

---

---

## Fixations — Principes de la fragilisation par l'hydrogène pour les fixations en acier

*Fasteners — Fundamentals of hydrogen embrittlement in steel  
fasteners*

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

[ISO/TR 20491:2019](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-93ba28e6d7bb/iso-tr-20491-2019)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-93ba28e6d7bb/iso-tr-20491-2019>



**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

[ISO/TR 20491:2019](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-93ba28e6d7bb/iso-tr-20491-2019)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-93ba28e6d7bb/iso-tr-20491-2019>



**DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT**

© ISO 2019

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office  
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8  
CH-1214 Vernier, Genève  
Tél.: +41 22 749 01 11  
Fax: +41 22 749 09 47  
E-mail: [copyright@iso.org](mailto:copyright@iso.org)  
Web: [www.iso.org](http://www.iso.org)

Publié en Suisse

## Sommaire

Page

<b>Avant-propos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>v</b>
<b>1</b> <b>Domaine d'application</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <b>Références normatives</b> .....	<b>1</b>
<b>3</b> <b>Termes et définitions</b> .....	<b>1</b>
<b>4</b> <b>Abréviations et symboles</b> .....	<b>4</b>
<b>5</b> <b>Description générale de la fragilisation par l'hydrogène</b> .....	<b>4</b>
<b>6</b> <b>Mécanisme d'endommagement par l'hydrogène</b> .....	<b>4</b>
<b>7</b> <b>Morphologie de la rupture</b> .....	<b>5</b>
<b>8</b> <b>Conditions à la pointe d'une fissure</b> .....	<b>7</b>
<b>9</b> <b>Conditions d'une rupture due à la fragilisation par l'hydrogène</b> .....	<b>7</b>
9.1   Cause première et facteurs déclencheurs pour une rupture due à la fragilisation par l'hydrogène.....	7
9.2   Susceptibilité du matériau.....	8
9.2.1   Généralités.....	8
9.2.2   Défauts et autres conditions engendrant une susceptibilité anormale du matériau.....	10
9.2.3   Méthodologie pour la mesure du seuil de contrainte à la FPH.....	11
9.3   Contrainte de traction.....	12
9.4   Hydrogène atomique.....	13
9.4.1   Sources d'hydrogène.....	13
9.4.2   Hydrogène interne.....	13
9.4.3   Hydrogène externe (environnemental).....	14
<b>10</b> <b>Fixations cémentées</b> .....	<b>14</b>
<b>11</b> <b>Galvanisation à chaud et effet de «sur-trempe»</b> .....	<b>16</b>
<b>12</b> <b>Relaxation des contraintes avant revêtement électrolytique</b> .....	<b>17</b>
<b>13</b> <b>Fixations à filetage roulé après traitement thermique</b> .....	<b>18</b>
<b>14</b> <b>Méthodes d'essai pour la fragilisation par l'hydrogène</b> .....	<b>18</b>
<b>15</b> <b>Dégazage</b> .....	<b>19</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>21</b>

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier, de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir [www.iso.org/directives](http://www.iso.org/directives)).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir [www.iso.org/brevets](http://www.iso.org/brevets)).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir [www.iso.org/avant-propos](http://www.iso.org/avant-propos).

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 2, *Fixations*, sous-comité SC 14, *Revêtements de surface*.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse [www.iso.org/fr/members.html](http://www.iso.org/fr/members.html).

## Introduction

Les fixations en acier à haute résistance pour applications mécaniques sont généralement caractérisées par une résistance à la traction ( $R_m$ ) supérieure à 1 000 MPa, elles sont souvent utilisées dans des applications critiques, telles que des ponts, des moteurs de véhicules, des avions, pour lesquelles la rupture d'une fixation peut avoir des conséquences catastrophiques. La prévention des ruptures et la gestion du risque de Fragilisation Par l'Hydrogène (FPH) sont des considérations fondamentales qui impliquent l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement des fixations, notamment l'aciériste, le fabricant des fixations, l'applicateur du revêtement, l'ingénieur d'application, le concepteur d'assemblages, et tout autre intervenant jusqu'à l'utilisateur final.

