



HAL
open science

Etude expérimentale de l'endommagement des BFUHP sous couplage thermo-mécanique

Hui Bian, William Prince-Agbodjan, Mokhfi Takarli, Laurent Molez

► **To cite this version:**

Hui Bian, William Prince-Agbodjan, Mokhfi Takarli, Laurent Molez. Etude expérimentale de l'endommagement des BFUHP sous couplage thermo-mécanique. Du laboratoire à.. l'ouvrage, Jun 2008, Nancy, France. hal-01421821

HAL Id: hal-01421821

<https://hal.science/hal-01421821>

Submitted on 22 Dec 2016

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.

Etude expérimentale de l'endommagement des BFUHP sous couplage thermo-mécanique

Hui Bian¹, William Prince-Agbodjan¹, Mokhfi Takarli², Laurent Molez¹

¹ Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM), INSA-Rennes-20, Avenue des Buttes de Coësmes – CS 14315 - 35043 Rennes Cedex

² GEMH, Equipe Génie Civil et Durabilité-IUT d'Egletons - 19300

Hui.Bian@ens.insa-rennes.fr, William.Prince-Agbodjan@insa-rennes.fr,
Mokhfi.Takarli@unilim.fr, Laurent.Molez@insa-rennes.fr,

RÉSUMÉ. Pour étudier l'évolution de l'endommagement dans un béton fibré sous sollicitation extérieure, on a développé un système combinant une mesure simultanée de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores et des déformations pour un échantillon soumis à un chargement mécanique continu. L'analyse conjointe des courbes contrainte-déformations et des courbes contrainte-vitesses sonores permet d'obtenir une relation plus précise, et plus directe, entre l'endommagement interne et la sollicitation extérieure appliquée au matériau. Dans le cadre de cette étude, on considère une sollicitation de type thermo-mécanique. Les échantillons des bétons étudiés se caractérisent par une matrice principale identique mais comportant des fibres de natures différentes. Les essais ont été réalisés sur des échantillons sains et des échantillons traités à haute température (400°C).

ABSTRACT. To study damage in concrete reinforced with fiber under an external stress, we have developed a specific device combining measurement of P-wave velocity and deformations under a mechanical loading. The analysis of stress-strains curves and stress-velocity curves provide more indication on material damage. The studied concrete samples are composed by identical matrix but containing different types of fibers. The tests were carried out on intact samples and samples which are heated at a high temperature (400 °C).

MOTS-CLÉS : Béton fibré, coulage thermo-mécanique, endommagement, ultrasons.

KEY WORDS: Concrete reinforced with fiber, coupling thermo-mechanic, damage, ultrasonic

1. Introduction

Les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUHP) sont des matériaux innovants de haute technicité qui n'ont pu être mis au point, que grâce à des progrès notables réalisés dans le domaine de la formulation des bétons. La microstructure qui résulte de cette formulation est extrêmement dense et elle confère au BFULHP des propriétés de durabilité exceptionnelle, notamment du point de vue résistance au gel/dégel, aux sels de déverglaçage, à la carbonatation et à la pénétration des agents agressifs. Les domaines d'application potentiels des BFULHP sont variés : ouvrages d'art légers ou élancés, des formes complexes, panneaux architectoniques, éléments de structure très fins soumis à des contraintes de corrosion importantes, conteneurs à haute intégrité pour l'entreposage de matières faiblement radioactives.

D'un point de vue purement mécanique, les fibres dans les BFULHP jouent deux rôles majeurs: d'une part, elles confèrent au béton une ductilité qui permet d'éviter le recours aux armatures passives classiques du béton armé, d'autre part elles empêchent la propagation rapide des fissures et induisent un comportement post fissuration nettement adoucissant.

Plusieurs travaux ont été réalisés par différents auteurs pour étudier les propriétés des BFULHP (BYU 06 ; PAR 03 ; MAN 07 ; CHE 05; Hui 00). Notre travail s'inscrit dans cette optique générale mais on s'intéresse plus particulièrement aux rôles des fibres dans l'initiation et la propagation des fissures, et à l'endommagement thermique. Nous utiliserons à cet effet des mesures non destructives de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores. Cet indicateur non destructif nous paraît particulièrement pertinent pour caractériser la fissuration interne du béton et pour suivre son évolution en cours de sollicitation (TAK 07 ; SAR 06 ; CHA 08 ; TAK 08).

