PROPOSITION DE SUJET DE STAGE M2 / ECOLE D'INGENIEURS

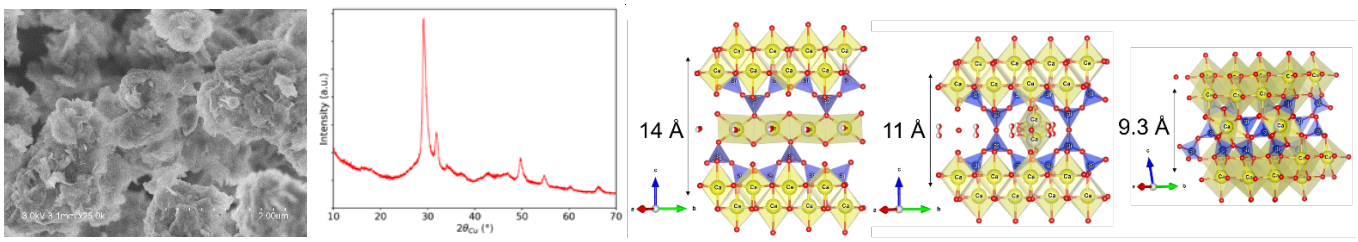
Synthèse, analyse structurale et microstructurale de phases désordonnées des ciments bas carbone

Le ciment est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde dont un des domaines d'application est le secteur de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables (socles en béton des éoliennes maritimes et terrestres). La production de ciment à l'échelle mondiale est responsable de 8% des émissions annuelles de CO_2. Un des grands enjeux sociétaux de ces dernières années est la réduction de l'empreinte environnementale du ciment par la mise au point de nouvelles compositions de ciments « bas carbone » qui permettent de garantir la durabilité des structures.

Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) de formule générique $xCaO.ySiO_2.zH_2O$ sont les phases liantes principales du ciment, obtenues par hydratation de précurseurs anhydres. Les nouvelles formulations de ciments envisagées intègrent de nombreux constituants, notamment de l'aluminium, dont l'incorporation au sein de la structure cristalline des C-S-H peut s'effectuer par substitution aux atomes de silicium. Des alumino-silicates de calcium hydratés (C-(A)-S-H) sont alors formés. Ces phases sont des hydrates à structure lamellaire désordonnée dont les particules sont nanométriques. Les mécanismes reliant les conditions de préparation à la structure obtenue restent aujourd'hui mal compris en raison de la complexité de la structure et de la difficulté d'obtenir ces phases isolées des autres phases du ciment, y compris lors de synthèses en laboratoire. Le caractère nanométrique sans ordre à longue distance de ces phases rend leurs analyses quantitative et structurale d'autant plus complexes.

L'enjeu de ce stage réside dans la caractérisation fine des matériaux synthétisés et de matériaux modèles obtenus préalablement. Pour cela la structure et la microstructure des matériaux seront analysés par DRX, ATG, MEB et MET en s'appuyant sur les plateformes DIFFRAX et CIMEX de l'école Polytechnique.

Le stagiaire intégrera le Laboratoire des Solides Irradiés (LSI) et mènera les analyses structurales en forte collaboration avec le laboratoire de Physique de la Matière Condensée (PMC).



(a) Image MEB d'un « gel » de C-S-H, (b) diagramme DRX d'un C-S-H, (c) évolution de la structure modèle des C-S-H en fonction de la composition

OBJECTIFS DU STAGE

- Etude bibliographique
- Synthèse en voie aqueuse de phases minérales
- Caractérisation structurale (DRX, Raman), microstructurale (MEB, MET), et chimique (ATG, EDS).
- Analyse du désordre structural des composés obtenus par affinement Rietveld
- Analyse des résultats et rédaction du rapport de stage

PROFIL SOUHAITE

M2 et/ou équivalent en école d'ingénieurs (stage de fin d'études)
Formation en science des matériaux, cristallographie et diffraction des rayons X, chimie du solide
Goût pour l'expérimentation, travail en équipe, intérêt pour les enjeux sociétaux, bonne maîtrise de l'anglais
Laboratoires d'accueil : Laboratoire des Solides Irradiés (LSI), Ecole Polytechnique, Palaiseau
Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (PMC), Ecole Polytechnique, Palaiseau
Durée du stage : 4-6 mois, février-juillet 2027
CV + lettre de motivation à envoyer à : marie-noelle.de-noirfontaine@polytechnique.edu ; sandrine.tusseau-nenez@polytechnique.edu; lisa.audouard@polytechnique.edu