La fragilisation par l'hydrogène est étudiée depuis des décennies, mais la nature complexe des phénomènes de fragilisation par l'hydrogène et les nombreuses variables ne permettent pas de prévoir la survenue de ruptures de fixations. Des recherches sont généralement menées dans des conditions simplifiées et/ou idéalisées qui ne peuvent pas être réellement traduites comme *savoir-faire* à prescrire dans les spécifications et normes de fixations, et les pratiques industrielles.

Ces circonstances sont de plus compliquées par des spécifications ou normes qui sont parfois insuffisantes et parfois inutilement alarmistes. Les incohérences, voire les contradictions, dans les normes de fixations pour l'industrie ont conduit à une grande confusion et à un certain nombre de ruptures de fixations qui auraient pu être évitées. Le fait que la FPH soit très souvent considérée à tort comme étant la *cause principale* d'une rupture, contrairement à ce qu'elle est à savoir un *mécanisme* de défaillance, reflète bien cette confusion.

## iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

[ISO/TR 20491:2019](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-93ba28e6d7bb/iso-tr-20491-2019)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-93ba28e6d7bb/iso-tr-20491-2019>

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

[ISO/TR 20491:2019](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-93ba28e6d7bb/iso-tr-20491-2019)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-93ba28e6d7bb/iso-tr-20491-2019>

# Fixations — Principes de la fragilisation par l'hydrogène pour les fixations en acier

## 1 Domaine d'application

Le présent document présente les connaissances les plus récentes relatives à la fragilisation par l'hydrogène sous forme de *know-how*, transcrite d'une façon complète, facilement accessible et directement applicable aux fixations en acier.

## 2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

## 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

— ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

— IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>

### 3.1

#### **dureté**

résistance d'un métal à une déformation plastique, habituellement par indentation ou pénétration d'un objet solide (en surface ou à cœur)

### 3.2

#### **écrouissage**

augmentation de la résistance mécanique et de la *dureté* (3.1) lorsqu'un métal est déformé plastiquement à température ambiante (par laminage, tréfilage, étirage, rétreint, frappe, extrusion, etc.) qui induit également une diminution de la ductilité

### 3.3

#### **traitement thermique**

cycle d'opérations (chauffage, maintien en température puis refroidissement contrôlés) appliqué à un métal ou alliage à l'état solide, afin d'obtenir une transformation maîtrisée et homogène de la structure du matériau et/ou de lui conférer des propriétés physiques ou mécaniques particulières

Note 1 à l'article: Les procédés de trempe et revenu, recuit, cémentation et relaxation des contraintes sont des exemples de traitement thermique pour les fixations.

### 3.4

#### **trempe et revenu**

QT (Quenching and Tempering)

procédé de *traitement thermique* (3.3) de trempe, comprenant une austénitisation puis un refroidissement rapide réalisé dans des conditions telles que l'austénite se transforme plus ou moins complètement en martensite (et éventuellement en bainite), suivi d'une nouvelle chauffe à une température spécifique et sur une période de temps contrôlées puis d'un refroidissement, afin d'obtenir le niveau requis de caractéristiques mécaniques ou physiques

### 3.5 cémentation

procédé de traitement thermochimique d'enrichissement en carbone ou de carbonitruration suivi d'une trempe, provoquant une augmentation de la *dureté* (3.1) de la surface de l'acier des fixations

Note 1 à l'article: Ce procédé est utilisé pour les vis à tôle, les vis autoformeuses, autoperceuses, etc.

### 3.6 relaxation des contraintes

procédé de *traitement thermique* (3.3) où les fixations sont chauffées à une température prédéfinie et maîtrisée suivi d'un refroidissement lent, afin de diminuer les contraintes résiduelles dues à l'*écrouissage* (3.2)

### 3.7 dégazage

procédé de chauffage des fixations pendant une durée déterminée à une température donnée, de façon à minimiser le risque de *fragilisation par l'hydrogène interne* (3.15)

[SOURCE: ISO 1891-2:2014, 3.4.11]

### 3.8 amorce de rupture

début de fissuration avant *rupture* (3.10) sans séparation complète

[SOURCE: ASTM F2078-15, modifiée — en anglais, "line" a été remplacé par "beginning"]