2. Matériaux et démarche expérimentale

2.1. Matériaux et dispositif expérimental

Les matériaux utilisés sont des Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFULHP) préparés sur la base d'une composition de référence dans laquelle ont été incorporés 1% volumique de fibres de natures variées (fibres métalliques, synthétiques et minérales). La matrice cimentaire est composée de ciment CEM I 52.5 N, d'additions calcaire et siliceuse. Le rapport eau sur ciment est de 0,27. La dimension du plus gros granulats est 4 mm. Les essais consistent à mesurer simultanément les déformations et les vitesses de propagation des ondes ultrasonores sur des échantillons cubiques de 100 mm chargés en compression.

Le dispositif utilisé permet de suivre en continu l'évolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans un échantillon de béton soumis à un chargement de compression croissant. Il comporte (i) un générateur récepteur d'impulsions ; (ii) deux transducteurs piézoélectriques d'ondes longitudinales de

fréquence nominale de 0,5 MHz ; (iii) un support de fixation avec ressorts permettant d'appliquer les transducteurs sur l'échantillon ; (iv) un chaîne d'acquisition ; (v) une presse hydraulique de 3000 kN pilotée en mode déplacement avec une vitesse de 140 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Dans un béton, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dépend principalement de la composition du béton, de la géométrie des discontinuités qu'il contient, et de son état de saturation en eau. Les fissures, les pores et les inclusions constituent des obstacles à la propagation des ondes. Tous ces défauts atténuent l'intensité de l'onde transmise et diminuent sa vitesse de propagation



Figure 1. Dispositif permettant les mesures de vitesses ultrasonores sous charge.

2.2. Pré-endommagement thermique

A la suite d'une élévation accidentelle de la température d'un ouvrage, (incendie), le départ brutal de l'eau peut provoquer l'écaillage et l'éclatement de structure. La présence de fibre et notamment celle des fibres organiques peut limiter cet effet parce que la fusion des fibres va libérer des vides qui permettront d'absorber l'eau évaporée.

Nous avons examiné l'influence des fibres sur les propriétés résiduelles de bétons à hautes performances soumis à un échauffement atteignant 400°C. La procédure adoptée consiste à chauffer l'échantillon dans un four à une vitesse constante de 1°C par minute jusqu'à la température maximale de 400°C. Cette température est maintenue pendant 4H, puis l'échantillon est refroidi à la température ambiante avant d'être soumis à l'essai mécanique.

3. Résultats et discussions

3.1. Courbe contrainte-vitesse d'ondes longitudinales

Nous avons représenté sur la figure 2 l'évolution de la vitesse de propagation des ondes longitudinales au cours d'un chargement croissant en compression. La courbe présente quatre phases qui ont été clairement identifiées et interprétées dans des travaux antérieurs réalisés sur éprouvettes granitiques (TAK 08) et portant sur l'enregistrement simultané des courbes contraintes-déformations, contraintes-vitesse des ondes ultrasonores, et contraintes-perméabilité. Les variations de perméabilité permettent notamment de suivre l'évolution du flux gazeux en relation avec les modifications du réseau fissural au cours du chargement mécanique.

- La première phase se traduit par une augmentation de la vitesse de propagation des ondes ; elle correspond à la fermeture de l'échantillon sur les pores et fissures préexistants. La contrainte correspondant à la fin de cette phase de serrage est dénommée σ_{u-s} ;
- La deuxième phase est marquée par une faible variation de la vitesse de propagation, elle correspond à un tassement matriciel élastique de l'échantillon ;
- La troisième phase débute par le seuil σ_{u-ci} et indique une diminution régulière de la vitesse de propagation, elle correspond à l'initiation et au développement d'une fissuration stable au sein de l'échantillon ;
- La quatrième phase débute par le seuil de contrainte dénommée σ_{u-pi} , seuil de propagation instable. Elle indique une diminution plus brutale de la vitesse de propagation

