DES PRESSIONS EXTREMES POUR TRANSFORMER LA MATIERE

LA CELLULE À ENCLUMES DE DIAMANT

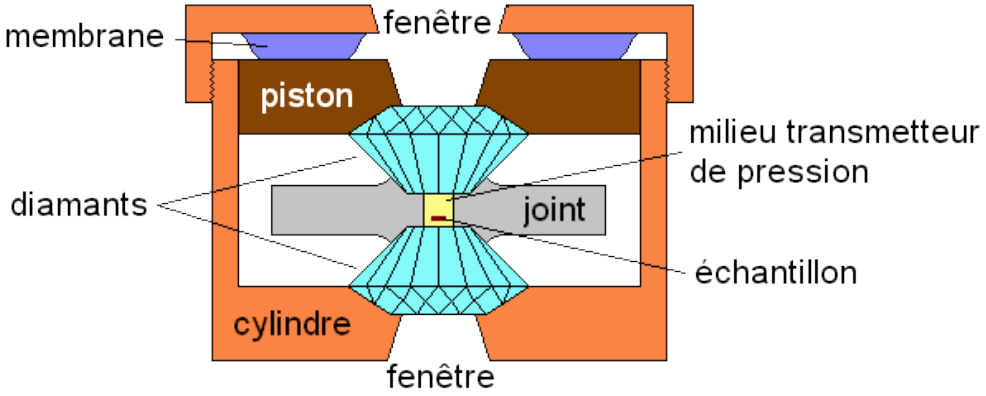
Instrument fondamental pour l'étude expérimentale des matériaux,
du manteau et du noyau terrestre.

Le domaine de pression et température accessible par cette technique couvre pratiquement tout le domaine de pression et de température que l'on rencontre à l'intérieur de la Terre et des planètes telluriques : pression jusqu'à 500 GPa (5 millions d'atmosphères) et température jusqu'à 5 000 K.

Principe physique :
Pour atteindre des pressions élevées il faut appliquer une force importante sur une surface la plus réduite possible.

Le diamant présente des caractéristiques de résistance à la compression exceptionnelles et sa transparence sur une large bande de longueur d'onde, de l'infrarouge aux rayons X et gamma permet de mesurer in-situ les propriétés des matériaux à haute pression et température variable.

Le principe de la cellule à enclumes de diamant



Deux diamants sont taillés et présentent une surface plane (la tablette) d'un diamètre variant de 10 à 700 µm.

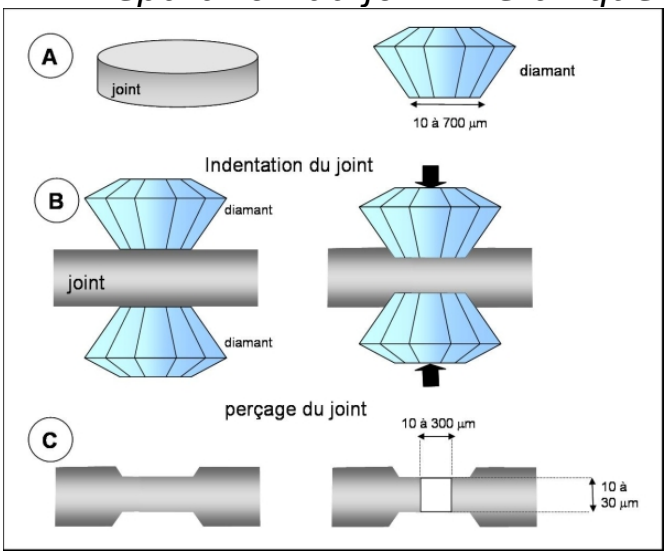
L'échantillon à étudier sous pression est placé dans un trou (de 50 à 300 µm de diamètre) percé dans une feuille d'acier (le joint) de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur que l'on serre entre deux diamants à l'aide de systèmes mécanique de levier ou de systèmes pneumatiques.

