

Mécanique de la rupture des alliages métalliques pour le transport de l'hydrogène

I. Moro⁽¹⁾; L. Briottet⁽¹⁾; E. Andrieu⁽²⁾; C. Blanc⁽²⁾; P. Lemoine⁽¹⁾

⁽¹⁾ CEA Grenoble – DRT/LITEN/DTH/LEV -17 Rue des Martyrs 38054 Grenoble Cedex 9

⁽²⁾ ENSIACET/CIRIMAT - 118 route de Narbonne 31077 Toulouse Cedex 4

*

A l'heure où le réchauffement climatique est un problème majeur la nécessité de développer des énergies propres s'impose. Dans cette optique l'hydrogène est un vecteur énergétique qui présente de nombreux intérêts. Présent en grande quantité sur la planète sa molécule est la plus énergétique (120MJ/kg) et sa combustion ne génère que de l'eau, ce qui en fait un combustible propre. Cependant son utilisation va nécessiter la mise en place de nombreuses infrastructures que ce soit pour assurer sa production, son stockage ou son transport. C'est sur cette dernière problématique que nous allons nous pencher.

Dans la perspective d'établir un réseau de distribution d'hydrogène à moindre coût, le transport par pipelines représente une solution particulièrement séduisante. La récente mise au point d'aciers à Haute Limite d'Elasticité (aciers HLE) permet de réaliser une importante économie de matériau lors de la fabrication des pipelines. Parmi les aciers HLE le X80 retient l'attention: déjà utilisé pour les pipelines de transport du gaz naturel, il est un candidat désigné pour le transport de l'hydrogène.

La composition chimique du X80 utilisé pour l'étude, de microstructure de type ferrito-perlitique, est résumée dans le tableau 1.

C	Mn	Si	Nb	V	Cu	P	S
0.075	1.86	0.35	0.05	<0.01	0.22	0.015	<0.003

Tableau 1: composition chimique de l'acier X80 (en % massique)

Cet acier répond aux caractéristiques requises pour les aciers API de grade X80: sa limite élastique est de 563 MPa (551 MPa requis), sa contrainte à rupture est de 697 MPa (620 MPa requis) et son allongement à rupture est de 24,8% (22% requis).

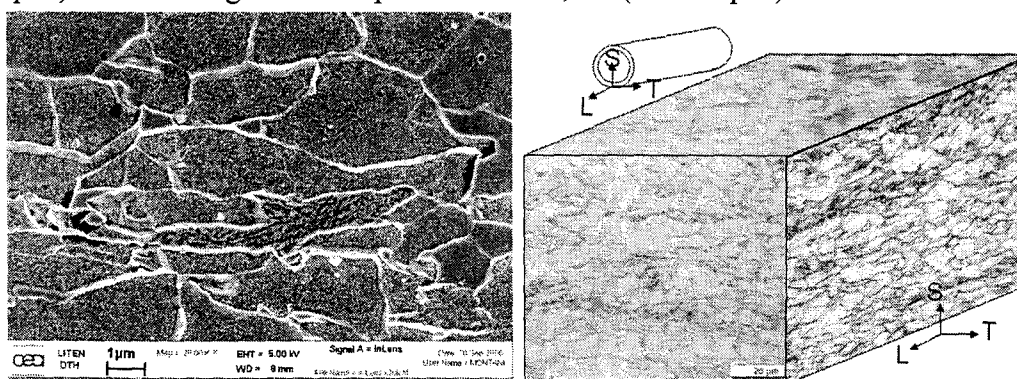


Figure 1: à gauche: microstructure du X80 observée au MEB FEG ; à droite: microscopie optique après polissage et attaque Nital à 4% du coeur de tôle

Il a été mis en évidence des changements microstructuraux importants dans l'épaisseur de la tôle: la microstructure est plus fine, et plus riche en perlite, en peau que à coeur. Parallèlement à cette évolution microstructurale un gradient de microdureté a été observé: la microdureté du matériau est plus forte en peau que en coeur de tôle.

