

---

---

**Résilience des chaînes à maillons en  
acier rond — Essai sur des éprouvettes  
sous-dimensionnées**

*Toughness of round steel link chains — Test with sub-size specimens*

iTeh Standards  
(<https://standards.iteh.ai>)  
Document Preview

[ISO/TR 21704:2017](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/e1b74031-114d-4783-9a3c-b832f9d53d36/iso-tr-21704-2017)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/e1b74031-114d-4783-9a3c-b832f9d53d36/iso-tr-21704-2017>



iTeh Standards  
(<https://standards.iteh.ai>)  
Document Preview

ISO/TR 21704:2017

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/e1b74031-114d-4783-9a3c-b832f9d53d36/iso-tr-21704-2017>



**DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT**

© ISO 2017, Publié en Suisse

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, 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, l'affichage sur l'internet ou sur un Intranet, sans autorisation écrite préalable. Les demandes d'autorisation peuvent être adressées à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office  
Ch. de Blandonnet 8 • CP 401  
CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland  
Tel. +41 22 749 01 11  
Fax +41 22 749 09 47  
[copyright@iso.org](mailto:copyright@iso.org)  
[www.iso.org](http://www.iso.org)

# Sommaire

Page

<b>Avant-propos</b>	<b>iv</b>
<b>Introduction</b>	<b>v</b>
<b>1 Domaine d'application</b>	<b>1</b>
<b>2 Références normatives</b>	<b>1</b>
<b>3 Termes et définitions</b>	<b>1</b>
<b>4 Abréviations</b>	<b>1</b>
<b>5 Objectif ciblé</b>	<b>2</b>
<b>6 Fabricants de chaînes</b>	<b>2</b>
<b>7 Aciers de chaîne soumis à l'essai</b>	<b>2</b>
<b>8 Équipement, géométrie et échantillonnage des éprouvettes</b>	<b>3</b>
<b>9 Résultats</b>	<b>4</b>
9.1 Énergie de choc sur entaille en fonction de la température des aciers soumis à l'essai	4
9.2 Comparaison des résultats des essais et de l'équipement d'essai du fabricant 1 et du fabricant 2	5
9.3 Conversion des valeurs caractéristiques déterminées pour les éprouvettes entaillées sous-dimensionnées	5
9.4 Validation de la conversion	5
9.5 Dispersion des valeurs de l'énergie de choc sur entaille déterminées avec des éprouvettes sous-dimensionnées	6
9.6 Température de transition de rupture fragile	6
<b>10 Extension des éprouvettes</b>	<b>7</b>
10.1 Soudage au laser	7
10.2 Soudage par friction	8
10.3 Extension d'éprouvettes entaillées super sous-dimensionnées	8
<b>11 Déduction des critères de résilience pour des valeurs caractéristiques déterminées avec des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées</b>	<b>8</b>
<b>12 Valeurs caractéristiques des chaînes à maillons en acier rond des fabricants M3 et M4</b>	<b>9</b>
12.1 Fabricant M3	9
12.2 Fabricant M4	10
<b>13 Valeurs caractéristiques des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées, de la température et de l'énergie de choc sur entaille</b>	<b>10</b>
<b>14 Exigences en matière de valeurs caractéristiques de la résilience des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées et super sous-dimensionnées</b>	<b>11</b>
<b>15 État de la normalisation internationale</b>	<b>12</b>
<b>Annexe A (informative) Figures</b>	<b>13</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>54</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 appelée 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 le lien suivant: [www.iso.org/iso/fr/avant-propos.html](http://www.iso.org/iso/fr/avant-propos.html).

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 111, *Chaînes à maillons en acier rond, élingues à chaînes, composants et accessoires*, Sous-comité SC 1, *Chaînes et élingues à chaînes*.

## Introduction

Le présent document fournit les résultats d'essais de résilience des chaînes en acier rond.

Les effets fondamentaux des chaînes en acier rond sur la capacité portante ont été examinés dans le cadre d'un programme initial d'étude. Ces essais, qui ont examiné la résistance et la résilience des matériaux ainsi que les températures, ont été réalisés sur des chaînes 16 x 48 ainsi que sur des éprouvettes prélevées sur elles. Afin de déterminer la résilience des chaînes sous-dimensionnées à maillons en acier rond, les essais exigés ont été conduits sur des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées, prélevées sur des brins de chaîne non soudés.