La membrane,
les pistons,
le joint

Source : A San Miguel

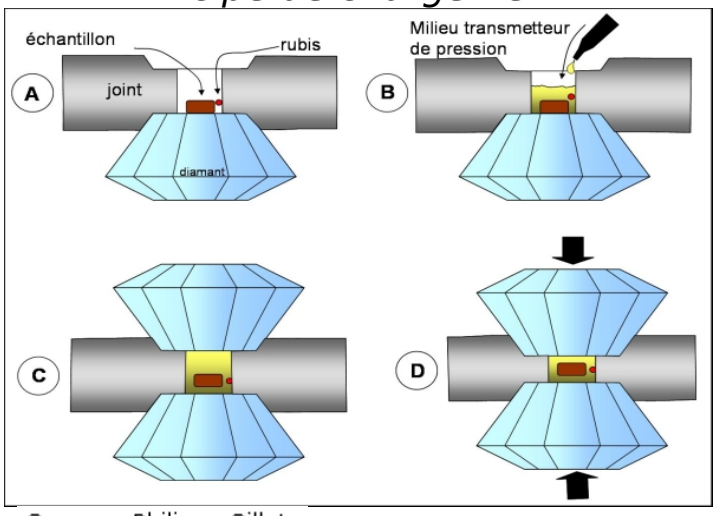
Préparation d'une expérience en cellule à enclumes de diamants

Préparation du joint métallique



A : Disque métallique de quelques centaines de microns d'épaisseur et quelques mm de diamètre.
B : indentation du joint et formation d'une empreinte des diamants.
C : perçage d'un trou au centre de l'empreinte.

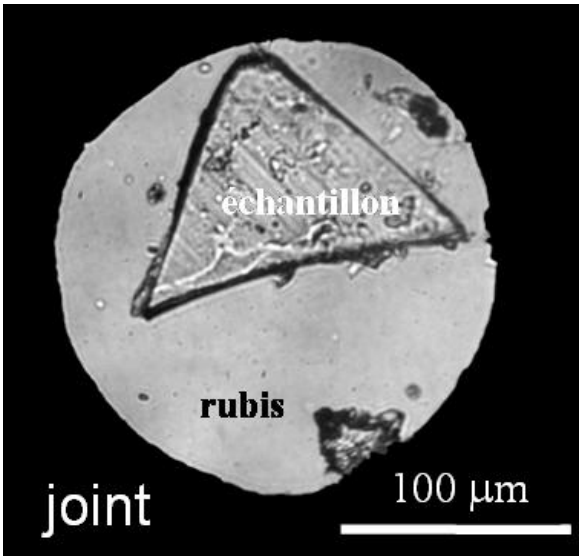
Principe de chargement



Source : Philippe Gillet.

A : mise en place du joint percé sur la tablette d'un diamant, positionnement de l'échantillon à étudier et d'un grain de rubis utilisé pour mesurer la pression.
B : remplissage du trou avec un milieu servant de transmetteur de pression à l'échantillon (liquides organiques, gaz rares, solides mous)
C : mise en place du second diamant.
D : compression par mouvement des diamants l'un vers l'autre.

Observation par microscopie optique au travers d'un des diamants d'un échantillon entouré d'un milieu de compression

