

Evolution de l'état de contrainte dans la cémentite de l'acier de cuve 16MND5 au cours d'essais de traction à basse température (-150°C)

Raphaël Pesci, Sandie Davey, Denis Bouscaud et Marc Wary

Contexte de l'étude et objectifs

Alors que le remplacement de la plupart des réacteurs nucléaires est prévu aux alentours de 2010-2015 (durée maximale d'exploitation atteinte), les aciers de cuve représentent un enjeu important, car se pose aujourd'hui la question de l'augmentation de leur durée de vie ou leur remplacement par de nouveaux matériaux. De vastes programmes de recherche expérimentaux et numériques ont donc été lancés (en particulier par EDF et le CEA), afin d'analyser et de prédire le comportement et les mécanismes de rupture de l'acier 16MND5 (notamment à basses températures, caractéristiques d'un refroidissement brutal du réacteur ou de la perte de réfrigérant primaire, car sous l'effet de l'irradiation, sa courbe de résilience est décalée vers les hautes températures) : ces derniers dépendent en particulier de la distribution des contraintes par phase, car la ferrite et la cémentite - respectivement phase molle et phase dure - n'ayant pas les mêmes propriétés mécaniques, elles ne vont pas se comporter de la même façon.

Cela passe par une approche multi-échelles sur laquelle repose une meilleure identification de la microstructure et des sites d'amorçage des fissures, la détermination de contraintes critiques, et que ce soit dans la caractérisation expérimentale ou la modélisation. Grâce à des manipulations « in situ » novatrices, il a été possible d'identifier les mécanismes physiques d'endommagement de cet acier et de déterminer par DRX les états de contrainte dans la phase ferritique qui y sont associés ; la faible fraction volumique de cémentite (1 à 2%) rend en revanche impossible toute mesure directe dans cette phase (aucun pic « exploitable »). Il faut donc un flux de rayons X beaucoup plus important pour parvenir à exploiter les pics de diffraction associés à la cémentite : c'est pourquoi le seul outil, la seule technique qui permette d'envisager ce type d'essais est le rayonnement synchrotron. Son utilisation étant cependant « limitée », de nombreux modèles numériques très performants ont été développés, capables de reproduire correctement l'influence de la température constatée expérimentalement, et de prédire par conséquent le comportement de l'acier 16MND5.

Qu'ils soient de type Mori-Tanaka ou autocohérent, qu'ils prennent en compte la taille de grain ou utilisent le calcul par éléments finis, tous ces modèles prédisent que l'état de contrainte dans la cémentite à basse température peut atteindre des valeurs proches de 3500-4000MPa (figure 1), voire plus : ces valeurs peuvent se justifier assez facilement, puisqu'une simple loi des mélanges ($\sigma^I = f_{Fe} \cdot \sigma_{Fe}^I + f_{Fe_3C} \cdot \sigma_{Fe_3C}^I$) utilisée au cours du chargement permet d'envisager les mêmes niveaux de contrainte (fraction volumique de cémentite estimée entre 1 et 2%).

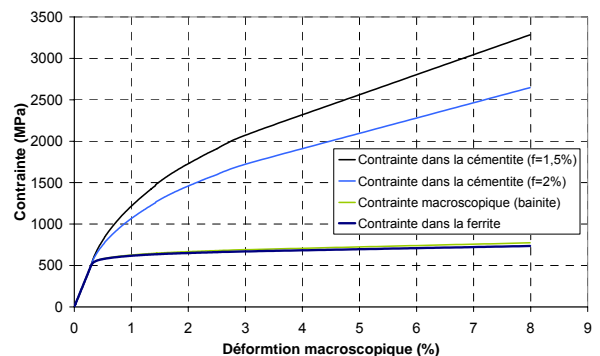


Figure 1 : estimation des états de contrainte dans l'acier 16MND5 (traction à -150°C) avec deux fractions volumiques de cémentite (1.5% et 2%)

Or, aujourd'hui beaucoup de personnes (dont nous faisons partie) se demandent s'il est réaliste de penser que cette phase peut effectivement supporter de tels chargements. C'est pourquoi nous avons essayé de « lever cette indétermination », pour valider définitivement les différents modèles développés, car la question de la distribution des contraintes est fondamentale : elle conditionne tout le comportement de cet acier et les « prédictions » qui en découlent (tenue en service des composants, durée de vie en fatigue, contrainte maximale ou à rupture...).

Résultats : estimation de la contrainte maximale dans la cémentite à basse température

L'objectif était donc de déterminer l'évolution de l'état de contrainte dans la cémentite au cours du chargement (contrainte interne à différents taux de déformation) à -150°C, grâce à la méthode des $\sin^2\psi$, ainsi que la contrainte maximale que peut supporter cette phase.

Des essais de traction in situ à -150°C ont pour cela été tentés à l'aide d'une petite machine de traction instrumentée en température (figure 2), mais nous nous sommes très vite trouvés confrontés à un problème technique majeur : la géométrie de la machine de traction (éprouvette plus basse que certaines parties de la machine) combinée aux mouvements du goniomètre présent sur BM32 ne permettaient pas

des analyses à des angles ψ suffisamment élevés et variés, d'autant plus que nous n'avions aucune idée de la présence éventuelle d'une texture dans la cémentite. Compte tenu de cette difficulté, nous avons décidé de modifier notre mode opératoire en travaillant ex situ (figure 2a) : plusieurs éprouvettes ont été chargées jusqu'à la contrainte maximale, puis la contrainte dans la cémentite a été déterminée après décharge, afin de conforter la validité de nos mesures (angles ψ compris entre 0° et 70° dans ce cas).

