

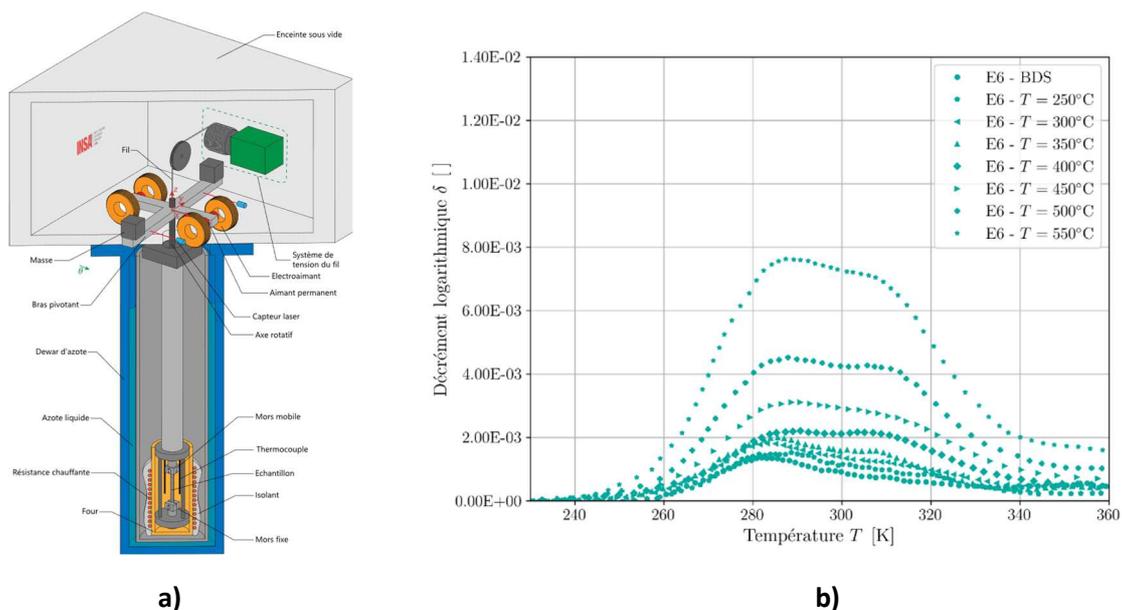
Sujet de thèse : Etude des moyens de caractérisation de la solution solide dans les aciers C-Mn

Contexte et objectifs de la thèse

La section métallurgie de Framatome travaille depuis plusieurs années sur des thématiques faisant intervenir des atomes en solution solide d'insertion (C, N), notamment, au cours du vieillissement statique et/ou dynamique. Dans ce contexte, le dosage du carbone et de l'azote en solution solide est une tâche importante et difficile pour les expérimentateurs du fait des très faibles teneurs mises en jeu (quelques dizaines de ppm). Les techniques de microanalyse spectrale (MEB ou MET EDX, EELS) ne permettent de remonter à cette information que de manière indirecte par bilan de matière. La sonde atomique permet de déterminer cette grandeur, mais reste intrinsèquement limitée à l'analyse de petits volumes et peut souffrir d'un manque de représentativité compte-tenu des inhomogénéités des matériaux étudiés et des dimensions des composants. Les méthodes de dosage par méthodes chimiques sont souvent basées sur la détermination des quantités précipités et elles permettent d'en déduire la teneur en azote en solution. Elles sont cependant lourdes à mettre en œuvre et manquent parfois de fiabilité.

La mesure du frottement intérieur d'un acier dans un pendule de torsion inversé (voir figure 1.a) est une technique de caractérisation globale reposant sur l'analyse des pics d'amortissement obtenus lors des oscillations libres de l'acier étudié après qu'il ait été soumis à une sollicitation mécanique cyclique. Ce sont les sauts des atomes interstitiels en solution (C et/ou N) entre différents sites octaédriques de la maille cubique centrée du fer qui sont responsables de l'amortissement et donnent lieu à l'apparition de pics sur les spectres de frottement intérieur mesurés en fonction de la température.

La figure 1.b représente les spectres de frottement intérieur mesurés sur un acier C-Mn à l'état brut de soudage et après différents traitements thermiques donnant lieu à différentes teneurs en C et N en solution solide. La hauteur des spectres est directement reliée à la teneur en éléments en solution solide.



**Figure 1 : a) Schéma d'un pendule de torsion inversé ;
b) Illustration de spectres de frottement intérieur typiques d'un acier C-Mn.**

Par ailleurs, la technique du pouvoir thermoélectrique (PTE), qui repose sur la mesure d'un différentiel de potentiel suite à l'application d'un gradient de température, est très sensible aux éléments en solution solide et elle peut servir pour quantifier les interstitiels en solution solide.

Enfin, de nouveaux protocoles expérimentaux laissent penser qu'avec un pilotage particulier, la combustion à détection infrarouge (CIR) pouvait permettre de doser les éléments en solution solide, notamment le carbone et l'azote.

Dans le contexte évoqué ci-dessus, l'objectif de la thèse sera d'apporter des éléments pour un dosage semi-quantitatif du carbone et de l'azote en solution solide dans les matériaux d'intérêt pour Framatome avec des méthodes globales de caractérisation microstructurale, notamment avec la technique de frottement intérieur qui est sensible à plusieurs paramètres de la microstructure (texture, présence d'atomes substitutionnels (tels que Cr, Mn, Mo...)).

Démarche et déroulé chronologique

La thèse s'articulerait selon quatre axes :

- Une étude exhaustive de la bibliographie relative aux techniques de frottement intérieur et de pouvoir thermoélectrique ainsi que leur utilisation sur des aciers,
- Une première phase expérimentale dédiée à l'étude de la technique de frottement intérieur à l'INSA de Lyon sur des alliages modèles (Fe-C, Fe-N, Fe-N-Mn, Fe-N-Mo, etc..) ; l'objectif sera d'obtenir une vision complète de l'effet des principaux éléments d'addition ainsi que de la texture et de développer les protocoles expérimentaux sur des chimies bien maîtrisées (calibrage). Des caractérisations complémentaires par pouvoir thermoélectrique et CIR seront réalisées pour compléter et approfondir les interprétations.
- Une approche simulation, étape nécessaire pour la compréhension complète des résultats expérimentaux.
- Une seconde phase expérimentale avec un matériau d'étude intéressant pour Framatome, à savoir un acier carbone-manganèse et sa soudure. L'effet du passage d'alliages modèles à un acier industriel est au cœur de l'utilisation optimale de la technique de frottement intérieur telle que la conçoit Framatome.

Profil requis : Ingénieur diplômé et/ou Master Recherche en Mécanique-Matériaux motivé par la caractérisation et la modélisation.

Rémunération : Contrat avec l'entreprise Framatome

Démarrage et localisation de la thèse : Septembre-Octobre 2025 dans l'équipe Métaux et Alliages du laboratoire MATEIS.

Encadrement INSA : Véronique Massardier-Jourdan (veronique.massardier@insa-lyon.fr), Michel Perez (michel.perez@insa-lyon.fr)

Encadrement Framatome : Nicolas Hervé (nicolas.herve@framatome.com) et Soumaya Bradai (soumaya.bradai@framatome.com)