### 3.9 défaillance

perte de la capacité d'une fixation à remplir une fonction spécifiée, qui dans certains cas peut aller jusqu'à la *rupture* (3.10) complète

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

### 3.10 rupture

casse survenant lorsque la déformation plastique dans une fixation augmente localement au-delà de sa limite de résistance, provoquant la séparation de la fixation en un ou plusieurs morceaux, lors d'un essai ou en service

ISO/TR 20491:2019  
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-93ba28e6d7bb/iso-tr-20491-2019>

### 3.11 faciès de rupture

structure et aspect de la surface fracturée

### 3.12 ductile

caractérisé par une déformation plastique importante avant *rupture* (3.10) qui induit une surface de rupture irrégulière avec une morphologie en cupule d'aspect fibreux, habituellement terne ou mat

### 3.13 fragile

caractérisé par le peu d'aptitude à une déformation plastique ou l'absence de déformation plastique avant *rupture* (3.10) qui induit une surface de rupture plane avec une morphologie de décohésion intergranulaire, d'aspect habituellement brillant

Note 1 à l'article: Pour une rupture fragile le long des plans de clivage, le terme rupture transgranulaire est utilisé.

Note 2 à l'article: Pour une rupture fragile avec séparation aux joints de grains d'austénite, le terme rupture intergranulaire est utilisé.

**3.14****fragilisation par l'hydrogène**

FPH

perte irréversible de ductilité d'un métal ou d'un alliage provoquée par l'hydrogène atomique, sous l'effet de contraintes de traction dues à une charge ou à des contraintes résiduelles, qui peut conduire à une *rupture (3.10) fragile (3.13)* après un certain temps<sup>[1]</sup>

Note 1 à l'article: Dans le contexte de la description de la fragilisation par l'hydrogène des fixations en acier à haute résistance, le terme «hydrogène» fait référence à l'hydrogène atomique et non au gaz moléculaire H<sub>2</sub>.

[SOURCE: ISO 1891-2:2014, 3.4.9, modifiée – La note 1 à l'article a été ajoutée]

**3.15****fragilisation par l'hydrogène interne**

IHE (Internal Hydrogen Embrittlement)

fragilisation provoquée par de l'hydrogène résiduel issu des procédés de fabrication, entraînant une rupture fragile différée sous l'effet de contraintes de traction dues à une charge ou à des contraintes résiduelles

[SOURCE: ISO 1891-2:2014, 3.4.10]

**3.16****fragilisation par l'hydrogène externe (environnemental)**

EHE (Environmental Hydrogen Embrittlement)

fragilisation provoquée par les atomes d'hydrogène absorbés provenant de l'environnement d'utilisation, entraînant une rupture fragile différée des fixations sous l'effet de contraintes de traction (contraintes induites par une charge ou contraintes résiduelles)

[SOURCE: ISO 1891-2:2014, 3.4.13, modifiée — "(environnemental)" a été ajouté conformément à la norme de vocabulaire en vigueur]

[ISO/TR 20491:2019](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-10220201-2019)

**3.17**

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a4417c16-9ce5-4800-983b-10220201-2019>

**seuil de contrainte à la fragilisation par l'hydrogène**

contrainte critique en dessous de laquelle la *fragilisation par l'hydrogène (3.14)* ne se produit pas, et représentant le degré de susceptibilité d'un acier par rapport à une quantité d'hydrogène disponible

**3.18****corrosion sous contrainte**

SCC (Stress Corrosion Cracking)

catégorie de *fragilisation par l'hydrogène externe (environnemental) (3.16)* pour laquelle la *défaillance (3.9)* se produit en service par fissuration, sous l'action combinée de l'hydrogène issu de la corrosion et de l'effet des contraintes de traction

[SOURCE: ISO 1891-2:2014, 3.4.14]

**3.19****diffusion de l'hydrogène**

propagation de l'hydrogène et interaction avec les défauts de la microstructure de l'acier (lacunes, dislocations, précipités, inclusions, joints de grains, etc.) qui constituent des sites de piégeage dans le matériau de la fixation: *pièges dits irréversibles* (caractérisés par leur forte énergie de piégeage et une faible probabilité d'effusion de l'hydrogène) et *pièges dits réversibles* (caractérisés par leur faible énergie de piégeage et une effusion de l'hydrogène plus facile)