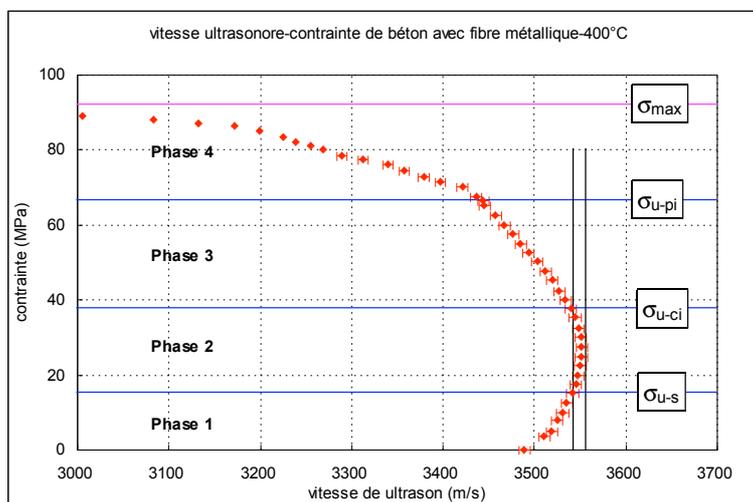


Figure 2. Evolution de la vitesse de propagation des ondes longitudinales au cours d'un chargement croissant en compression.

Sur la figure 3, nous avons comparé les valeurs du seuil d'initiation des fissures pour les différents bétons étudiés à l'état sain. On montre clairement que la majorité des bétons fibrés ont un seuil de début de fissuration (σ_{u-ci}) plus élevé que le béton témoin sans fibres. La présence des fibres retarde le début de la fissuration.

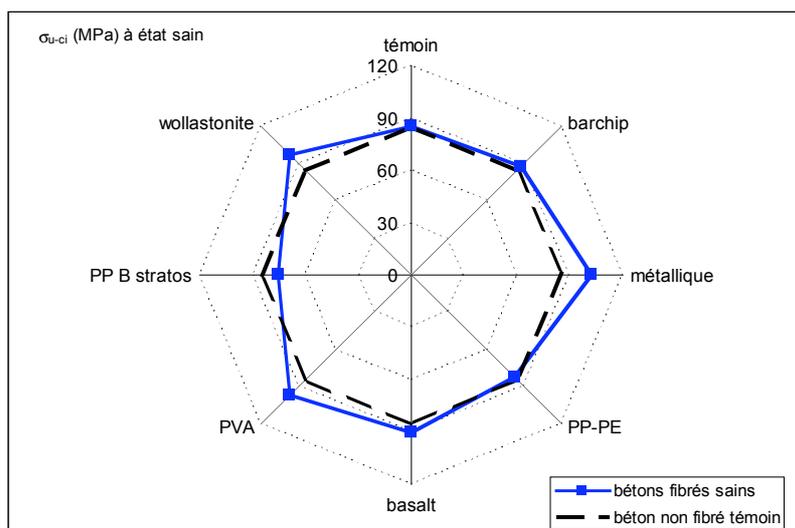


Figure 3. Le seuil d'initiation des fissures pour l'ensemble des bétons étudiés à l'état sain.

3.2. Effet de l'endommagement thermique sur les courbes contrainte-déformations

Sur la figure 4, nous avons comparé la courbe contrainte-déformations longitudinales de l'échantillon sain à celle de l'échantillon endommagé par chauffage à 400°C. Trois modifications apparaissent clairement sur cette figure :

- Une diminution du module de Young sous l'effet du traitement thermique ;
- Une diminution de la résistance maximale ;
- Un comportement post-pic nettement adoucissant pour l'échantillon chauffé à 400°C.

La diminution de la résistance et du module élastique sont la conséquence des décohésions et de la fissuration diffuse créée par le traitement thermique. Ces discontinuités d'origine thermique s'opposent à la propagation de la fissuration mécanique et rendent le comportement adoucissant.

