer le long des zones de déformation principales, au travers des failles et des veines, c'est surtout dans ces zones que vont se former les associations minérales riches en micas ou autres phases hydratées. Par exemple, on observe souvent que la déformation d'un granite – composé en majorité de quartz et de

“ L'eau joue un très grand rôle dans les processus tectoniques en rendant les roches plus facilement déformables. ”

feldspath potassique anhydres, avec un faible pourcentage de mica (qui contient 3 à 4 % d'eau) –, se traduit par la formation (par hydratation) d'une nouvelle roche, un micaschiste, beaucoup plus riche en micas. Lors de la déformation, qui peut être tout d'abord cassante, l'eau pénètre la roche et transforme par hydrolyse des feldspaths anhydres en micas hydratés. Ces derniers, constitués en outre de feuillets superposés, sont beaucoup moins résistants aux contraintes mécaniques que les feldspaths. Une instabilité peut alors se créer et la déformation se localiser dans une zone privilégiée. Ce type d'interaction est couramment observé aux profondeurs de la transition ductile-cassant et dans les zones de subduction où les recristallisations métamorphiques soulignent la zone de décollement des grands chevauchements.

“ Lors des séismes, des fractures s'ouvrent et se referment en permanence, créant des variations rapides de pression des fluides. ”

Un troisième type d'interaction est à prendre en compte dans les processus de fracturation. De façon générale, les roches sont d'autant plus résistantes à la fracturation que la pression, et donc la profondeur, qu'elles subissent est élevée. Dans le cas où des fluides sont piégés dans une formation rocheuse, ils vont supporter une part de la charge (on dit qu'ils sont en surpression) et diminuer d'autant la pression effective supportée par la roche, qui sera de fait plus facile à fracturer. Or, lors de la déformation de la croûte, en particulier au moment des séismes, des fractures s'ouvrent et se referment en permanence, créant des variations rapides de pression des fluides. Lors du fonctionnement sismique d'une faille, ces variations de pression et de déformation des roches sont parfois appelées pompage sismique. Les données de la sismologie montrent que les zones de failles sismiques sont en effet riches en fluides, en particulier vers la base du domaine cassant.



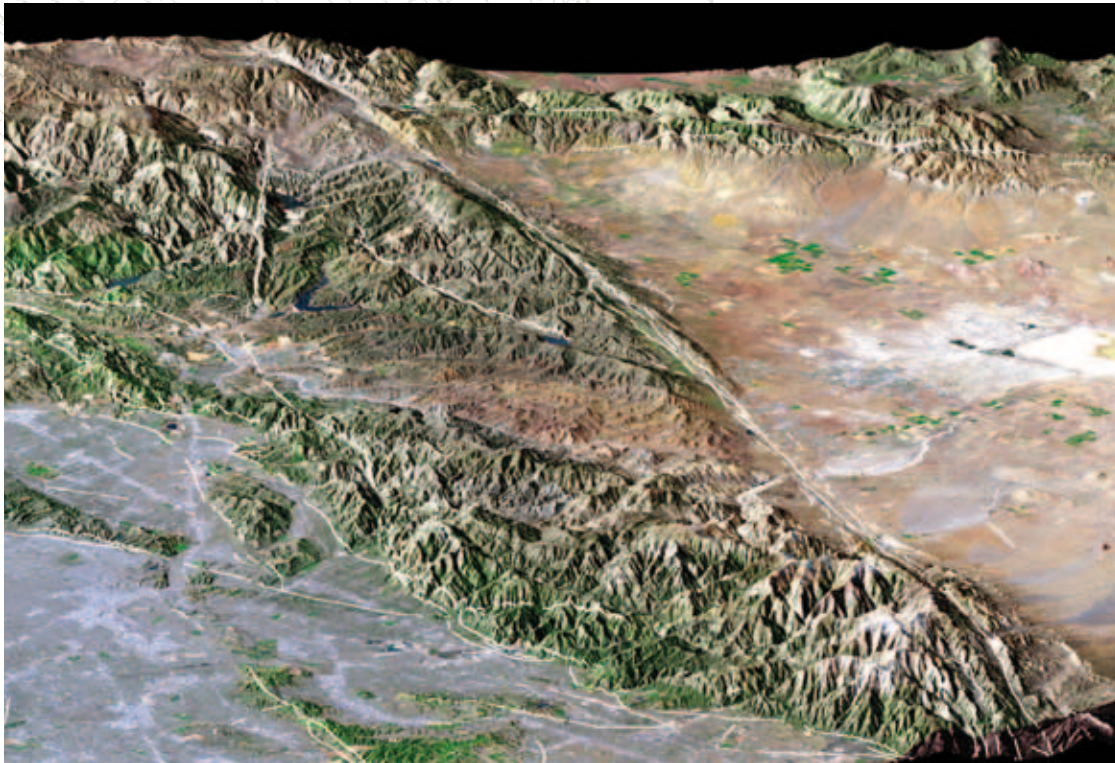
▲ **Photo 3 : (haut) Granulites précambriennes anhydres parcourues de fractures le long desquelles se développe une minéralogie de haute pression partiellement hydratée, dans le faciès métamorphique des écoligites (parties sombres).**

(bas) Quand la déformation devient plus intense, les zones écoligitisées, hydratées et moins résistantes, sont davantage déformées et suivent la déformation, ce qui induit une recristallisation métamorphique plus poussée.