L'utilisation de ce matériau pour la fabrication de pipelines dans une optique de transport de l'hydrogène nécessite au préalable sa qualification à la fragilisation par hydrogène

(FPH) en environnement hydrogène gazeux. La FPH, bien que connue et étudiée depuis de nombreuses années, reste d'actualité. Elle se traduit par une rupture prématurée de structure en contact avec l'hydrogène et est décrite, à température ambiante, par trois mécanismes principaux. Le premier est un mécanisme de décohésion du réseau cristallin, le second est un mécanisme d'interaction dislocation/hydrogène et enfin le dernier est un mécanisme de changement de phase dans le matériau (précipitation d'hydrures) [1,2].

L'objectif principal de ce travail est de développer un essai simple de mécanique de la rupture permettant de qualifier le matériau étudié en environnement hydrogène gazeux, de déterminer la sensibilité du matériau d'étude à la FPH, et de mieux comprendre les mécanismes de FPH associés aux matériaux ferritiques.

Pour se faire nous disposons de deux outils expérimentaux.

Le premier montage est une machine de traction couplée à un autoclave. Cet ensemble permet de réaliser des essais de traction et de CT en environnement hydrogène gazeux, sous pression (maximum 350 bars) et en température (maximum 350°C).

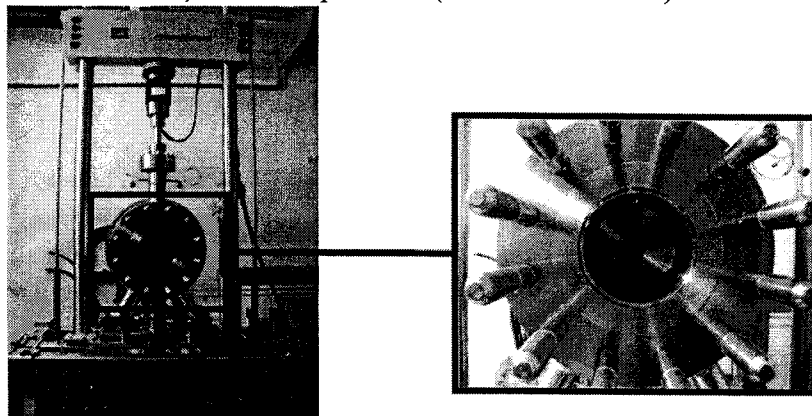


Figure 2: montage de l'essai de CT en autoclave

La ténacité du matériau en environnement hydrogène gazeux est ainsi déterminée. Des essais à différentes vitesses de déformation et de rupture différée devraient également nous permettre de mieux cerner les différents mécanismes de fragilisation mis en jeu. Cependant cet essai présente l'inconvénient majeur d'être très lourd à mettre en place. C'est pour cette raison qu'un deuxième montage a été installé.

Celui-ci permet de réaliser des essais de Rupture De Disques (RD²). Développé dans les années 1970 par J.P. Fidele il permet de déterminer aisément un indice de sensibilité à la FPH [3].

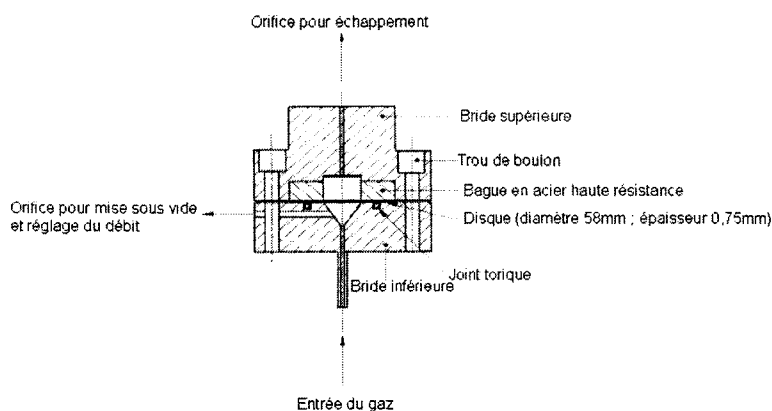


Figure 3: à droite la cellule de rupture de disque, à gauche le plan de coupe de la cellule