M2 INTERNSHIP PROPOSAL

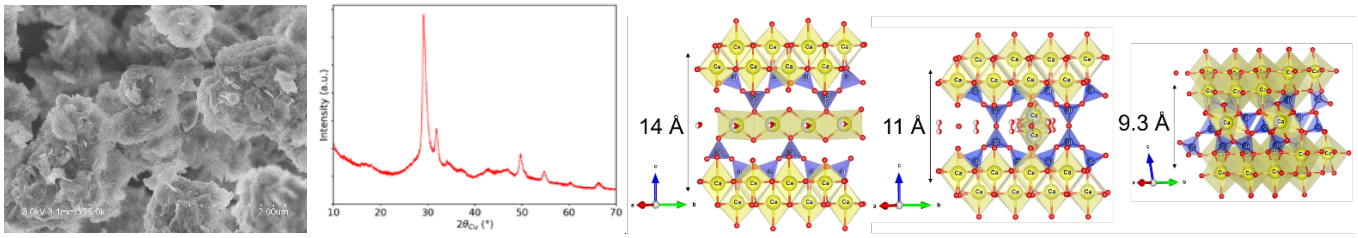
Synthesis, structural and microstructural analysis of disordered phases in low-carbon cements

Cement is the most widely used construction material worldwide, with applications including the nuclear energy sector and renewable energy, particularly in the concrete foundations of offshore and onshore wind turbines. Cement production on a global scale is responsible for approximately 8% of annual CO_2 emissions. One of the major societal challenges in recent years has therefore been to reduce the environmental footprint of cement by developing new "low-carbon" cement compositions that ensure the long-term durability of structures.

Calcium silicate hydrates (C-S-H), with the generic formula $xCaO{\cdot}ySiO_2{\cdot}zH_2O$, are the main binding phases in cement and are formed through the hydration of anhydrous precursors. New cement formulations under consideration incorporate a wide range of constituents, including aluminium, which can be incorporated into the crystal structure of C-S-H through substitution for silicon atoms. Calcium aluminosilicate hydrates (C-(A)-S-H) are then formed. These phases are hydrates with a disordered layered structure and nanoscale particles. The mechanisms linking the preparation conditions to the resulting structure remain poorly understood due to the complexity of their structure and the difficulty of isolating these phases from the other components of cement, including during laboratory-scale synthesis. The nanoscale nature and lack of long-range order of these phases make their quantitative and structural analysis even more challenging.

The objective of this internship is to perform a detailed characterization of synthesized materials and previously prepared model materials. To this end, the structure and microstructure of the materials will be investigated using X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), scanning electron microscopy (SEM), and transmission electron microscopy (TEM), supported by the DIFFRAX and CIMEX platforms at École Polytechnique.

The intern will join the Laboratoire des Solides Irradiés (LSI) and will conduct structural analyses in close collaboration with the Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (PMC).



(a) SEM image of a C-S-H "gel", (b) XRD diagram of C-S-H, (c) evolution of the structural model for C-S-H as a function of the composition

INTERNSHIP OBJECTIVES

- Literature review
- Aqueous-phase synthesis of mineral phases
- Structural characterization (XRD, Raman spectroscopy), microstructural characterization (SEM, TEM), and chemical characterization (TGA, EDS)
- Analysis of the structural disorder of the synthesized compounds using Rietveld refinement
- Analysis of the results and preparation of the internship report

DESIRED PROFILE

Master's degree (M2) and/or equivalent engineering degree (final-year internship)
Background in materials science, crystallography and X-ray diffraction, and solid-state chemistry
Strong interest in experimental work and teamwork, interest in societal challenges
Host laboratories: Laboratoire des Solides Irradiés (LSI), Ecole Polytechnique, Palaiseau
Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (PMC), Ecole Polytechnique, Palaiseau
Internship duration: 4-6 months, February-July 2027
CV + cover letter to be sent to : marie-noelle.de-noirfontaine@polytechnique.edu ; sandrine.tusseau-nenez@polytechnique.edu; lisa.audouard@polytechnique.edu