La sécurité des chaînes à maillons en acier rond a été examinée en détail du point de vue de la charge portante et de la température de transition ductile-fragile, voir la [Figure A.1](#). Les températures et les valeurs minimales de l'énergie de choc sur entaille ont été déterminées à l'aide de méthodes de mécanique de rupture dans le but de garantir à une chaîne endommagée une capacité portante suffisante à la température de service. Ces essais et leurs résultats sont documentés dans l'ISO/TR 23602.

iTeh Standards  
(<https://standards.iteh.ai>)  
Document Preview

[ISO/TR 21704:2017](#)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/e1b74031-114d-4783-9a3c-b832f9d53d36/iso-tr-21704-2017>



# Résilience des chaînes à maillons en acier rond — Essai sur des éprouvettes sous-dimensionnées

## 1 Domaine d'application

Le présent document décrit les investigations et les résultats d'investigation sur la résilience des chaînes à maillons en acier rond soumises à l'essai avec des éprouvettes sous-dimensionnées.

Il s'applique aux chaînes à maillons en acier rond pour palans à chaîne manuels de classes TH et VH et aux chaînes d'élingage utilisées dans les élingues en chaînes de classe 8.

NOTE 1 Les Normes internationales associées sont l'ISO 16877, l'ISO 16872 et l'ISO 3076. Il est prévu d'intégrer par la suite les résultats de résilience décrits dans le présent document aux nouvelles normes publiées.

Onze aciers fournis par quatre fabricants ont été soumis à l'essai afin de définir un régime d'essai pour les éprouvettes sous-dimensionnées et les exigences relatives aux valeurs de la résilience au choc sur entaille à la température de service qui ont découlé de ces essais. Ces exigences ont été ajustées aux valeurs de résilience des éprouvettes ISO-V en grandeur réelle.

NOTE 2 Les exigences sont également valables pour des maillons de section autre que ronde.

## 2 Références normatives

Aucune référence normative n'est donnée dans le présent document.

## 3 Termes et définitions

Il n'est pas fourni de termes et définitions dans le présent document.

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

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

## 4 Abréviations

(Bb) <sub>full</sub>	largeur x hauteur du ligament des éprouvettes ISO-V en grandeur réelle
(Bb) <sub>sub</sub>	largeur x hauteur du ligament des éprouvettes sous-dimensionnées
C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub>	coefficients de corrélation de la section transversale des éprouvettes sous-dimensionnées et des éprouvettes en grandeur réelle
DBTT <sub>full-size</sub>	température de transition ductile-fragile calculée pour des éprouvettes ISO-V en grandeur réelle
DBTT <sub>sub-size</sub>	température de transition ductile-fragile soumise à l'essai avec des éprouvettes sous-dimensionnées
E <sub>D</sub>	énergie nominale à la température de service (énergie nominale de choc sur entaille à la température de service)
E <sub>full</sub>	énergie calculée pour des éprouvettes ISO-V en grandeur réelle
E <sub>i</sub>	énergie au moment d'atteindre la valeur maximale de la force au cours de l'essai instrumenté de choc sur entaille

$E_{i\text{sub}}$	Ei pour les éprouvettes sous-dimensionnées
$E_p$	composante de l'énergie après dépassement de la valeur maximale de la force au cours de l'essai instrumenté de choc sur entaille
$E_{p\text{sub}}$	$E_p$ pour les éprouvettes sous-dimensionnées
$E_{\text{tot}}$	énergie totale: $E_i + E_p$
FATT	température de transition de rupture apparente; température à laquelle la NCA de 50 % se produit
NCA	aire non cristalline du faciès de rupture: composante de rupture ductile du faciès de rupture
SUS	éprouvette entaillée sous-dimensionnée
SSUS	éprouvette entaillée super sous-dimensionnée
$T_D$	température de service
$T_{\text{NDT}}$	température de transition à ductilité nulle: température de transition de rupture fragile, valeur de référence à partir des essais Pellini, dans l'essai instrumenté de choc sur entaille déterminée avec la force d'arrêt de fissure (voir l'ISO/TR 23602)
$T_{1/2}(\text{USE})$	température à $1/2$ (USE): température à la moitié de l'énergie du palier ductile de choc sur entaille
USE	énergie du palier ductile: énergie du palier supérieur de l'essai de choc sur entaille
$\alpha$	pente de la courbe de régression pour le calcul de $\text{DBTT}_{\text{full-size}}$
$\beta$	décalage calculé des températures associées aux valeurs de l'énergie, des éprouvettes sous-dimensionnées aux éprouvettes en grandeur réelle (°C)

## 5 Objectif ciblé

Les valeurs caractéristiques de la résilience déterminées avec des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées sont très petites en valeur absolue (<5 J) et ne diffèrent que faiblement les unes des autres. Il fallait par conséquent déduire des valeurs caractéristiques déterminées pour les éprouvettes sous-dimensionnées, une fonction de transition pour les éprouvettes ISO-V en grandeur réelle. L'objectif a ainsi été de traduire en valeurs caractéristiques pour les éprouvettes sous-dimensionnées les exigences de résilience obtenues pour les éprouvettes ISO-V standard dans l'ISO/TR 23602 à la température d'application admissible la plus basse possible des chaînes correspondantes. Il n'existe pas d'autre manière d'atteindre l'objectif d'évaluer la sécurité de la chaîne à l'aide des valeurs caractéristiques d'éprouvettes sous-dimensionnées.