**3.20****effusion de l'hydrogène**

migration de l'hydrogène du cœur du matériau vers l'extérieur de la fixation, se produisant de façon naturelle à température ambiante du fait d'un gradient de concentration, ou sous l'action d'un effet thermique [par exemple *dégazage (3.7)*]

## 4 Abréviations et symboles

EHE	fragilisation par l'hydrogène environnental (Environmental Hydrogen Embrittlement)
HAC	fissuration assistée par l'hydrogène (Hydrogen Assisted Cracking)
FPH	Fragilisation Par l'Hydrogène
HELP	plasticité locale augmentée par l'hydrogène (Hydrogen Enhanced Local Plasticity)
HIC	fissuration induite par l'hydrogène (Hydrogen Induced Cracking)
IHE	fragilisation par l'hydrogène interne (Internal Hydrogen Embrittlement)
SCC	corrosion fissurante sous contrainte (Stress Corrosion Cracking)

## 5 Description générale de la fragilisation par l'hydrogène

En général, la fragilisation par l'hydrogène est subdivisée en deux grandes catégories en fonction de la source d'hydrogène: la fragilisation par l'hydrogène interne (IHE) et la fragilisation par l'hydrogène externe (EHE). L'IHE est causée par de l'hydrogène résiduel provenant de la fabrication de l'acier et/ou d'étapes de fabrication, telles que le décapage chimique et le revêtement électrolytique. L'EHE est causée par de l'hydrogène s'introduisant dans le métal à partir de sources externes (environnementales) alors qu'il est sous contrainte, ce qui est le cas par exemple pour une fixation en service.

Le terme corrosion fissurante sous contrainte (SCC) est couramment utilisé par rapport à l'EHE qui survient lorsque l'hydrogène est un sous-produit résultant de la corrosion de surface absorbé par la fixation en acier. L'absorption d'hydrogène cathodique est une forme de SCC. L'absorption d'hydrogène cathodique se produit en présence de revêtements métalliques, tels que le zinc ou le cadmium, qui de par leurs propriétés sacrificielles sont conçus pour se corroder afin de protéger la fixation en acier de la rouille. Si l'acier sous-jacent est exposé, le processus de réduction se produisant à la surface de l'acier exposé entraîne simultanément un dégagement d'hydrogène dans des quantités qui sont significativement plus élevées que dans le cas d'un acier non revêtu.

Les termes «défragilisation» et «refragilisation» sont également utilisés dans le domaine aéronautique mais sont incorrects car la fragilisation est irréversible. La défragilisation est un contresens pour décrire l'effet du dégazage, et la refragilisation est un contresens pour décrire l'effet de l'absorption d'hydrogène en service ou par l'utilisation de liquides nettoyant pour la maintenance.

## 6 Mécanisme d'endommagement par l'hydrogène

L'acier à haute résistance est généralement défini comme ayant une résistance à la traction ( $R_m$ ) supérieure à 1 000 MPa. Lorsqu'un acier à haute résistance est soumis à des contraintes de traction, comme c'est le cas avec une fixation à haute résistance sous charge de traction après serrage, la contrainte provoque la diffusion (c'est-à-dire la migration) de l'hydrogène atomique à l'intérieur de l'acier vers l'emplacement de la *plus forte contrainte* (par exemple au niveau du premier filet en prise ou du rayon de raccordement sous tête de vis). Comme des concentrations de plus en plus importantes d'hydrogène s'accumulent à cet endroit, l'acier qui est normalement ductile devient progressivement fragile. Finalement, la concentration de contraintes et d'hydrogène en une même zone génère une microfissure (fragile) assistée par l'hydrogène. La microfissure fragile continue à se développer au fur et à mesure que l'hydrogène progresse en suivant la pointe de la fissure, jusqu'à ce que la charge de rupture de la fixation soit dépassée et qu'elle finisse par se rompre. Ce phénomène est souvent appelé Fissuration assistée par l'hydrogène (HAC) ou Fissuration induite par l'hydrogène (HIC). Le mécanisme d'endommagement par l'hydrogène, tel que décrit, provoque la rupture de la fixation à des valeurs de contrainte qui sont significativement inférieures à la résistance d'origine de la fixation, telle que déterminée au moyen d'un essai de traction normalisé[1][2].