Le principe de cet essai est le suivant: une éprouvette montée en forme de disque est soumise à une pression de gaz croissante à vitesse constante jusqu'à éclatement ou fissuration du disque. La FPH est mise en évidence en comparant les pressions de rupture sous hydrogène et sous hélium (l'hélium étant considéré comme gaz de référence). Cet essai, bien que très empirique, a comme principal avantage de permettre aisément de qualifier un matériau à la FPH. Cependant il ne renseigne pas sur les caractéristiques matériau en présence d'hydrogène, au contraire de l'essai précédent.

C'est pourquoi, à l'aide d'outil numérique (CAST3M), nous cherchons d'une part à modifier l'essai RD² pour en faire un essai de mécanique de la rupture, et d'autre part à corréler les résultats des CT en environnement hydrogène gazeux avec ceux de l'essai modifié de RD². Une fois cette corrélation effectuée nous aurions alors accès à la ténacité du matériau par un essai aisé et rapide à mettre en oeuvre.

De plus l'implantation en cours d'un modèle de diffusion d'hydrogène dans le logiciel CAST3M nous permet d'étudier l'influence des sollicitations mécaniques sur la diffusion de l'hydrogène dans le matériau. Ainsi, par simulation des essais de CT ou de RD², les zones à forte concentration en hydrogène peuvent être identifiées.

Le second objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la microstructure de l'acier sur la localisation de l'hydrogène dans le matériau et sur la sensibilité à la FPH.

Il est en effet connu que la microstructure et les défauts microstructuraux (dislocations, lacunes, joint de grains, interfaces...) influencent fortement la diffusion et la localisation préférentielle de l'hydrogène; comme la sensibilité à la FPH du matériau. Ainsi le piégeage de l'hydrogène, notamment sur les dislocations, joue un rôle important dans les mécanismes d'endommagement du matériau [4].

Nous chercherons d'abord à identifier les sites de piégeage privilégiés sur le matériau non sollicité mécaniquement. Pour cela nous chercherons à mettre au point une méthode de chargement en hydrogène du matériau puis, par analyses GDMS et SIMS, à localiser les atomes d'hydrogène. La mise au point, le chargement en hydrogène et l'analyse d'éprouvettes sandwich faites d'alternance de couche de ferrite et de cémentite nous renseignera également sur la position de l'hydrogène dans les différentes phases et à l'interface ferrite/cémentite.

Puis nous effectuerons ces mêmes opérations sur des éprouvettes sollicitées mécaniquement. Nous comparerons les différents résultats afin d'étudier l'interaction entre les sollicitations mécaniques, la localisation et le piégeage de l'hydrogène.

Une fois ce bilan effectué nous tenterons d'établir un lien entre la localisation préférentielle de l'hydrogène et les résultats des essais de mécanique de la rupture en environnement hydrogène gazeux.

L'ensemble des résultats collectés devrait ainsi permettre une meilleure compréhension de la FPH et fournir des outils permettant la qualification de métaux en environnement hydrogène gazeux.

Références:

- [1]: "Fragilisation des aciers par l'hydrogène" - Techniques de l'ingénieur, Vol papier n°COR, Dossier M176 - A.M. Brass; J. Chêne ; L. Coudreuse
- [2]: "Mechanisms of hydrogen related fracture - A review" - European Federation of Corrosion Publications n°21, Second International Conference on Corrosion Deformation Interaction, à Nice en 1996- H.K. Birnbaum ; I.M. Robertson ; P. Sofronis ; D. Teter
- [3]: Norme AFNOR NF EN ISO 11114-4 - avril 2006
- [4]: "Hydrogen-enhanced localized plasticity - a mechanism for hydrogen related fracture" - Materials Science and Engineering A176 (1994) H.K. Birnbaum ; P. Sofronis