## 6 Fabricants de chaînes

Quatre fabricants de chaînes ont pris part à ces essais concernant la résilience des chaînes à maillons en acier rond. Les résultats obtenus de trois de ces fabricants ont été intégrés dans le présent rapport. Les participants étaient les suivants:

Fabricant 1:	Symbole R
Fabricant 2:	Symbole K
Fabricant 3:	Symbole M3
Fabricant 4:	Symbole M4

## 7 Aciers de chaîne soumis à l'essai

Les différents aciers de chaîne suivants ont été fournis par les fabricants pour inclusion dans les essais de résilience.



T (R)	Acier allié NiCrMo avec un palier d'énergie ductile très élevé et une température de transition de rupture fragile très basse, chaînes à maillons en acier rond de classe 8
TH (R)	Acier manganèse-boron (MnB), chaînes à maillons en acier rond de classe 8
VH (R)	Acier MnB, matériau modèle, seuil plancher du palier USE et température de transition de rupture fragile élevée, chaînes à maillons en acier rond de classe 10
TH (K)	Acier MnB, chaînes à maillons en acier rond standard de classe 8
VH (K)	Acier MnB, chaînes à maillons en acier rond standard de classe 10
V* (R)	Chaîne en acier allié NiCrMo avec une excellente résilience à basse température, chaînes à maillons en acier rond en matériau présentant une résistance ultime à la traction supérieure à 1 500 MPa

Les aciers de chaîne employés par le fabricant M3 comprennent:

Classe 8      Acier allié NiCrMo

Classe 10     Acier allié NiCrMo

Les aciers de chaîne employés par le fabricant M4 comprennent:

Classe 8      Acier allié MnB et NiCrMo

Grade 10     Acier allié NiCrMo

Les chaînes et les aciers de chaîne T (R), TH (R), VH (R) ont déjà participé aux essais mécaniques de rupture de l'ISO/TR 23602.

Ces aciers présentent un large éventail de résiliences avec différentes résistances de matériaux, notamment dans la zone de transition des courbes d'énergie de choc sur entaille en fonction de la température.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/e1b74031-114d-4783-9a3c-b832b9d53d36/iso-tr-21704-2017>

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/e1b74031-114d-4783-9a3c-b832b9d53d36/iso-tr-21704-2017>

## 8 Équipement, géométrie et échantillonnage des éprouvettes

Les éprouvettes entaillées standard (ISO-V) ont été soumises à l'essai sur un mouton-pendule avec une énergie maximale de chute de 300 J, voir la [Figure A.2](#). La panne du marteau est munie d'une jauge de contrainte qui permet de déterminer la courbe de la force en fonction du temps, voir la [Figure A.3](#). Par intégration, on obtient la courbe force en fonction du déplacement dont l'intégrale est l'énergie de rupture (énergie de choc sur entaille) correspondant à l'éprouvette soumise à l'essai. Les résultats de l'essai (valeurs de l'énergie de choc sur entaille) ont été directement lus sur le manomètre à aiguille suiveuse du mouton-pendule et ont par ailleurs été calculés à partir de l'énergie de choc sur entaille de la courbe de la force en fonction du déplacement. L'amplificateur de mesure et l'intégralité du système de journalisation des données pour l'enregistrement de la force en fonction du temps ont été étalonnés avant chaque série d'essais.

Un mouton-pendule développant une énergie maximale de 15 J a servi aux essais de l'éprouvette entaillée sous-dimensionnée, voir la [Figure A.4a](#)). Ici également, la panne du marteau était instrumentée avec des jauges de contrainte, voir les [Figures A.4b](#)) et [A.4e](#)). La [Figure A.4c](#)) présente l'appui du mouton-pendule. L'amplificateur et l'intégralité du système de journalisation des données ont été étalonnés avant chaque série d'essais, voir la [Figure A.4d](#)). Deux valeurs de l'énergie ont également été déterminées pendant les essais sur ce mouton-pendule, l'une par lecture sur le manomètre à aiguille suiveuse et l'autre calculée à partir de la courbe de la force en fonction du déplacement.