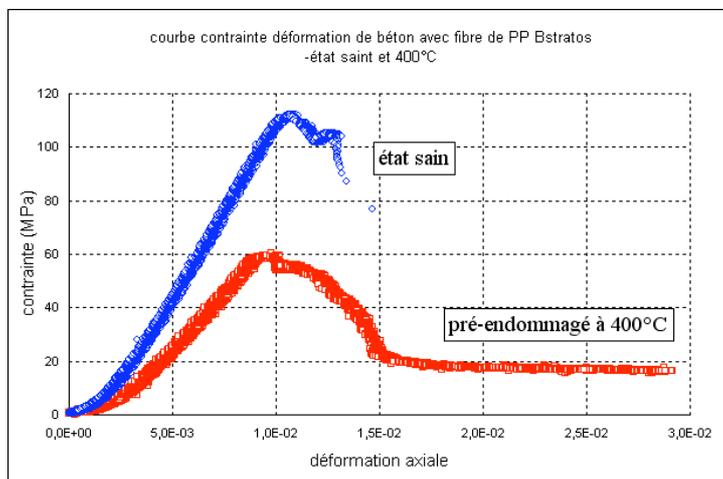


Figure 4. Effet de l'endommagement thermique sur les courbes contrainte-déformations longitudinales

Nous avons généralisé cette expérience à l'ensemble des bétons étudiés. Les figures 5 et 6 représentent les évolutions constatées pour les différents types de bétons sains ou chauffés à 400°C. Les résultats montrent que, dans tous les cas, la résistance maximale (figure 5) et le module d'élasticité longitudinale (figure 6) des échantillons chauffés sont plus faibles que ceux des échantillons sains. On note cependant que les bétons à fibres de Wollastonite résistent mieux que tous les autres.

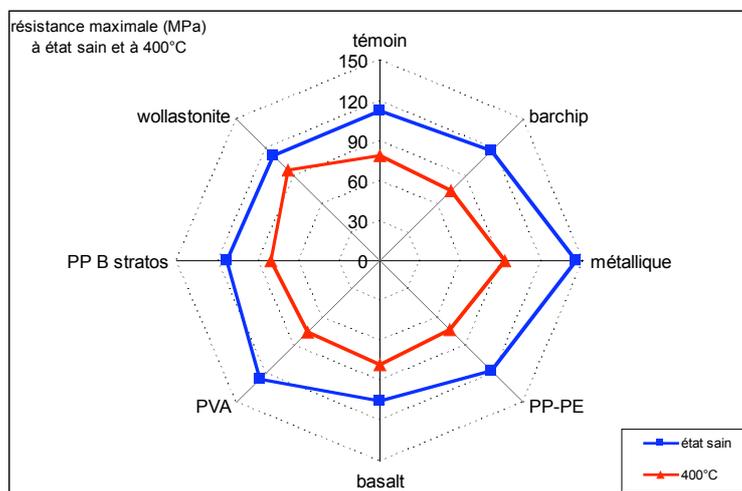


Figure 5. Effet de l'endommagement thermique sur la résistance ultime en compression simple.

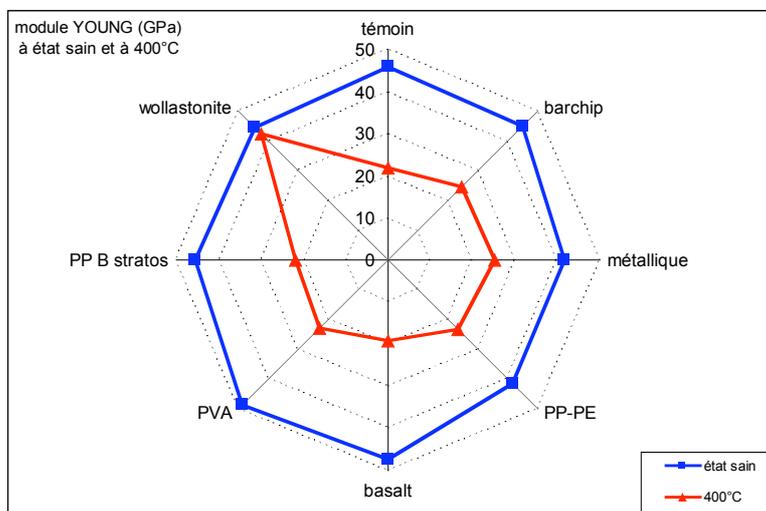


Figure 6. Effet de l'endommagement thermique sur le module de Young.

