

Effet de l'hydrogène sur les métaux

La conférence Steely Hydrogen, organisée à Gand (Belgique), a réuni du 14 au 16 octobre dernier, la communauté académique et industrielle autour des interactions entre l'hydrogène et les matériaux métalliques.

Dans un contexte de montée en puissance des applications hydrogène, les travaux présentés apportent un éclairage structurant sur les mécanismes de fragilisation et les leviers de maîtrise associés.

La présente note propose une synthèse des contributions les plus significatives, en mettant en perspective les résultats expérimentaux et numériques afin d'identifier les tendances technologiques et les enjeux pour les applications industrielles.



SOMMAIRE

Résumé	2
Défis des aciers pour la transition énergétique	2
Modélisation et simulation	3
Méthodes avancées de caractérisation	5
Fragilisation par l'hydrogène - Applications	7
Interaction hydrogène-surface	8
Fragilisation par l'hydrogène des alliages de nickel	9
Fragilisation par l'hydrogène - Automobile & aciers inoxydables	10
Conclusion	11
Bibliographie	11

Résumé

Dans les infrastructures énergétiques et les systèmes de transport, l'hydrogène induit des phénomènes de fragilisation des matériaux métalliques qui constituent un verrou technologique majeur pour la transition énergétique.

Les aciers et alliages structuraux occupent à ce titre une place centrale dans les infrastructures hydrogène, qu'il s'agisse du transport, du stockage ou des applications énergétiques.

Les travaux présentés convergent vers plusieurs constats. D'une part, la vitesse de propagation des fissures de fatigue peut être multipliée par un facteur 5 à 20 sous hydrogène gazeux haute pression (≈ 210 bar) par rapport à l'air. D'autre part, la résistance des matériaux dépend fortement de la microstructure, de l'état de surface et des conditions d'exposition, ce qui complexifie la conception de solutions robustes. Les mécanismes de fragilisation (HELP, HEDE, quasi-clivage) apparaissent par ailleurs fortement dépendants de la microstructure et de l'historique thermomécanique.

Face à ces enjeux, plusieurs axes structurants se dégagent pour les acteurs industriels et académiques :

- cartographier les usages et les domaines de fonctionnement critiques selon les applications ;
- qualifier de nouvelles nuances d'aciers adaptées aux environnements hydrogène ;
- développer des outils de simulation multi-échelle pour prédire l'intégrité des structures, en particulier des soudures et des canalisations ;
- engager des démarches de conception et d'optimisation appuyées sur des données expérimentales robustes.

Défis des aciers pour la transition énergétique

Les travaux présentés portent sur le comportement des aciers de canalisation en hydrogène haute pression et confirment leur rôle clé dans la requalification des réseaux existants.

Hydrogen Assisted Fracture of Ferritic-based Steels and the Influence of Microstructure

J. Ronevich, C. San Marchi – Sandia National Laboratories, USA

Cette étude comparative porte sur des aciers ferritiques et martensitiques de canalisation d'âges variés, testés en ténacité et en propagation de fatigue sous 210 bar d'hydrogène gazeux. La vitesse de propagation de fissure de fatigue est accélérée d'un facteur 5 à 20 par rapport à l'air selon les nuances. Les aciers modernes présentent systématiquement une ténacité supérieure aux aciers anciens, et les aciers martensitiques revenus offrent le meilleur compromis entre résistance et ténacité sous hydrogène, en raison de leur microstructure uniforme, de leur faible teneur en perlite et de leurs inclusions de petite taille.

Dans les aciers medium strength, la teneur en soufre s'avère un paramètre déterminant : un taux élevé, caractéristique des aciers vintages, génère de gros précipités sulfurés conduisant à la nucléation et coalescence de vides, et donc à une réduction sensible de la ténacité. Pour les aciers à haute résistance (high strength), aucune corrélation directe avec la microstructure n'a pu être établie, suggérant l'intervention d'autres mécanismes.

Hydrogen Effects on Fracture Micromechanisms in Pipeline Steels and their Welds

M. Cauwels et al. – Ghent University, Belgique

Les auteurs ont étudié l'acier X70 GH2 sous chargement en hydrogène gazeux et électrochimique, en traction et en ténacité (éprouvettes SENT). Trois mécanismes coexistent sous hydrogène : quasi-clivage, délamination, et nucléation de vides, tous accentués par la présence d'hydrogène. La capacité d'adsorption du matériau est identifiée comme le meilleur indicateur de sensibilité à la FPH. Les défauts de type « open volume » liés au soufre constituent également de bons prédictors.

Un résultat notable concerne le rôle de la couche d'oxyde : en présence d'oxygène, le quasi-clivage disparaît, confirmant que la couche d'oxyde joue un rôle de barrière à l'adsorption d'hydrogène. Par ailleurs, le classement de

sensibilité entre matériaux est conservé entre les deux méthodes de chargement, suggérant la pertinence du chargement électrochimique comme méthode de comparaison.

Effect of Gaseous Hydrogen on Crack Extension in Pipeline Steels: Experiments and Simulation

J. Besson, D. Lopes Pinto, L. Santana, Y. Madi – MINES Paris / Transvalor, France

Cette contribution couple essais expérimentaux (à 100 et 200 bar) et simulation par éléments finis intégrant plasticité, endommagement (modèle GTN) et diffusion de l'hydrogène. Le modèle reproduit fidèlement les zones de fissuration observées sur éprouvettes SSRT, notamment la multi-fissuration sous hydrogène et la striction sous air. Un résultat pratique important : dès qu'il y a présence d'O₂ on augmente la ductilité (allongement à rupture) dès 50 ppm, ce qui ouvre une piste pour le contrôle de la composition des gaz en service.