Les éprouvettes étaient soit chauffées, soit refroidies dans de l'azote liquide pour obtenir les différentes températures d'épreuve. Le contrôle de la température d'épreuve exigée était assuré par des thermocouples.

Une autre solution pour la détermination de l'énergie de choc sur entaille des éprouvettes sous-dimensionnée est l'utilisation de l'essai de chute par masse tombante, voir la [Figure A.5](#). Ici encore, le système de mesurage et l'amplificateur ont été étalonnés avant chaque série d'essais. Cette méthode d'essai ne permet pas de lire l'énergie du choc sur un manomètre à aiguille suiveuse. Seule la valeur calculée par intégration peut être utilisée.

Les résultats des deux méthodes d'essai sur éprouvettes sous-dimensionnées présentent une bonne correspondance, voir les [Figures A.12 à A.14](#) et [9.2](#). À cet effet, les essais ont été menés avec le mouton-pendule (R) et la tour de chute (K).

Les éprouvettes entaillées ont été prélevées sur des brins non soudés de chaînes à maillons en acier rond. L'emplacement de l'éprouvette dans un brin de chaîne de dimension 16 x 48 et les dimensions de l'éprouvette conformément à l'ISO 148-1 pour les éprouvettes ISO-V standard sont décrits à la [Figure A.6](#). La [Figure A.7](#) présente de même l'éprouvette entaillée sous-dimensionnée conformément à l'ISO 14556. La largeur du ligament de l'éprouvette ISO-V est de 8 mm, celle de l'éprouvette sous-dimensionnée de 3 mm seulement. Les aires des ligaments sont ainsi de 80 mm<sup>2</sup> et 9 mm<sup>2</sup> respectivement.

L'aire réduite de ce ligament conduit à des valeurs d'énergie de rupture extrêmement faibles pour l'éprouvette sous-dimensionnée. La largeur de 3 mm seulement génère un état de contrainte plane au niveau de l'extrémité entaillée de l'éprouvette sous-dimensionnée alors que les conditions d'un état de déformation plane sont essentiellement atteintes sous charge de flexion au niveau de l'extrémité entaillée de l'éprouvette ISO-V. La [Figure A.8](#) montre les courbes de l'énergie de choc sur entaille en fonction de la température pour des éprouvettes ISO-V standard et des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées. Les valeurs inférieures de l'énergie de rupture des éprouvettes sous-dimensionnées – taille du ligament – et le décalage de la température de transition de rupture fragile  $\Delta T$  par rapport aux températures inférieures sont caractéristiques. Cela résulte essentiellement de l'état de contrainte.

Les photos de la [Figure A.9](#) permettent de comparer les différentes éprouvettes soumises à l'essai: une éprouvette entaillée super sous-dimensionnée, une éprouvette entaillée sous-dimensionnée et une éprouvette ISO-V standard. L'éprouvette entaillée super sous-dimensionnée est décrite en [10.3](#).

## 9 Résultats

### 9.1 Énergie de choc sur entaille en fonction de la température des aciers soumis à l'essai

Toutes les courbes de l'énergie de choc sur entaille en fonction de la température déterminées par le fabricant 1 (R) sont présentées à la [Figure A.10](#). Elles montrent le large éventail de résiliences des aciers soumis à l'essai. Le VH (R) est un matériau modèle avec une résilience extrêmement faible qui permet l'étude du comportement en limite basse. L'énergie du palier ductile est de 60 J et la température de transition à ductilité nulle ( $T_{NDT}$ ) est de 30 °C. Les matériaux TH (K), TH (R) et VH (K) sont des aciers de chaîne type. Les chaînes à maillons en acier rond fabriquées dans ces aciers répondent aux exigences de l'ISO 16872 et de l'ISO 16877. L'acier T (R) montre une courbe d'énergie de choc sur entaille en fonction de la température dans le haut de la classe T avec une température de transition de rupture fragile de -30 °C. V\* (R) est un acier de résilience extrême à basse température ( $T_{NDT} = -75$  °C) avec une résistance à la traction supérieure à 1 500 MPa.

Les énergies de palier ductile des aciers soumis à l'essai sont comprises entre 60 J et 110 J pour des températures de transition de rupture fragile entre -75 °C et +30 °C.

Les courbes d'énergie de choc sur entaille en fonction de la température déterminées avec les éprouvettes entaillées sous-dimensionnées présentent les mêmes caractéristiques et classent les aciers dans le même ordre, voir la [Figure A.11](#). Les températures de transition ductile-fragile sont, comme cela était prévisible, décalées vers les valeurs inférieures tandis que les énergies de palier ductile atteignent ici des valeurs comprises entre 4 J et 5,5 J.