3.3. Effet de l'endommagement thermique sur les courbes de vitesse d'ondes US

La figure 7 compare l'évolution des vitesses des ondes US de l'échantillon sain à celle de l'échantillon chauffé à 400°C. On observe que le traitement thermique provoque des changements notables dans l'allure de la courbe. Trois observations paraissent manifestes :

- La première phase de chargement se traduit par une augmentation de la vitesse et marque la fermeture des discontinuités créées par le traitement thermique ;
- Le seuil de microfissuration σ_{u-ci} est considérablement abaissé (37,6MPa pour l'échantillon chauffé contre 102 MPa pour l'échantillon sain). Cela s'explique par le fait que les fissures créées au cours du chauffage et fermées dans la première phase se comportent comme des défauts fins qui serviront de zones de concentration de contraintes. Ces contraintes vont initier de nouvelles fissures et favoriser la propagation des fissures anciennes ;
- Au delà du seuil σ_{u-pi} , la vitesse des ondes diminue progressivement alors qu'elle diminue brutalement dans le cas de l'échantillon sain. Cela montre bien que les fissures diffuses d'origine thermique ralentissent la propagation des fissures mécaniques.

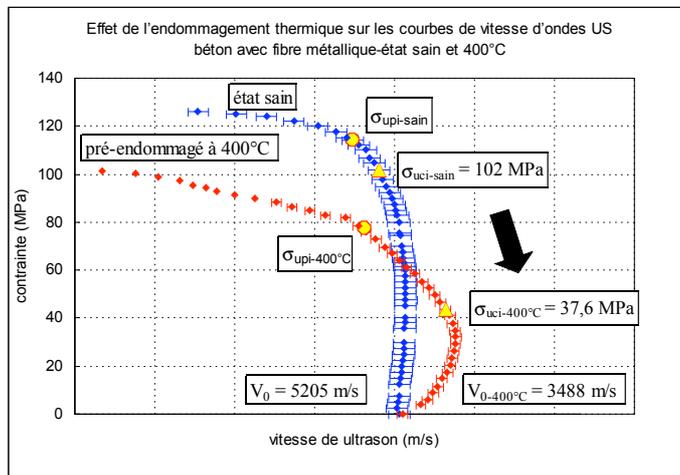


Figure 7. Effet de l'endommagement thermique sur les courbes de vitesse d'ondes US

Les valeurs des seuils de microfissuration mesurés sur les échantillons pré-endommagés à 400°C sont reportées sur les figures 8 et 9. On montre que l'initiation des fissures et leur propagation sont favorisées par la fissuration thermique des bétons fibrés, d'où la diminution des seuils σ_{u-ci} et σ_{u-pi} constatée sur la majorité des BFUHP étudiés. La fusion des fibres et/ou les décohésions aux interfaces des fibres sont probablement à l'origine de ces diminutions irréversiblement des propriétés des bétons fibrés.

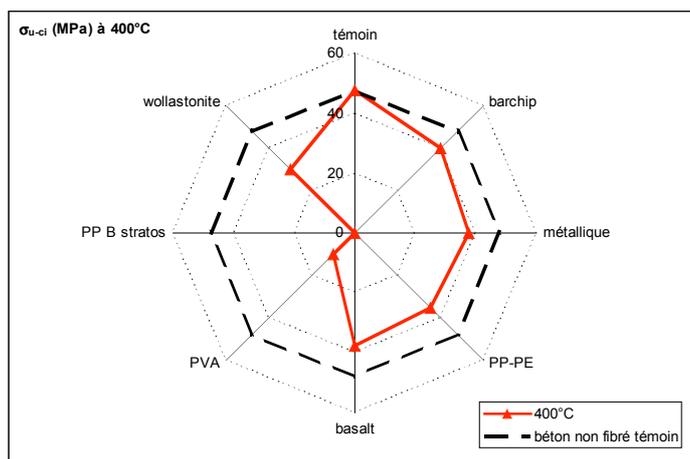


Figure8. Le seuil d'initiation des fissures après endommagement thermique à 400°C.