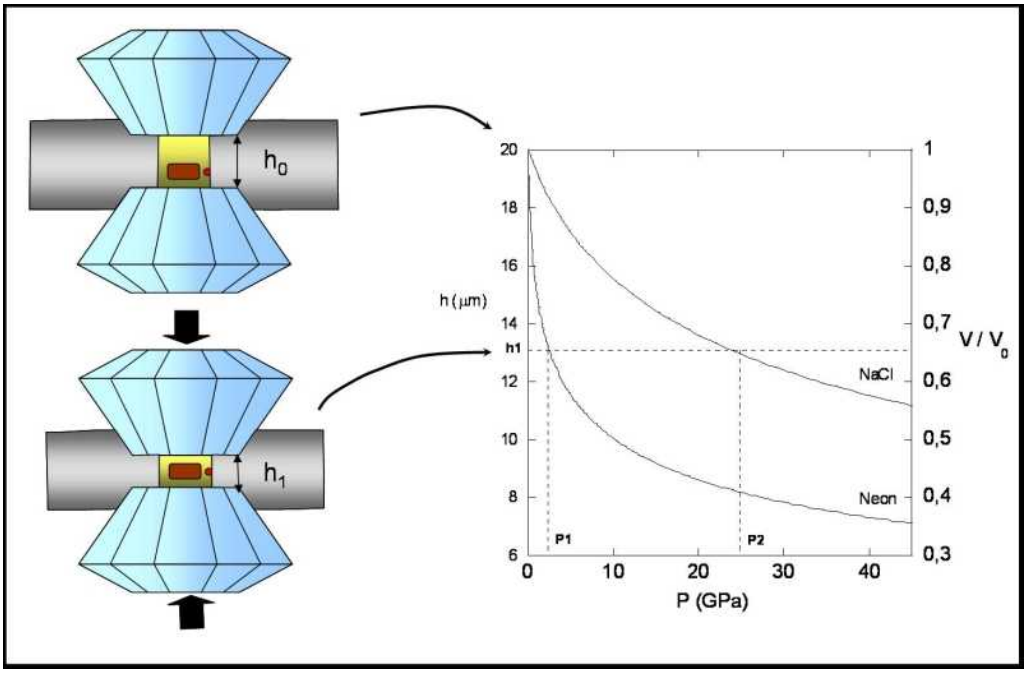


Le milieu de compression est ici de l'argon.

Un grain de rubis est situé en bas à droite.

Variation de la pression du milieu de remplissage du trou

Le fluide ou le solide remplissant le trou subit une diminution de volume et se comprime. La pression augmente d'autant plus rapidement que le fluide ou le solide est peu compressible.

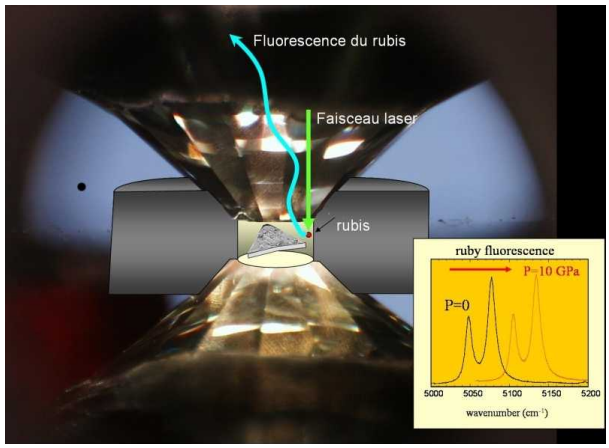


Source : Philippe Gillet.

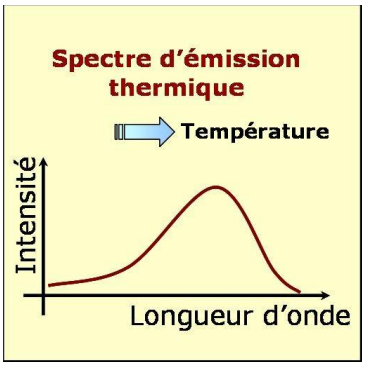
Le néon, solide à température ambiante à partir de 4 GPa, est nettement plus compressible que NaCl. On observe que pour une épaisseur de 13 µm la pression dans ce milieu est de 2 GPa. Pour obtenir une pression de 25 GPa, il faut réduire l'épaisseur du joint à environ 8 µm.

Mesurer la pression en cellule diamant

Les éclats de rubis servent à mesurer la pression à laquelle est soumise l'échantillon. Les rubis dopés avec des ions Cr^{3+} émettent une fluorescence quand ils sont éclairés par un faisceau laser. Cette fluorescence est analysée par un spectromètre. Le spectre montre deux raies de fluorescence qui se décalent avec la pression. Le décalage est calibré en fonction de la pression.



Source : Philippe Gillet.



Chauffer un échantillon dans une cellule de diamants

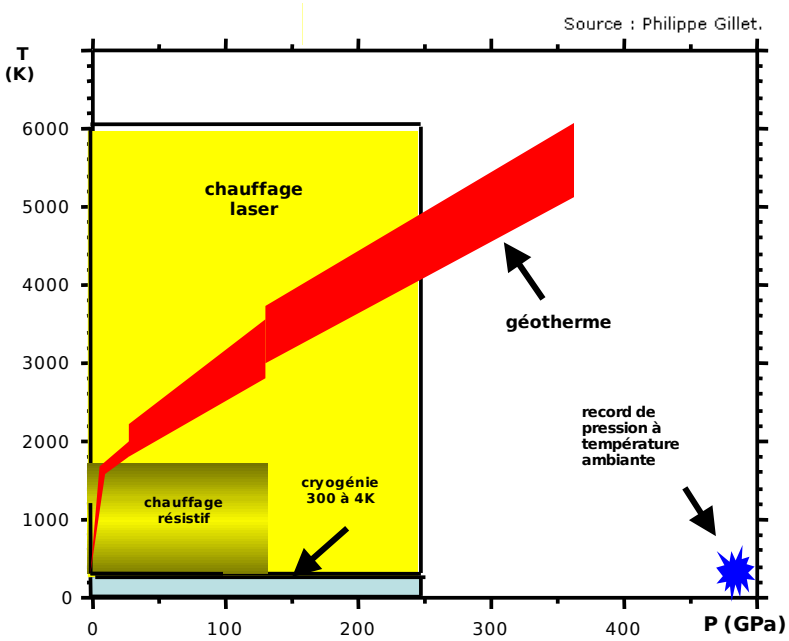
L'échantillon sous pression peut être chauffé par des fours résistifs entourant les diamants (pour des températures inférieures à 1 500 K) ou par focalisation du faisceau d'un laser IR de puissance pour atteindre des températures de l'ordre de 4 000 K. La température est déduite de l'analyse de la lumière émise par l'échantillon chauffé. En effet, la couleur ou encore la distribution des intensités en fonction de la longueur d'onde de ce rayonnement dépend de la température à laquelle l'échantillon est porté.