Material Qualification for Underground Hydrogen Storage

L. Moli Sanchez – Institut de la Corrosion – Part of Rise, France

Les conditions de stockage en cavités salines (250 bar, cycles quotidiens ou hebdomadaires) imposent des contraintes spécifiques. Sur acier X65, la vapeur d'eau dégrade les propriétés de ténacité à 100 bar H₂, une observation cohérente avec les données de bibliographie qui montrent que l'H₂O peut également jouer un rôle inhibiteur sur la propagation de fatigue selon les conditions. En présence combinée d'H₂S et d'H₂O, la dégradation est encore plus marquée. Sur un acier martensitique, augmenter la teneur en H₂S de 6 à 30 ppm à pression d'hydrogène constante ne dégrade pas davantage les propriétés ; en revanche, augmenter la pression partielle d'hydrogène à teneur H₂S constante (6 ppm) aggrave la dégradation. Ces résultats suggèrent que la pression partielle d'hydrogène joue un rôle prépondérant, à teneur en H₂S donnée.

Pressurized Gaseous Hydrogen Permeation: Impact of Trace O₂ and H₂S Impurities

E. Trela-Baudot, D. Deschamps, J. Kittel, G.R. Joshi – IFP Energies Nouvelles / Institut de la Corrosion, France

Sur le même projet que la présentation précédente, cette étude expérimentale à 80 bar analyse l'effet de trois impuretés (H₂O, H₂S, O₂) sur la perméation de l'hydrogène dans des aciers de canalisation. Le H₂S réduit le flux en régime permanent; combiné à H₂O, l'effet inhibiteur est amplifié. L'O₂ a un effet négligeable sur les cinétiques d'adsorption.

Modélisation et simulation

La modélisation numérique s'impose comme un complément indispensable à l'expérimentation, face à la complexité des variables en jeu, diversité des matériaux, des pressions, des géométries de soudure et des défauts préexistants. Deux approches complémentaires ont retenu l'attention.

Under What Conditions Can We Safely Transport Hydrogen in Natural Gas Pipelines?

E. Martínez-Pañeda – University of Oxford, Royaume-Uni

Cette contribution propose une approche hybride combinant traitements thermiques sur aciers modèles et modélisation mécanique pour prédire l'intégrité des canalisations. Un modèle de déformation-diffusion-fracture basé sur le champ de phase est couplé à la simulation du procédé de soudage, permettant d'obtenir une bonne corrélation avec les données expérimentales de ténacité sur X60 et X80 à 100 bar. La distribution de la ténacité est prise en compte en fonction de la zone de la soudure, en corrélation avec la dureté.

Le résultat le plus opérationnel de cette étude est la confirmation que les défauts préexistants, porosités, manques de fusion, manques de pénétration, sont les facteurs les plus critiques pour l'intégrité des canalisations sous hydrogène. Un diagramme FAD a été établi pour les matériaux homogènes et hétérogènes. Les codes de calcul développés sont accessibles en open source.

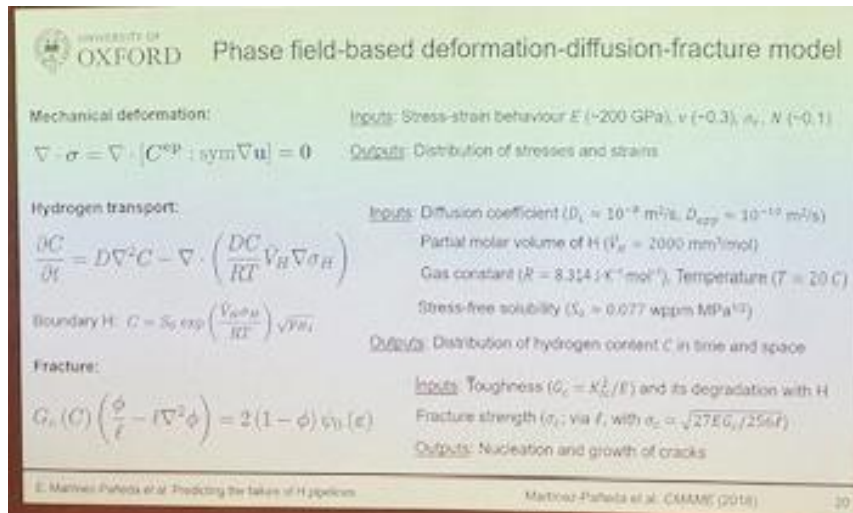


Figure 1 Modèle couplé déformation-diffusion-fracture basé sur le champ de phase

Computational Design of Hydrogen Embrittlement-Resistant Alloys

V. Razumovskiy et al. – Materials Center Leoben, Autriche

Cette équipe a développé une approche multi-échelle s'appuyant sur des calculs DFT pour évaluer les énergies de piégeage de l'hydrogène autour des précipités. Sur les aciers, les précipités de cuivre à grande interface peuvent réduire la concentration d'hydrogène piégé aux dislocations jusqu'à 14 %. Sur les alliages base Ni, l'effet de la déformation cohérente des interfaces γ'/γ'' sur l'absorption d'hydrogène et la fragilisation a été quantifié.