## 9.2 Comparaison des résultats des essais et de l'équipement d'essai du fabricant 1 et du fabricant 2

Les aciers de chaîne TH (K) et TH (R) ont été soumis à l'essai par le fabricant 1 sur des éprouvettes ISO-V standard. L'énergie du palier ductile est la même pour ces deux aciers bien que la température de transition de rupture fragile du TH (K) soit inférieure de 10 K à 15 K, voir la [Figure A.12](#). La correspondance entre les deux aciers pendant les essais avec éprouvettes entaillées sous-dimensionnées est excellente, voir la [Figure A.13](#). L'acier TH (K) a été soumis à l'essai de chute par masse tombante par le fabricant 2 et l'acier TH (R) par le fabricant 1 avec le mouton-pendule.

De plus, les éprouvettes sous-dimensionnées prélevées sur les aciers TH (R) et TH (K) ont été échangées, ce qui a permis de mener un essai croisé sur les éprouvettes soumises à l'essai de chute par masse tombante et celles placées dans le mouton-pendule. Les résultats ne présentent qu'une dispersion mineure, voir la [Figure A.14](#), ce qui valide la comparabilité des deux méthodes d'essai. Les conditions indispensables à cette comparabilité sont la préparation d'éprouvettes conformément à l'ISO 14556, la compatibilité des machines d'essai avec les normes et un étalonnage compétent des dispositifs de mesurage ainsi qu'une détermination précise des températures d'épreuve.

## 9.3 Conversion des valeurs caractéristiques déterminées pour les éprouvettes entaillées sous-dimensionnées

L'énergie déterminée à l'aide des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées est très faible et il a été décidé de chercher à convertir, par le calcul, ces valeurs en valeurs déjà obtenues pour les éprouvettes ISO-V standard. Tout repose sur les diagrammes des forces en fonction du déplacement déterminés par les essais instrumentés de choc sur entaille et de chute par masse tombante. Les courbes d'énergie de choc sur entaille en fonction de la température établies avec des éprouvettes ISO-V standard (CV) et des éprouvettes sous-dimensionnées (SUS) sont représentées avec la même échelle d'énergie de choc sur entaille à la [Figure A.15](#). Les écarts importants de l'énergie de choc sur entaille sont ici clairement visibles en raison des différences de ligaments.

Une division de l'aire sous la courbe de la force en fonction du déplacement dans une composante de l'énergie avant d'atteindre la force maximale ( $E_i$ ) et d'une composante de l'énergie après dépassement de la force maximale ( $E_p$ ), voir la [Figure A.15](#), permet de déterminer les énergies partielles qui, après combinaison linéaire avec C1 et C2, voir la [Figure A.17](#), donnent l'énergie de choc sur entaille convertie KV. La conversion de toutes les énergies de choc sur entaille des éprouvettes sous-dimensionnées soumises à l'essai à différentes températures donne la conversion de température de choc sur entaille pour les éprouvettes sous-dimensionnées, voir la [Figure A.15](#). La comparaison avec la courbe CV des éprouvettes ISO-V explique le décalage de température  $\Delta T$  vers des températures inférieures de la courbe déterminée avec les éprouvettes sous-dimensionnées. Cela peut être une conséquence de l'état de contrainte plane de l'éprouvette sous-dimensionnée. La compensation du décalage de température à la [Figure A.16](#) a été obtenue à l'aide de la valeur calculée  $\beta$ , voir la [Figure A.17](#). Cela montre la correspondance théorique entre les variations de CV et de la courbe de conversion des éprouvettes sous-dimensionnées.

Trois différentes méthodes de conversion de l'énergie et de calcul du décalage de température sont présentées à la [Figure A.17](#).

## 9.4 Validation de la conversion

La conversion, décalage de température inclus, des courbes d'énergie de choc sur entaille en fonction de la température des éprouvettes sous-dimensionnées aux éprouvettes ISO-V standard à partir des formules décrites en 9.3 pour les aciers T (R), TH (R) et VH (R) selon les différentes méthodes est récapitulée dans les [Figures A.18 à A.22](#). Les matériaux TH et VH sont présentés avec et sans décalage de température, le matériau T (R) est présenté uniquement avec le décalage. La conversion a été réalisée selon la méthode dite de « meilleur ajustement ».

Les éprouvettes sous-dimensionnées de l'acier T (R) donnent une énergie de palier ductile trop faible, aux alentours de 15 J, après conversion (méthode 1). Le décalage calculé de la température de transition est trop élevé de 30 K environ, voir la [Figure A.18](#).