Des modèles théoriques qui décrivent les mécanismes d'endommagement par l'hydrogène dans des conditions idéalisées sont proposés depuis les années 1960[2]. Dans le cas d'aciers à haute résistance, ces modèles sont principalement basés sur deux théories complémentaires, de *décohésion*[3] et de *plasticité locale augmentée par l'hydrogène (HELP)*[4][5][6]. Étant donné la complexité des phénomènes de FPH, les modèles d'endommagement par l'hydrogène continuent d'évoluer et d'être affinés[7]. Une analyse approfondie des théories d'endommagement par l'hydrogène est hors domaine d'application du présent Rapport technique. Cependant, des informations détaillées sont données dans les références listées en Bibliographie.

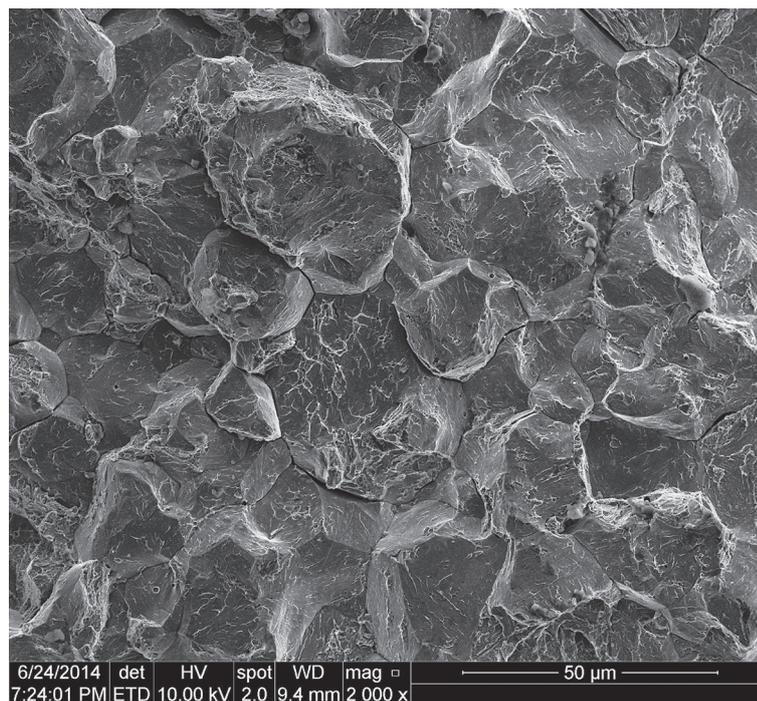
Les «pièges» à hydrogène se réfèrent à des défauts métallurgiques dans la microstructure de l'acier, tels que des joints de grains, des dislocations, des précipités, des inclusions, etc., auxquels des atomes d'hydrogène peuvent se fixer[8]. L'hydrogène ainsi «piégé» n'est plus libre de diffuser (c'est-à-dire de migrer) vers des zones de fortes contraintes où il peut participer au mécanisme de la HAC. Les pièges sont généralement classés comme *réversibles* ou *irréversibles*, en fonction de leurs énergies de liaison. Les pièges réversibles sont caractérisés par de faibles énergies de liaison: en d'autres termes, l'hydrogène se libère plus facilement du piège. Les pièges irréversibles sont caractérisés par de fortes énergies de liaison: en d'autres termes, l'hydrogène requiert beaucoup d'énergie (par exemple sous l'effet d'une montée en température ou de champ de contraintes) pour se libérer du piège. L'hydrogène qui n'est pas piégé est libre de se déplacer dans le réseau cristallin du métal, il est appelé hydrogène *mobile*; il est également dénommé hydrogène *interstitiel* ou *diffusible*[9][10][11].