Pour l'analyse des spectres TDS, la méthode dite « empreinte » est présentée comme une alternative rigoureuse au modèle cinétique classique de Kissinger : elle ne suppose aucune hypothèse a priori sur le nombre de pièges et fournit le spectre complet des énergies de piégeage. Les différentes méthodes sont utilisées successivement pour alimenter chacun des modèles de simulation.

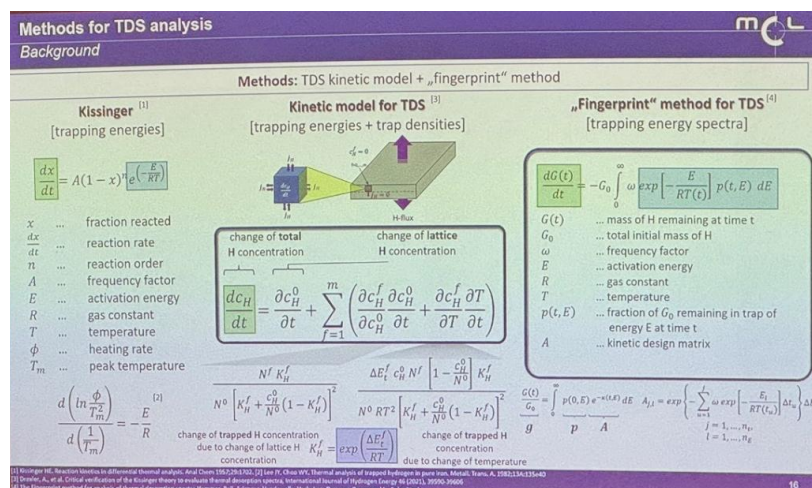


Figure 2 Modèle cinétique TDS + méthode « empreinte »

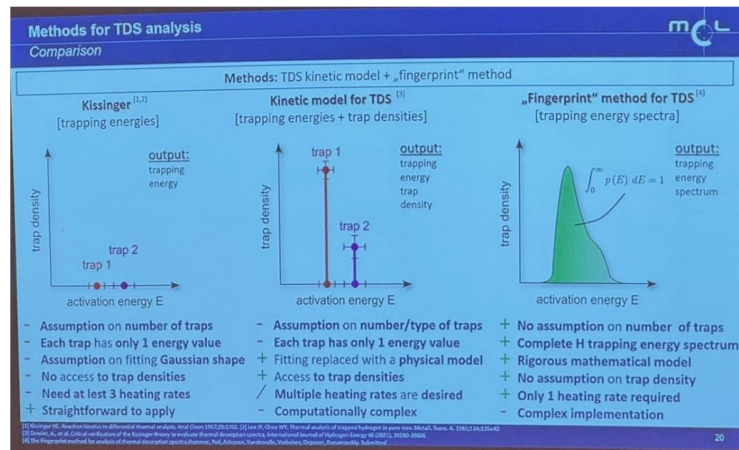


Figure 3 Comparaison et utilisation des méthodes successivement pour alimenter chacun des modèles

Méthodes avancées de caractérisation

Les méthodes de caractérisation à haute résolution permettent d'accéder aux mécanismes à l'échelle microscopique et d'alimenter les modèles de simulation. Trois contributions apportent des éclairages nouveaux sur les interactions hydrogène-microstructure.

Characterization of Hydrogen-Related Crack Propagation in High-Strength Martensitic Steel Using 3D Analysis and Finite Element Simulation

A. Shibata, I. Gutierrez-Urrutia et al. – NIMS Japon / MINES Paris-PSL, France

Cette étude combine caractérisation 3D (FIB+SEM+EBSD) et simulation par éléments finis avec un modèle de zone cohésive pour analyser la propagation de fissure sous hydrogène dans un acier martensitique. Un résultat contre-intuitif est mis en évidence : la rupture intergranulaire sous H_2 n'est pas une rupture purement instable, une étape de propagation stable existe, attribuée à une résistance intrinsèque à l'échelle microscopique. L'analyse 3D révèle que les ligaments non fissurés correspondent à des joints de grain de faible désorientation angulaire, qui agissent comme obstacles efficaces à la propagation intergranulaire.

La simulation par éléments finis confirme que l'énergie de cohésion est significativement réduite par de faibles quantités d'hydrogène (4 wt.ppm) et reste ensuite relativement constante, suggérant un seuil d'effet.

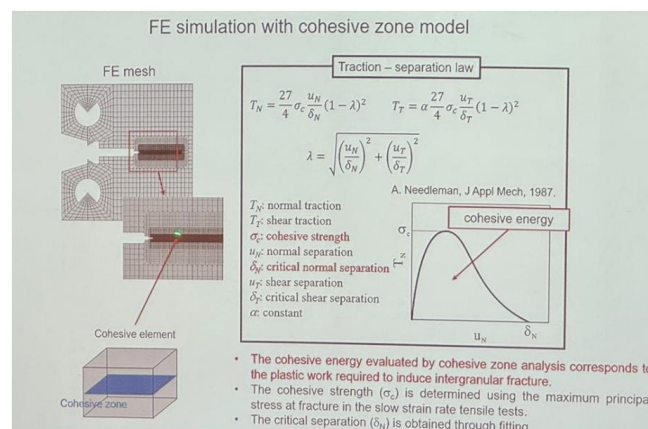


Figure 4 Simulation par EF avec un modèle de cohésion

Hydrogen Effects on Dislocation Motion Revealed by In-Situ Environmental TEM Tests

D. Xie – Xi'an Jiaotong University, Chine

Cette contribution apporte une démonstration directe des effets de l'hydrogène sur la mobilité des dislocations, via des essais in situ en MET environnemental à 20 et 1200 bar. Dans le fer, l'hydrogène facilite la nucléation de doubles décrochements et augmente la distance de glissement de 65 %, en accord avec la théorie HELP. Dans l'aluminium, le comportement est opposé : l'interaction hydrogène-lacune ancre les dislocations. Dans les deux cas, ces effets sont réversibles, bien que la cinétique de réversibilité soit lente.