Les valeurs de l'énergie de choc sur entaille des éprouvettes sous-dimensionnées prélevées dans de l'acier TH (R) présentent une bonne correspondance avec les valeurs des éprouvettes ISO-V après conversion (méthode 1), voir la [Figure A.19](#). Après le décalage de température calculé aux alentours de 60 K, les deux courbes de températures de choc sur entaille correspondent de manière suffisante, voir la [Figure A.20](#). Des résultats comparables ont été obtenus par le fabricant 2 avec des éprouvettes en TH (K).

Pour l'acier VH (R), une correspondance acceptable a été constatée entre les valeurs converties (méthode 3) de l'énergie de choc sur entaille, voir la [Figure A.21](#). Toutefois, le décalage calculé de la température de transition montre une valeur trop élevée de 60 K environ, voir la [Figure A.22](#).

L'analyse des résultats permet de conclure que la conversion de l'énergie et le décalage calculé de la température de transition conviennent plus particulièrement aux courbes d'énergie de choc sur entaille en fonction de la température des aciers de résilience moyenne (TH). Les courbes obtenues par conversion d'énergie et décalage de température des aciers très résistants et extrêmement fragiles ne peuvent être converties que de manière insuffisante.

Ainsi, la conversion des valeurs de l'énergie de choc sur entaille et du décalage de température ne convient pas dans tous les cas, sur la base des calculs employés, pour comparer les valeurs d'énergie de choc sur entaille déterminées sur des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées avec des exigences spécifiques sur les valeurs de l'énergie de choc déterminées avec des éprouvettes ISO-V standard. En l'absence de valeurs de la résilience des éprouvettes ISO-V standard disponibles, il n'est pas possible de procéder à la vérification des valeurs de la résilience des éprouvettes sous-dimensionnées obtenues par conversion calculée.

## 9.5 Dispersion des valeurs de l'énergie de choc sur entaille déterminées avec des éprouvettes sous-dimensionnées

La définition des exigences relatives à l'énergie de choc sur entaille déterminée sur des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées tient compte du comportement de dispersion des valeurs caractéristiques obtenues avec les éprouvettes sous-dimensionnées. Pour cela, dix éprouvettes en acier T (R), TH (R) et VH (R) ont été soumises à l'essai à  $-20\text{ °C}$  et à température ambiante. Dans le cas de l'acier T (R), les deux températures sont dans l'intervalle de l'énergie du palier ductile du choc sur entaille ce qui explique la dispersion faible, inférieure ou égale à 0,8 J, voir la [Figure A.23](#). En raison du décalage de la température de transition ductile-fragile vers des valeurs plus élevées, la température d'épreuve de  $-20\text{ °C}$  pour l'acier TH (R) est à peine supérieure à la température de l'énergie du palier ductile, autrement dit pratiquement au milieu de l'intervalle de transition. Ici encore, la dispersion demeure inférieure ou égale à 0,9 J, voir la [Figure A.24](#). Dans le cas de la résilience à basse température encore plus restreinte du matériau modèle VH (R), la température d'épreuve de  $-20\text{ °C}$  se trouve dans la transition vers l'énergie du palier fragile tandis que  $20\text{ °C}$  reste clairement en deçà du palier ductile, voir la [Figure A.25](#). La dispersion des résultats des essais menés à température ambiante est de l'ordre de 0,8 J. Comme cela était prévisible, pour les valeurs plus basses de la zone de transition, la dispersion augmente pour atteindre 1,2 J pour les éprouvettes du matériau VH (R). Sachant que la dispersion des différentes valeurs donne des informations importantes sur l'homogénéité du matériau dans lequel les éprouvettes ont été prélevées, les essais de détermination du comportement de dispersion ont été intégrés dans la mise en œuvre des essais de résilience sur les éprouvettes sous-dimensionnées ainsi que dans les exigences relatives aux valeurs caractéristiques des éprouvettes sous-dimensionnées, voir l'[Article 14](#).

De plus, la dispersion des résultats renseigne sur la reproductibilité de la préparation des éprouvettes, de l'essai et de la détermination des températures.

## 9.6 Température de transition de rupture fragile

La sécurité d'une chaîne en acier rond contre la rupture fragile ou la réduction de la force de rupture est une fonction de la résilience (énergie de choc sur entaille) et s'évalue en fonction du concept de température de transition de rupture fragile. La relation entre la plus basse température d'application admissible et la température de transition de rupture fragile est ici cruciale, voir l'ISO/TR 23602.



La température de transition de rupture fragile peut être déterminée en tant que  $T_{NDT}$ , FATT ou  $T_{1/2}$  (USE). Il est essentiel de connaître la température de transition de rupture fragile des différents aciers et des différentes chaînes.