Photo 3: (Top) Precambrian anhydrous granulites crisscrossed with cracks along which a high-pressure mineralogy has developed that is partially hydrated in the metamorphic facies of the eclogites (dark-coloured parts).

(Bottom) When deformation intensifies, the zones with eclogite, which are hydrated and less resistant, are more strongly deformed and follow the deformation, thereby causing a more pronounced metamorphic re-crystallization.

© L. Jolivet.



▲ La faille de San Andreas en Californie est très active et bien visible dans le paysage. L'intensité de l'activité sismique le long de la faille est notamment conditionnée par la présence d'eau dans les formations rocheuses en profondeur.

The San Andreas Fault in California is very active and is clearly visible in the landscape. Earthquake intensity along the fault is notably conditioned by the presence of water in the rocky formations at depth.

© <http://earthobservatory.nasa.gov>

Quelles conséquences pour la géodynamique ?

On voit donc se dessiner une série d'interactions entre les fluides et la déformation, depuis les domaines cassant et sismique jusqu'aux domaines ductiles plus profonds. Ces processus, qui conduisent à la localisation de la déformation par les fluides, sont reconnus sur de nombreux exemples. La faille de San Andreas possède des portions le long desquelles le glissement est permanent et régulier, produisant une multitude de petits séismes souvent non ressentis par les populations. En revanche, certaines de ses portions sont très dangereuses, caractérisées par des séismes rares mais violents. La nature des roches en profondeur, mais aussi leur richesse en fluides contrôlent ces différences de comportement.

À une échelle plus vaste, la présence de phases hydratées en profondeur, comme la serpentine dans les zones de subduction, contribue fortement à lubrifier les grands contacts tectoniques. On retrouve dans les chaînes de montagnes des roches ayant fait un aller-retour supérieur à 80-100 km de la surface vers

des profondeurs, puis à nouveau vers la surface où on les trouve aujourd'hui. La subduction explique facilement le trajet des roches vers la profondeur. Mais il faut aussi qu'elles se détachent de la plaque plongeante, puis qu'elles remontent. Dans le cas de la subduction océanique, la lithosphère plongeante comporte un niveau riche en serpentine au sommet du manteau ; ce niveau peu résistant peut être le siège d'un décollement et faciliter le décrochage d'unités tectoniques qui remontent ensuite vers la surface grâce aux forces de flottabilité.

L'eau joue donc un rôle majeur à tous les niveaux de la géodynamique, depuis les failles de la croûte supérieure jusqu'aux grandes profondeurs des zones de subduction. Elle est présente en quantités importantes dans le manteau et y joue un rôle en diminuant la résistance, mais aussi en facilitant la fusion des roches et la formation de magmas qui rejoignent la surface. Il y a donc plusieurs échelles de circulation de l'eau dans la Terre, allant des petites cellules de convection observées au niveau des dorsales médio-océaniques jusqu'à la grande circulation impliquant la subduction et le magmatisme d'arc. ■



Water and lithospheric dynamics

Concentrated mainly at the surface, water is nevertheless present deep inside the Earth where it plays a prominent role by lowering the mechanical resistance of rocks, by allowing partial melting of the crust and mantle and by transporting chemical elements. Present in large quantities in sediments, as well as in the oceanic crust and serpentinised mantle, it enters the depths of the Earth through subduction zones. Part of this water can plunge to depths of several hundreds of kilometres, where it modifies the mechanical properties of the mantle; the remainder is expelled towards the surface in magma. Via faults, it also penetrates the crust, where it facilitates deformation in the uppermost 10-20 km of the continental crust. An interaction is observed at all spatial scales between deformation (faults and ductile shear zones) and the circulation of aqueous fluids from the surface towards the depths of the crust and mantle. Similarly, fluids interact with the deformation of the lithosphere at different time-scales, ranging from earthquakes (a few seconds or minutes) to the uplift of mountain belts or the formation of rifts (a few tens of millions of years). It is likely that, without water, plate tectonics would be very different, or even non-existent in the Earth dynamics.