Interstitial Solute Segregation at Interfaces in Martensitic Steels to Improve HE Resistance

G. Hachet, A. Tehranchi et al. – Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, Allemagne

Cette équipe du Max-Planck a étudié plusieurs stratégies d'atténuation de la FPH dans les aciers martensitiques. L'ajout de bore ségrège préférentiellement aux joints de grain de l'austénite antérieure (PAGB), améliorant la résistance à la FPH de manière d'autant plus marquée que le temps de chargement est long. Les calculs ab initio confirment la stabilité préférentielle du bore aux PAGB et fournissent un classement des éléments d'addition les plus efficaces : B, C, Nb et Mo arrivent en tête, suivis de Cr, Ta, W et Re.

La trempe à basse température (LTT) constitue une seconde stratégie : le carbone ségrège aux interfaces des lattes de martensite, bloquant l'adsorption d'hydrogène et améliorant la stabilité de l'austénite résiduelle, deux effets qui concourent à augmenter la résistance à la FPH.

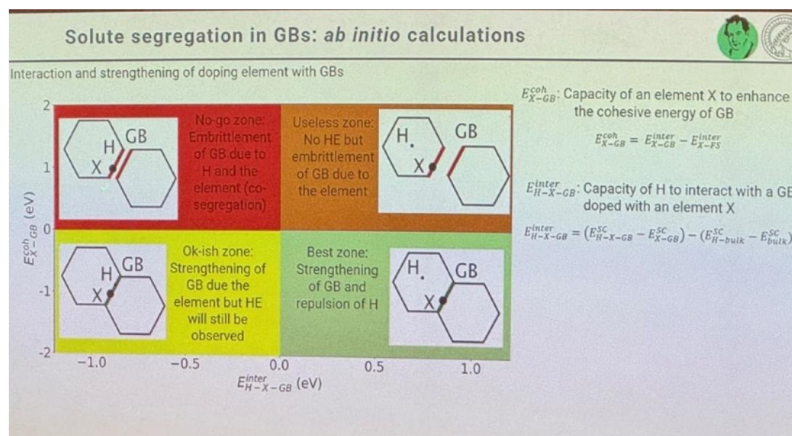


Figure 5 Calculs ab initio sur plusieurs éléments

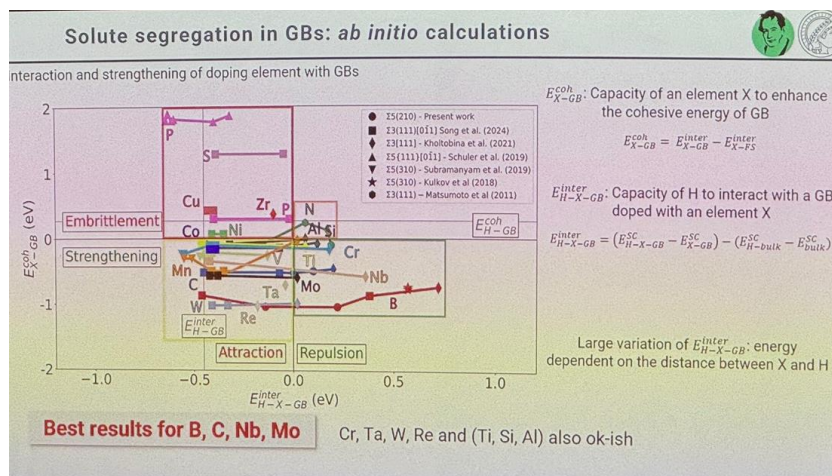


Figure 6 Cartographie issue de calculs ab initio illustrant l'effet des éléments d'alliage sur la cohésion des joints de grains et leur interaction avec l'hydrogène

Fragilisation par l'hydrogène - Applications

Cette section regroupe les travaux portant sur des applications sectorielles spécifiques : aérospatial, défense, automobile et industrie des aciers à haute résistance. Elle illustre la diversité des conditions d'exposition à l'hydrogène selon les secteurs.

Aéronautique et propulsion hydrogène

Materials Challenges for Hydrogen in Aerospace

L. Gale, N. Glover, A. Lambourne – Rolls-Royce Plc, Derby, Royaume-Uni

Rolls-Royce présente un panorama des enjeux matériaux pour l'utilisation de l'hydrogène comme carburant aéronautique, couvrant une plage de températures de 20 K à 1500 K. Les essais sur Inconel 625 à 70 bar révèlent une légère réduction de ductilité sans brasure et des fissures secondaires le long des bords usinés. En présence d'une brasure or-nickel, la résistance des joints n'est pas réduite sous H_2 , mais l'hydrogène peut provoquer une rupture sur l'alliage de base. Des essais complémentaires sont prévus, notamment en fatigue et à différentes températures.