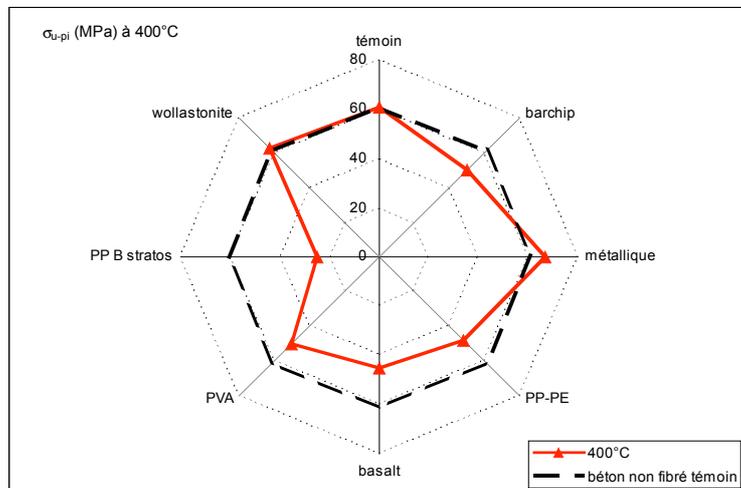


Figure 9. Le seuil de propagation instable des fissures après endommagement thermique à 400°C.

4. Conclusions

Dans cette étude nous avons exploré les effets des fibres sur le comportement mécanique des BFUHP et leur résistance à l'endommagement thermique. L'essai de caractérisation a consisté en une mesure simultanée des déformations longitudinales et de l'évolution de la vitesse des ondes longitudinales au cours d'un chargement mécanique de compression. Les résultats obtenus ont montré que :

- Contrairement aux échantillons sains dont le mode de rupture est assez fragile, les fibres et les discontinuités d'origine thermique confèrent aux BFUHP pré-endommagés à 400°C un comportement post-pic nettement adoucissant.
- Le pré-endommagement thermique implique de considérables pertes en résistance ultime et en module de Young.
- Par ailleurs, les pertes des caractéristiques mécaniques sont en adéquation avec les diminutions des seuils caractéristiques de l'initiation des fissures et leur propagation.
- Les fibres, par leur fusion et/ou décohésion, ont un effet préjudiciable sur la résistance à l'endommagement thermique des BFUHP.

5. Bibliographie

- [BYU 06] Byung Hwan Oh, *Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers*, Department of Civil Engineering, Seoul National University, South Korea, 2006
- [PAR 03] Parviz Soroushian, *Damage effects on concrete performance and microstructure*, Civil and Environmental Engineering Department, Michigan State University, USA, 2003
- [MAN 07] Manu Santhanam, *Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres*, Department of Civil Engineering, IIT Madras, India, 2007
- [CHE 05] Cheolwoo Park, *Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures*, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, South Korea, 2005
- [HUI 00] Hui Su Chen, *The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete*, The Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, China, 2000
- [CHA 07] Chaki,S, *Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions*, Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM, EA 3913), Université de Rennes 1 – INSA de Rennes, Rennes, France, 2007
- [TAK 07] Takarli,M, *Permeability and P-wave velocity change in granitic rocks under freeze–thaw cycles*, Laboratory of Civil and Mechanical, INSA de Rennes, Rennes, France, 2007
- [TAK 08] Takarli,M, *Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze–thaw condition*, Laboratory of Civil and Mechanical, INSA de Rennes, Rennes, France, 2008
- [SAR 06] Sarout, J, *Shale dynamic properties and anisotropy under triaxial loading: Experimental and theoretical investigations*, Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, Paris, France