Nous nous sommes placés pour cela juste en dessous du seuil d'absorption du fer, à une énergie de 7keV. Après un balayage en 2θ , nous avons choisi de travailler sur les plans $\{211\}$ de la cémentite, car ils présentaient le meilleur compromis « pic de diffraction intense/temps d'acquisition raisonnable et angle 2θ le plus élevé possible » (figure 2b) ; nous avons également décidé d'acquérir systématiquement les pics $\{110\}$ de la ferrite (temps de comptage beaucoup plus faible), afin d'avoir une idée de l'état de contrainte dans cette phase et un point de comparaison avec les analyses in situ réalisées au préalable par « DRX conventionnelle » dans cette même phase.

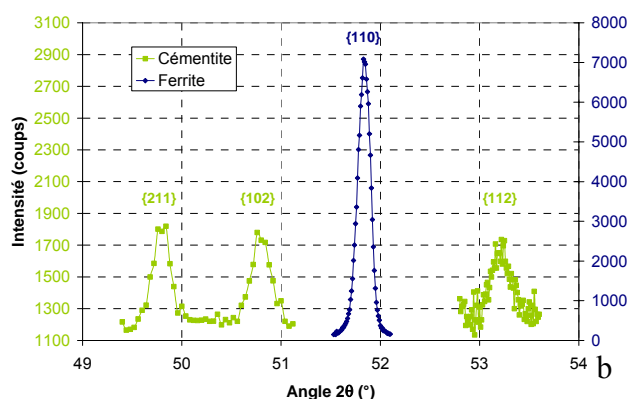
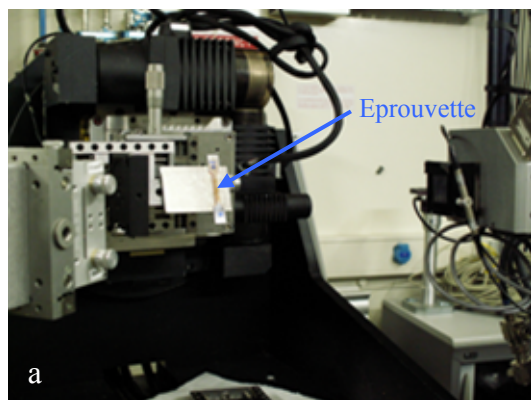


Figure 2 : a) Montage sur BM32 - b) Balayage en 2θ : pics de cémentite et de ferrite

Les analyses de contrainte ont donc été réalisées dans la ferrite et la cémentite après décharge (contrainte maximale, avant rupture), et les écarts de contrainte constatés entre ces deux phases et la contrainte macroscopique ont ensuite été reportés au dernier point de charge (figure 3).

Les résultats montrent que la contrainte dans la ferrite reste proche de la contrainte macroscopique, avec un écart qui ne dépasse pas 120MPa \pm 40MPa, ce qui est tout à fait comparable à ce qui a été déterminé auparavant par DRX. La cémentite, elle, est beaucoup plus chargée, puisqu'elle atteint des valeurs de contrainte proches de 2200MPa, avec une erreur estimée toutefois à \pm 300MPa : cette valeur de 2200MPa est bien plus faible que celle prédite par les différents modèles, qui l'estiment supérieure à 6000MPa si l'on considère une fraction volumique de cémentite de 1,2% (fraction volumique déterminée par diffraction en dispersion d'énergie ; une deuxième estimation par diffraction des neutrons est également en cours).

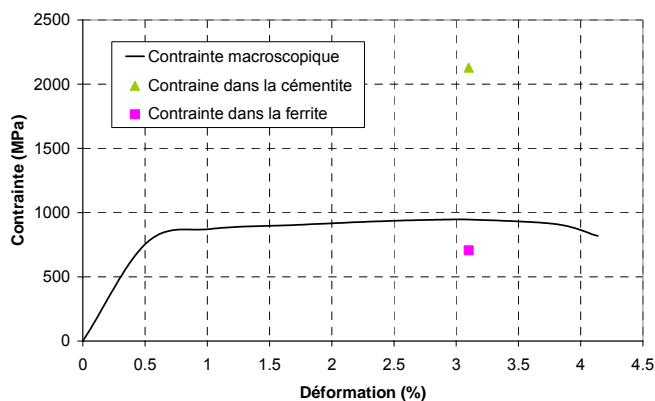


Figure 3 : distribution des états de contrainte par phase dans l'acier de cuve 16MND5 lors d'un essai de traction à -196°C

Perspectives : détermination in situ de l'état de contrainte dans la cémentite à -150°C

Ces expériences nous ont donc permis d'estimer la contrainte maximale que peut atteindre la cémentite au cours d'un chargement à -196°C ($\sigma_{Fe_3C} < 2500\text{MPa}$). Toutefois, l'objectif initial étant la détermination in situ de l'évolution de la contrainte dans la cémentite de l'acier de cuve 16MND5 à -150°C (premiers essais de traction in situ de leur genre), des analyses complémentaires vont être demandées par l'intermédiaire d'un nouveau proposal. Pour cela, nous envisageons d'installer un berceau d'Euler supplémentaire sur la ligne BM32 et nous allons construire une nouvelle petite machine de traction capable de solliciter les éprouvettes à sa surface (donc permettant des analyses de contrainte in situ « sans obstacle », à tous les angles ψ) : cette dernière spécificité étant visiblement très recherchée - notamment au sein de l'ESRF -, des discussions ont déjà eu lieu avec des responsables d'ID15, afin que sa réalisation se fasse conjointement.