Material Challenges for Hydrogen Propulsion Aircraft Engines: Focus on the Inconel 718 Alloy

T. Sanviemvongsak et al. – Safran Tech / CEA Liten / Safran Aero Boosters, France

Safran et le CEA ont cartographié trois domaines d'application de l'hydrogène pour la propulsion : distribution LH_2 (20-77 K), distribution GH_2 (120-400 K, 20-150 bar) et combustion H_2 (700-1500 K). Sur Inconel 718 testé à 60 et 150 bar au CEA Grenoble, une perte des propriétés de traction est observée dès 60 bar, sans aggravation supplémentaire à plus haute pression. L'analyse fractographique révèle une rupture intergranulaire fragile en surface sous H_2 , contre une rupture transgranulaire ductile sous air. À haute température, l'humidité augmente la volatilisation du chrome et sa consommation par oxydation cyclique, un effet à surveiller indépendamment de la FPH.

Aciers haute résistance : fixations et moteurs à combustion

Qualification of High-Strength Steels for High-Pressure Hydrogen Technologies / Improved HE Resistance for High-Strength Fastener Steels

A. Drexler – voestalpine Böhler Edelstahl ; M. Weyns et al. – Ghent University / voestalpine, Autriche/Belgique

Ces deux contributions abordent la sélection et l'optimisation des aciers pour des applications à haute pression d'hydrogène. Pour les moteurs à combustion (180 bar), les aciers austénitiques se révèlent les moins sensibles à la FPH ; parmi les martensitiques, la présence d'austénite résiduelle améliore les propriétés sous H_2 . Pour les aciers de fixation (nuance 32CrB4), l'ajout de Ti et V à hauteur de 1500 et 2000 ppm respectivement réduit la sensibilité à la FPH par piégeage aux carbures incohérents $TiC/(Ti,V)C$. Le RRA seul s'est avéré insuffisamment discriminant, en raison de la présence de nombreuses fissures secondaires avant striction, conduisant les auteurs à introduire un nouvel indice de FPH basé sur le niveau de déformation à l'apparition de la striction, qui confirme l'amélioration apportée par Ti et V.

L'addition de bore (0,0037 % en masse) réduit le coefficient de diffusion de l'hydrogène et abaisse la quantité absorbée de 17 à 4 ppm. La profondeur de rupture intergranulaire observée correspond précisément à la profondeur de pénétration calculée à partir des coefficients de diffusion mesurés par extraction par fusion, une cohérence remarquable entre approches expérimentales.

Interaction hydrogène-surface

L'entrée de l'hydrogène dans le métal est conditionnée par les phénomènes de surface. La couche d'oxyde, les impuretés gazeuses et les conditions électrochimiques jouent un rôle déterminant sur les cinétiques d'adsorption et d'absorption.

Unravelling Hydrogen Absorption in Metals to Predict Hydrogen Embrittlement

L.C. Malheiros – Imperial College London, Royaume-Uni

Cette contribution établit un modèle cinétique de l'adsorption de l'hydrogène sur nickel par polarisation cathodique, en s'appuyant sur XPS, ECMS et impédance EIS. La concentration en hydrogène adsorbé augmente avec le potentiel cathodique, mais ne peut être prédite par la seule méthode de l'overpotential : les phénomènes d'interface dynamiques introduisent une complexité irréductible. La comparabilité entre chargement électrochimique et gazeux reste un sujet de discussion.

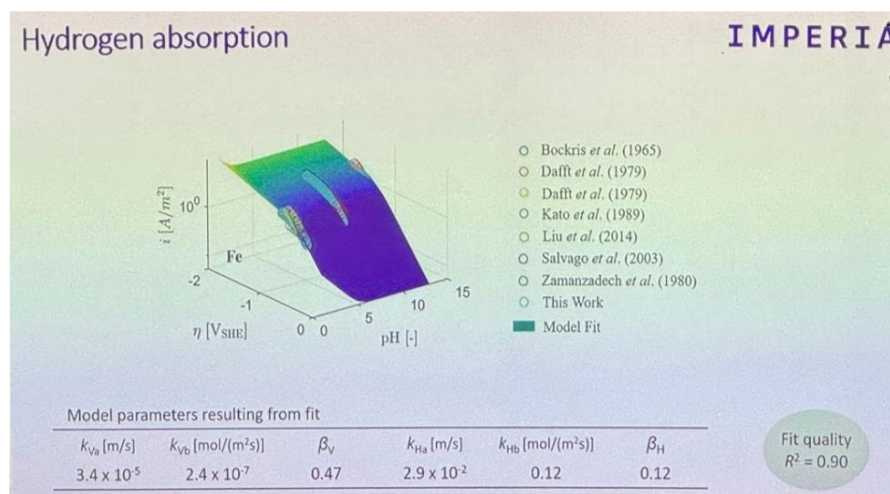


Figure 7 Cartographie de l'absorption de l'hydrogène dans le fer en fonction du pH et du potentiel

Estimation of the Rate-Limiting Step for Hydrogen Entry on Pipeline Across Their Oxide Layer

A. Akash, F. Martin et al. – CEA Paris-Saclay / CIRIMAT Toulouse / Mines Saint-Étienne, France

Sur un acier Cr-Mo avec une couche d'oxyde synthétique de 3,5 μm (élaborée à 400 °C, 330 h sous air), les auteurs ont utilisé TDS et SIMS pour identifier les étapes limitantes de l'entrée de l'hydrogène. La dissolution et la diffusion dans la couche de Fe_2O_3 (poreuse, en court-circuit) ne sont pas limitantes. En revanche, la diffusion dans la couche de Fe_3O_4 est inférieure à celle dans le métal de base et constitue l'étape limitante, de même que l'interface oxyde-métal. Les éléments Cr et Mo dans l'oxyde contribuent à ralentir davantage cette diffusion, une piste pour la conception de revêtements protecteurs.