## 7 Morphologie de la rupture

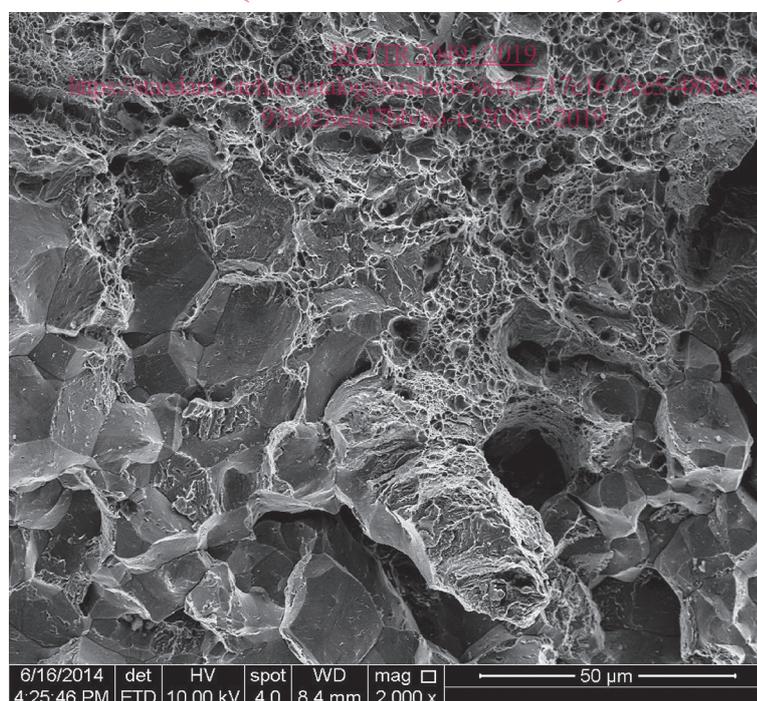
Avec des fixations en acier à haute résistance trempées et revenues, le faciès de rupture résultant d'une fissuration assistée par l'hydrogène (HAC) est typiquement caractérisé par une morphologie *intergranulaire fragile*, qui est causée par la ligne de propagation de la fissure qui suit les joints de grains (Figure 1). La morphologie d'un faciès de rupture varie en fonction de la susceptibilité du matériau et du degré de fragilisation. Les facettes clairement définies des grains (c'est-à-dire profils nets et anguleux) et/ou une forte proportion d'éléments fragiles par rapport à ceux de nature ductile sont révélatrices d'un haut niveau de fragilisation[12]. La Figure 1 illustre un faciès de rupture qui est intergranulaire à 100 %, avec des facettes de grains bien visibles. Les matériaux moins susceptibles peuvent présenter un faciès de rupture qui contient des morphologies mixtes intergranulaire et selon les plans de clivage (c'est-à-dire transcristalline).

Avec une fixation sollicitée en traction, une fissuration fragilisante sous l'effet de l'hydrogène se développe typiquement jusqu'à un point où la section transversale de de la fixation se réduit et ne peut plus supporter la charge appliquée. À ce stade, la fixation se rompt rapidement (c'est-à-dire *rupture brutale*). Un faciès de rupture normal correspondant à une rupture brutale est ductile, caractérisé par la présence de *cupules ductiles*. La Figure 2 illustre un faciès de rupture où la propagation de la fissure fragile assistée par l'hydrogène s'est arrêtée (c'est-à-dire à la pointe de la fissure finale) avant que la rupture brutale ductile finale de la fixation ne se produise.

D'autres formes de rupture par fragilisation peuvent résulter de phénomènes non liés à la présence d'hydrogène, comme la fragilité de revenu, la fragilité de trempe, les tapures de trempe, etc., et doivent être distinguées des ruptures dues à la fragilisation par l'hydrogène. Ces autres types de fragilisation peuvent présenter des faciès de rupture intergranulaires similaires, mais se distinguent principalement de la fragilisation par l'hydrogène par le fait qu'ils *ne sont pas fonction du temps*.



**Figure 1 — Faciès de rupture présentant clairement une morphologie intergranulaire fragile à 100 % — Acier allié Cr-Mo (AISI 4135), trempé et revenu à 530 HV, avec revêtement électrolytique de zinc**  
 (standards.iteh.ai)



**Figure 2 — Faciès de rupture présentant à la fois une morphologie intergranulaire fragile résultant d'une HAC et une morphologie en cupules ductile, indicatrice de la rupture finale — Acier allié Cr-Mo (AISI 4135) à 530 HV, avec revêtement électrolytique de zinc**