Dans l'ISO/TR 23602, la température de transition de rupture fragile des chaînes T (R), TH (R) et VH (R) a été déterminée par des essais instrumentés de choc sur entaille. En utilisant le critère d'arrêt de fissure – la force à l'arrêt de fissure (P4) est de 4 kN – la température de transition de ductilité nulle ( $T_{NDT}$ ) a été déterminée à partir des courbes de force en fonction du déplacement des essais instrumentés de choc sur entaille pour des éprouvettes ISO-V standard.

Une autre méthode, moins précise, pour déterminer la température de transition de rupture fragile consiste à établir la température de transition d'apparition de rupture (FATT): pour ceci, voir l'ISO/TR 23602. Cette température peut être obtenue sans système de mesurage complexe à partir de la morphologie du faciès de rupture. Lorsque la composante de rupture ductile (zone non cristalline de la surface de rupture, NCA) est de 50 %, la température d'épreuve correspond à la température de transition de rupture fragile. La comparaison entre la  $T_{NDT}$  et la FATT pour les éprouvettes ISO-V standard donne une bonne corrélation pour les chaînes en acier T (R), TH (R), VH (R) et V\* (R) dans l'intervalle de températures de 140 K, voir la [Figure A.26](#).

Un autre critère permet également de déterminer la température de transition de rupture fragile sans essai instrumenté. La température correspondant à la moitié de l'énergie du palier ductile du choc sur entaille ( $T_{1/2}$  USE) est intégrée ici. La corrélation de  $T_{1/2}$  (USE) et de la  $T_{NDT}$  (déterminée pour des éprouvettes ISO-V standard) donne également de très bonnes valeurs pour des éprouvettes standard, voir la [Figure A.27](#). Pour les éprouvettes standard, la corrélation entre les températures  $T_{1/2}$  (USE) et FATT est également très bonne, voir la [Figure A.28](#).

Les deux critères vérifiés pour des éprouvettes standard sans essai instrumenté de choc sur entaille de  $T_{1/2}$  (USE) et de FATT ont également été étudiés pour des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées. La température FATT des éprouvettes sous-dimensionnées des chaînes T (R), TH (K), TH (R), VH (K), VH (R) et V\* (R) a montré une excellente corrélation avec les valeurs de la température  $T_{1/2}$  (USE) de ces mêmes chaînes, voir la [Figure A.29](#). Ces valeurs caractéristiques sont ainsi applicables également aux éprouvettes entaillées sous-dimensionnées.

La comparaison entre les valeurs de  $T_{1/2}$  (USE) pour des éprouvettes standard et sous-dimensionnées donne un décalage moyen de la température de 35 K, voir la [Figure A.30](#).

À partir des éprouvettes standard, il a été montré que les critères FATT et  $T_{1/2}$  (USE) donnaient une bonne corrélation avec la  $T_{NDT}$  (température de transition de rupture fragile de référence) déterminée dans les essais instrumentés de choc sur entaille. Cela permet par conséquent d'établir la base du transfert de la FATT et de la  $T_{1/2}$  (USE), ainsi que la bonne corrélation avec les valeurs des éprouvettes standard. Un décalage de 35 K vers les températures plus basses de la température de transition de rupture fragile établie pour les éprouvettes standard doit être respecté pour une utilisation avec les éprouvettes sous-dimensionnées.

## 10 Extension des éprouvettes

### 10.1 Soudage au laser

Un morceau d'éprouvette peut être prélevé dans un brin non soudé pour des maillons de chaîne dont les dimensions ne permettent pas l'extraction d'éprouvettes entaillées sous-dimensionnées. La [Figure A.31a](#) présente un exemple de ce type de prélèvement dans une chaîne à maillons en acier rond 13 x 39 avec une section de 12 mm de long. Le morceau d'éprouvette ainsi que deux morceaux soudés de 8 mm de longueur en acier de résistance égale sont alors usinés pour obtenir une section de 3 x 4,5 mm, voir la [Figure A.31b](#). Les morceaux sont serrés dans le sens de la longueur et soudés au laser avant usinage de l'éprouvette pour obtenir une largeur de 4,0 mm, voir la [Figure A.31c](#). L'usinage de la largeur et la création d'une entaille conformément à l'ISO 14556 sont réalisés du côté de la tension de flexion. Enfin, la longueur de l'éprouvette est usinée à 27 mm en conservant la position médiane de l'entaille.