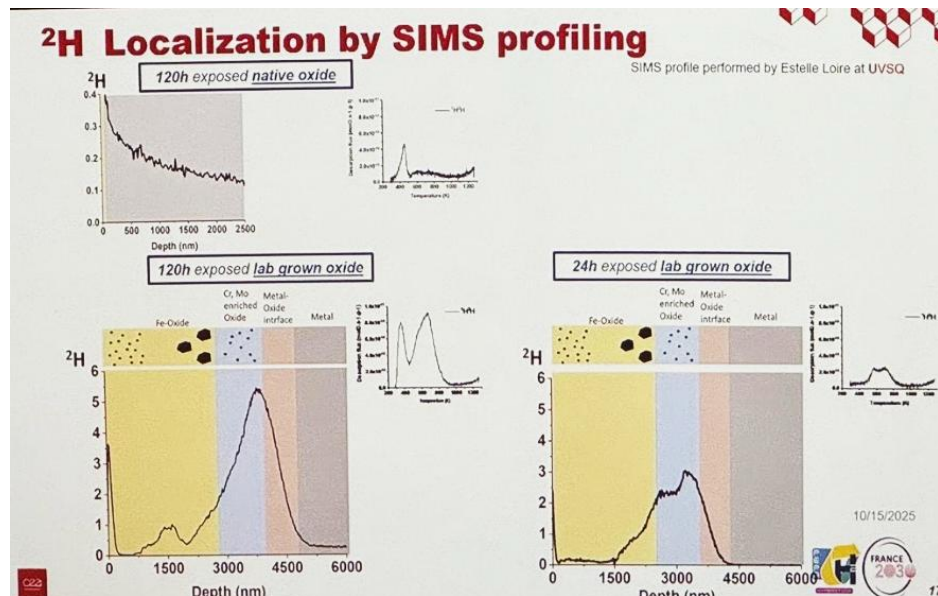


Figure 8 Profil SIMS du deutérium montrant une accumulation de l'hydrogène aux interfaces oxyde/métal, confirmant le rôle des couches d'oxyde dans le piégeage et la diffusion.

Fragilisation par l'hydrogène des alliages de nickel

Les alliages à base de nickel sont particulièrement concernés par la FPH dans les applications de stockage haute pression et de propulsion hydrogène. Les résultats présentés apportent des données quantitatives sur les effets de température, pression et fréquence.

Effects of Temperature, Pressure and Frequency on Low Cycle Fatigue of Alloy 718 under Gaseous Hydrogen

F. Ebling, K. Wackermann – Fraunhofer IWM, Allemagne

Des essais de fatigue oligocyclique (LCF) ont été réalisés sur Inconel 718 avec des éprouvettes creuses sous H_2 gazeux, en faisant varier la température (de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $600\text{ }^{\circ}\text{C}$), la pression (de 1 à 250 bar) et la fréquence de sollicitation. La réduction de durée de vie sous H_2 par rapport à l'azote est principalement observée entre $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'augmentation de pression réduit le nombre de cycles à rupture, et une fréquence plus basse étend la zone affectée par l'hydrogène sur le faciès de rupture - en cohérence avec une diffusion pilotant le mécanisme d'endommagement.

Comparative Study on Hydrogen-Induced Ductility Loss of Pure Nickel at Low to Room Temperatures

K. Hashiguchi et al. – Fukuoka University / NIMS / AIST, Japon

Cette étude compare les effets de la FPH sur du nickel pur selon trois modes d'essai : éprouvette conventionnelle préchargée, éprouvette conventionnelle in situ, et éprouvette creuse in situ. L'effet de la FPH est plus sévère en condition préchargée. À basse température, la réduction du coefficient de diffusion limite l'apport d'hydrogène dans la zone de fracture lors des essais in situ, conduisant à une perte de ductilité négligeable, contrairement aux éprouvettes préchargées où l'hydrogène est présent dans tout le volume avant l'essai. Ce résultat souligne l'importance du mode d'apport d'hydrogène dans l'interprétation des essais de sensibilité à la FPH.