Les domaines d'application

Depuis la physique des matériaux sous conditions extrêmes
jusqu'à la géophysique en passant par la biologie !

La technique a beaucoup évolué pour permettre de comprimer en chauffant ou en refroidissant des matériaux solides ou liquides (magmas, minéraux, molécules organiques, éléments ...).

Domaines « pression-température » d'application de la cellule à enclume de diamant



La cryogénie sous pression se réalise en enfermant la cellule diamant dans un cryostat.

La pression maximale obtenue en cellule diamant à température ambiante se situe aux alentours de 500 GPa !

La comparaison avec un géotherme permet de voir qu'une grande partie des conditions de pression et de température caractéristiques de la Terre sont accessible à cette technique.

Possibilité de suivre le comportement des roches et minéraux et de préciser les changements de densité (ou de volume molaire), les changements de phases des minéraux, les variations des propriétés élastiques et de vitesses de propagation des ondes acoustiques en fonction de la pression et de la température, les phénomènes de fusion à haute pression.

Exemple des changements de phase de l'eau

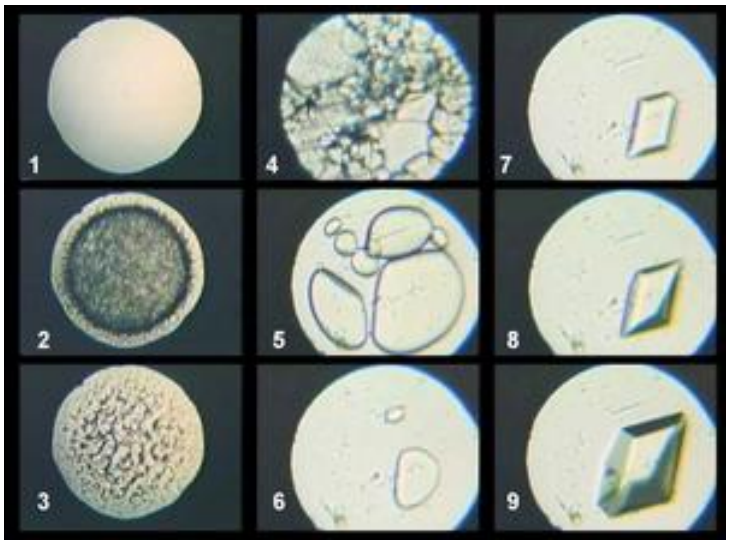
Photographies prises lors de la compression et décompression
d'une goutte d'eau à température ambiante.

(1) : goutte d'eau enfermée dans le joint métallique et comprimée entre les deux diamants.

(2) et (3) : lorsque les conditions de pression sont supérieures à 0,9 GPa (9 000 bars) l'eau se transforme en une multitude de cristaux de glace VI.

(4), (5) et (6) : lorsque l'on diminue la pression en dessous de 0,9 GPa, la glace VI fond. Sur la photographie 6 il ne reste plus que deux cristaux de glace VI entourés d'eau liquide.

(7), (8) et (9) : en ré augmentant lentement la pression au dessus de 0,9 GPa l'un des cristaux croît en développant de magnifiques faces cristallines.



SOURCE : Cellule à enclumes de diamants, Philippe Gillet, Laboratoire des Sciences de la Terre de Lyon
http://planet-terre.ens-lyon.fr/