Pour déterminer l'effet de l'apport thermique consécutif au soudage au laser, un profil de dureté a été déterminé dans le sens longitudinal du morceau d'éprouvette de 12 mm de longueur de la chaîne sur laquelle les deux morceaux d'extrémité ont été soudés, voir la [Figure A.32](#). Les zones affectées thermiquement des deux soudures laser sont très étroites avec une largeur de 2,5 mm environ, comme cela était prévisible. La dureté de la longueur restante du morceau d'éprouvette extrait de la chaîne, soit environ 7 mm, n'est pas affectée, voir la [Figure A.32](#). Le morceau d'éprouvette présente ainsi une longueur minimale de 9 mm entre les zones de 2,5 mm environ qui sont affectées thermiquement. Après positionnement précis de l'entaille, ceci garantit que la rupture qui commence à l'extrémité de l'entaille progresse dans une zone suffisamment large dans laquelle la microstructure de la chaîne n'est pas affectée.

Les éprouvettes entaillées sous-dimensionnées en matériau V\* (R) plein ou soudé donnent des courbes d'énergie de choc sur entaille en fonction de la température extrêmement proches, voir la [Figure A.33](#).

## 10.2 Soudage par friction

L'application d'un soudage par friction à l'extension bilatérale des éprouvettes a été étudiée par le fabricant K. Toutefois, avec ce procédé, les effets thermiques sont extrêmement élevés. Le profil de dureté sur la longueur a révélé une chute très importante dans la zone de l'entaille et, par conséquent, un changement prononcé et inacceptablement élevé de la courbe d'énergie de choc sur entaille en fonction de la température.

## 10.3 Extension d'éprouvettes entaillées super sous-dimensionnées

La résilience des chaînes dont il n'est pas possible d'extraire un morceau d'éprouvette de 9 mm de longueur est déterminée à l'aide d'éprouvettes entaillées super sous-dimensionnées. Les dimensions de ces éprouvettes sont 1,5 x 1,5 x 27 mm pour une entaille de 0,5 mm de profondeur. La longueur de 27 mm est une conséquence de la géométrie des équipements d'essai. En raison de cette longueur, les éprouvettes sont toujours prolongées par des morceaux soudés. Pour réduire autant que possible l'apport thermique, des essais de soudage ont été menés avec un micro-laser et une énergie pulsée de 6,4 J, voir la [Figure A.34](#). Les éprouvettes ne sont plus usinées après soudure. Les essais de dureté montrent que l'énergie de soudage appliquée, qui est extrêmement faible, ne modifie en rien la dureté. Cela concerne également la zone immédiatement adjacente aux cordons de soudure, voir la [Figure A.34a](#).

En raison de la surface extrêmement faible (1,5 mm<sup>2</sup>) du ligament, l'énergie de choc sur entaille est inférieure à 1 J même dans le palier ductile, voir la [Figure A.35](#). Il n'est pas possible de différencier ces valeurs faibles de l'énergie selon la température d'épreuve en raison de du profil plat de la courbe d'énergie en fonction de la température, voir la [Figure A.35](#). L'aire non cristalline des surfaces de rupture des éprouvettes TH (R) soumises à l'essai à différentes températures a par conséquent été déterminée au microscope à balayage électronique (MBE) afin d'évaluer les différences valeurs de la NCA qui sont incluses à la [Figure A.35](#). La [Figure A.36](#) présente un exemple de l'analyse au MBE avec une NCA de 85 % qui porte sur la surface de rupture d'une éprouvette en TH (R) soumise à l'essai à - 50 °C. L'exigence tirée de ce résultat est NCA ≥ 80 %, voir l'[Article 14](#). À la température T<sub>½ (USE)</sub> de - 35 °C des éprouvettes sous-dimensionnées en acier TH (R), la surface de rupture de l'éprouvette super sous-dimensionnée atteint 50 % de la NCA à une température d'épreuve inférieure d'environ 50 K, voir la [Figure A.35](#). Un décalage d'environ 50 K de la température de transition de rupture fragile entre les éprouvettes entaillées sous-dimensionnées et super sous-dimensionnées devient ainsi apparent.

## 11 Déduction des critères de résilience pour des valeurs caractéristiques déterminées avec des éprouvettes entaillées sous-dimensionnées

Comme il n'a pas été possible de vérifier dans tous les essais la conversion calculée des valeurs caractéristiques des éprouvettes ISO-V standard déterminées à partir d'éprouvettes sous-dimensionnées, voir [9.3](#) et [9.4](#), les exigences qui portent sur les éprouvettes sous-dimensionnées sont désormais tirées de la courbe d'énergie de choc sur entaille en fonction de la température des éprouvettes ISO-V standard. L'ISO/TR 23602 exige 30 J pour les chaînes TH et 45 J pour les chaînes VH (concept de la charge portante) pour prévenir les ruptures fragiles à basse charge pour les plus basses