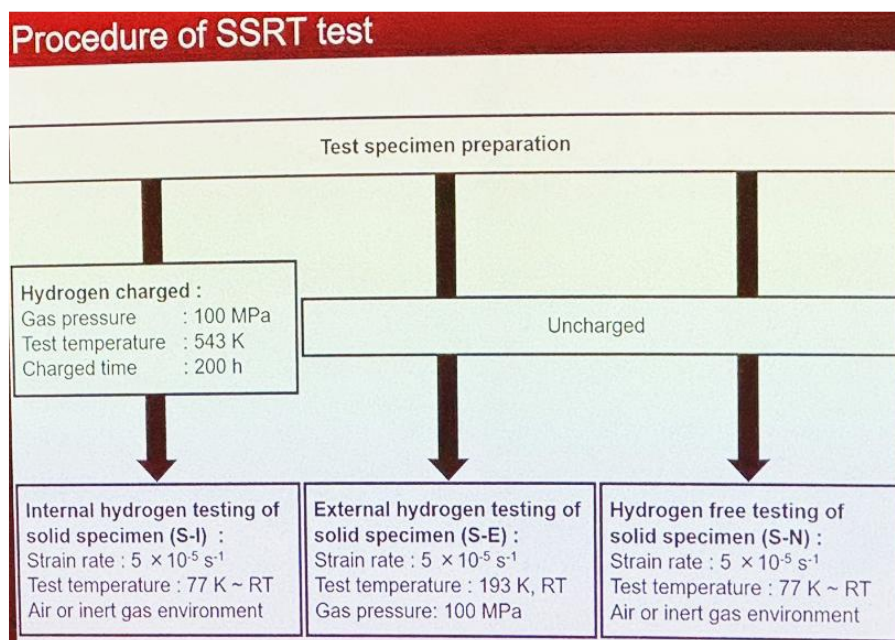


Figure 9 Schéma de la procédure d'essai SSRT comparant les conditions avec hydrogène interne, hydrogène externe et sans hydrogène.

Fragilisation par l'hydrogène - Automobile & aciers inoxydables

Les aciers pour l'industrie automobile (emboutissage à chaud, aciers DQ&P) et les aciers inoxydables (duplex, austénitiques) font l'objet de contributions ciblées sur leurs mécanismes spécifiques de fragilisation et les stratégies d'atténuation.

Aciers pour l'automobile

Impact of Surface Softening on Hydrogen Absorption and Delayed Fracture Resistance on AlSi-coated Press Hardening Steel

S. Cobo et al. – ArcelorMittal Global R&D, France

Sur l'acier USIBOR2000AS (Rm 2000 MPa, revêtement Al-Si), le rejet de carbone depuis le revêtement vers l'acier lors du stamping à chaud génère un pic de dureté en surface — identifié comme la zone critique pour l'amorçage de la FPH. Le mécanisme opérant est une interaction synergique HELP-HEDE avec rupture intergranulaire pilotée par le piégeage aux dislocations. Pour remédier à ce problème, ArcelorMittal a développé un traitement thermique sur mesure avec atmosphère contrôlée pendant l'aluminisation à chaud, permettant de maîtriser le profil de concentration en carbone sur 100 μm et d'assurer une surface moins dure. Les essais de flexion 4 points valident l'efficacité du traitement.

The Impact of Film-like Austenite and η -Carbides on Hydrogen Trapping and Diffusion in Medium-Carbon DQ&P Steels

R. Latypova et al. – University of Oulu / Ghent University

Cette étude sur aciers DQ&P à teneur en silicium variable montre que l'austénite résiduelle joue un rôle de barrière à la diffusion de l'hydrogène sans être un site de piégeage. Paradoxalement, un taux d'austénite résiduelle plus élevé favorise la percolation et réduit le temps de breakthrough de l'hydrogène. Les carbures η ajoutent des pièges faibles supplémentaires. La teneur en Si influence directement les cinétiques de diffusion : à haute teneur en Si, la diffusion est plus lente, et la concentration en hydrogène absorbé est plus faible.

Aciers inoxydables

Fracture Toughness Behaviour in 2205 Duplex Stainless Steel: Electrochemical versus Gaseous Methodology

V. Arniella et al. – Universidad de Burgos, Espagne

Des essais de ténacité par flexion 3 points ont été réalisés sur acier duplex 2205 sous air, H₂ gazeux (35 à 142 bar) et solution NaCl. À 142 bar, la propagation est instable et peu sensible à la vitesse de déplacement, le matériau est déjà fortement sollicité. Un résultat important pour la méthodologie des essais : à faible vitesse, la valeur de J obtenue en chargement aqueux est similaire à celle obtenue à 70 bar de GH₂ ; à forte vitesse, elle correspond à 140 bar. Les mécanismes de propagation semblent identiques quelle que soit la méthode de chargement, ce qui valide l'utilisation du chargement électrochimique comme méthode de screening.

Decoupling the Role of Dissolution and H-Embrittlement on the Stress Corrosion Cracking Behavior of 304L Austenitic Stainless Steel

J.T. Burns, S. Blust – University of Virginia, USA

Dans une application nucléaire (corrosion sous contrainte à température intermédiaire, CI-SCC), les auteurs ont développé une approche originale utilisant un poison à base d'arsenic pour contrôler indépendamment le taux d'hydrogène adsorbé et la dissolution anodique. La vitesse de propagation augmente avec le taux d'hydrogène adsorbé, et un 'puits d'immunité' caractéristique d'un mécanisme basé sur l'hydrogène est identifié pour les deux modes de polarisation. La conclusion est sans ambiguïté : la CI-SCC à température intermédiaire est gouvernée par le taux d'hydrogène adsorbé, et non par la dissolution anodique.

Conclusion

Dans un contexte de développement accéléré des infrastructures hydrogène, la conférence Steely Hydrogen 2025 confirme l'importance stratégique des travaux sur la fragilisation par l'hydrogène des matériaux métalliques. Plusieurs enseignements transversaux se dégagent de l'ensemble des contributions.

Sur le plan expérimental, la qualification des matériaux pour des applications hydrogène haute pression nécessite une ingénierie d'essais exigeante. Le choix de la méthode de chargement (gazeux vs électrochimique) influence les résultats, et la question de l'équivalence de fugacité entre les deux approches reste un sujet de débat actif. La couche d'oxyde, longtemps considérée comme un artefact de préparation, est désormais reconnue comme un paramètre à part entière dans les protocoles d'essai.

Sur le plan de la conception des matériaux, les progrès les plus marquants concernent l'ingénierie des joints de grain (addition de bore, ségrégation de carbures) et la maîtrise des microstructures de trempe. Les calculs ab initio fournissent désormais des cartes d'éléments d'addition permettant un criblage rapide des compositions prometteuses, avant validation expérimentale.

Sur le plan de la simulation, les modèles couplés diffusion-plasticité-endommagement atteignent un niveau de maturité suffisant pour aborder des géométries industrielles réalistes. La disponibilité en open source de certains codes accélère leur adoption par la communauté. Le défi reste la qualification de ces outils sur des cas industriels complexes, notamment les soudures présentant des défauts géométriques réels.

La réussite de la transition énergétique passera par une coopération renforcée entre donneurs d'ordre, fournisseurs et centres techniques, une capitalisation méthodique des données d'essai, et une veille active sur les alternatives matériaux là où les contraintes fonctionnelles (en particulier thermiques) le permettent.

Bibliographie

J. Ronevich, C. San Marchi. « Hydrogen Assisted Fracture of Ferritic-based Steels and the Influence of Microstructure ». Sandia National Laboratories, USA.

M. Cauwels et al.. « Hydrogen effects on fracture micromechanisms in pipeline steels and their welds ». Ghent University, Belgique.

J. Besson, D. Lopes Pinto, L. Santana, Y. Madi. « Effect of gaseous hydrogen on crack extension in pipeline steels: experiments and simulation ». MINES Paris / Transvalor, France.

L. Moli Sanchez. « Material qualification for underground hydrogen storage ». Institut de la Corrosion – Part of Rise, France.

E. Trela-Baudot et al.. « Pressurized gaseous hydrogen permeation experiments on pipeline steels: the impact of trace O₂ and H₂S impurities ». IFP Energies Nouvelles / Institut de la Corrosion, France.

- E. Martínez-Pañeda. « Under what conditions can we safely transport hydrogen in natural gas pipelines? ». University of Oxford, Royaume-Uni.
- V. Razumovskiy et al.. « Computational design of hydrogen embrittlement-resistant alloys ». Materials Center Leoben, Autriche.
- A. Shibata et al.. « Characterization of hydrogen-related crack propagation in high-strength martensitic steel using 3D analysis and FEM ». NIMS Japon / MINES Paris-PSL, France.
- G. Hachet et al.. « Interstitial solute segregation at interfaces in martensitic steels to improve the resistance against hydrogen embrittlement ». Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Allemagne.
- L. Gale, N. Glover, A. Lambourne. « Materials challenges for hydrogen in aerospace ». Rolls-Royce Plc, Royaume-Uni.
- T. Sanviemvongsak et al.. « Material challenges for hydrogen propulsion aircraft engines: focus on the Inconel 718 alloy ». Safran Tech / CEA Liten, France.
- A. Drexler. « Qualification of high-strength steels for high-pressure hydrogen technologies ». voestalpine Böhler Edelstahl, Autriche.
- M. Weyns et al.. « Improved hydrogen embrittlement resistance for high-strength fastener steels ». Ghent University / voestalpine, Belgique/Autriche.
- L.C. Malheiros. « Unravelling hydrogen absorption in metals to predict hydrogen embrittlement ». Imperial College London, Royaume-Uni.
- A. Akash et al.. « Estimation of the rate-limiting step for the hydrogen entry on pipeline across their oxide layer ». CEA Paris-Saclay / CIRIMAT / Mines Saint-Étienne, France.
- F. Ebling, K. Wackermann. « Effects of temperature, pressure and frequency on low cycle fatigue of Alloy 718 under gaseous hydrogen ». Fraunhofer IWM, Allemagne.
- K. Hashiguchi et al.. « Comparative study on hydrogen-induced ductility loss of pure nickel at low to room temperatures using various methods ». Fukuoka University / NIMS / AIST, Japon.
- R. Latypova et al.. « The impact of film-like austenite and η -carbides on hydrogen trapping and diffusion in medium-carbon DQ&P steels ». University of Oulu / Ghent University, Finlande/Belgique.
- S. Cobo et al.. « Impact of surface softening on hydrogen absorption behavior and delayed fracture resistance on AISi-coated press hardening steel ». ArcelorMittal Global R&D, France.
- V. Arniella et al.. « Fracture toughness behaviour in 2205 duplex stainless steel: electrochemical versus gaseous methodology ». Universidad de Burgos, Espagne.
- J.T. Burns, S. Blust. « Decoupling the role of dissolution and H-embrittlement on the stress corrosion cracking behavior of 304L austenitic stainless steel ». University of Virginia, USA.

Vérificateur	Approbateur



CONTACT
HASNA AMBARKI
Hasna.ambarki@
cetim.fr
06 44 39 64 22

Note de veille rédigée par Marie Lemaitre et Hasna Ambarki - Cetim

à noter : les entreprises citées dans ce document de veille le sont à titre illustratif (ce n'est en aucun cas un « publiereportage » ou un outil de promotion de telle ou telle entreprise ou solution de marché). De la même manière, nous ne cherchons pas l'exhaustivité des informations, mais plutôt à illustrer l'état de l'art et les tendances.

Malgré le soin apporté à la réalisation de cette note, certains liens hypertextes peuvent ne pas fonctionner correctement, notamment en raison de modifications des sites internet ciblés (ex : « page not found ») ou d'options de sécurité de certains viewer de PDF.



MÉCATHÈQUE

Trouvez toutes nos études en un seul clic!