

# SOUDAGE PAR IMPULSION ELECTRO-MAGNETIQUE D'ASSEMBLAGES DE TUBES

APPLICATIONS DANS L'ELECTRONIQUE ET LE SECTEUR HVAC

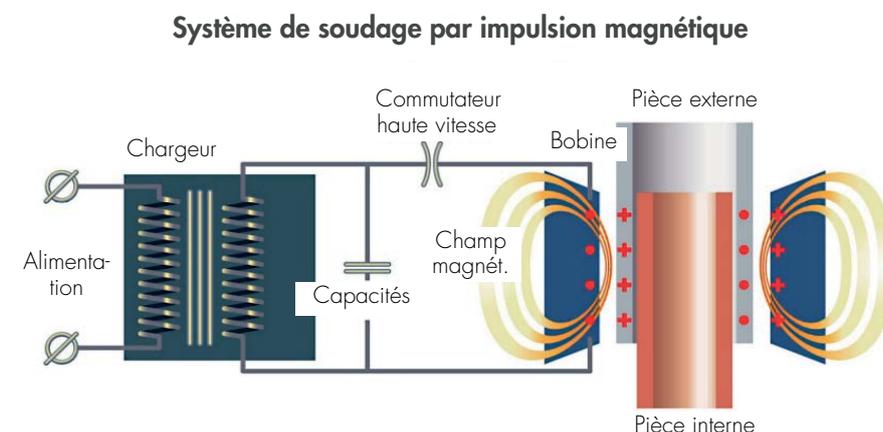
En raison des exigences de plus en plus strictes en matière de poids et de fonctionnalité dans l'industrie, des matériaux dissemblables doivent être assemblés. Les techniques de soudage traditionnelles s'avérant inefficaces, des techniques d'assemblage innovantes ont été mises au point, comme la technologie par impulsion électromagnétique. Des champs électromagnétiques sont utilisés ici pour assembler efficacement des combinaisons de matériaux dissemblables.

ir. Irene Kwee et dr. ir. Koen Faes, EWE – Institut Belge de la Soudure

Le projet de recherche européen H2020 *Join'Em*<sup>[1]</sup>, axé sur l'assemblage d'aluminium-cuivre et de cuivre-acier sous la forme de tubes et de tôles via la technologie d'impulsion électromagnétique, est actuellement en cours à l'Institut Belge de la Soudure. Ces assemblages dissemblables sont utilisés dans les éléments de chauffage et de refroidissement, et les appareils électriques dans le transport, l'électroménager, l'électronique et le secteur HVAC. Cet article s'attarde sur la soudabilité de cuivre à de l'acier à l'aide du soudage par impulsion électromagnétique, dans des assemblages tube-barre et tube-tube.

## ASSEMBLAGES DE TUBES CUIVRE-ACIER

Les assemblages de tubes cuivre-acier font notamment partie d'un circuit de refroidissement dans les déshydrateurs à air comprimé, utilisés dans toutes les applications de refroidissement dans l'industrie de la construction de machines. Un réfrigérant gazeux ou liquide circule par l'assemblage de tubes cuivre-acier, tandis que l'extérieur est exposé à une température ambiante pouvant atteindre 45 °C. Dans l'entreprise belge Refco<sup>[2]</sup>, spécialisée dans la déformation mécanique et le brasage de tubes en cuivre, le tube en cuivre est actuellement brasé manuellement à un manchon en acier au carbone à l'aide d'un chalumeau acétylène. Pour les assemblages de tubes faisant partie d'un circuit de refroidissement, le manchon est ensuite fixé avec un écrou au compresseur frigorifique ou à d'autres composants (voir illustration p. 12). Le critère principal que l'assemblage de tubes cuivre-acier doit remplir, c'est la garantie de l'étanchéité pendant la durée de vie du déshydrateur à air comprimé, pouvant atteindre vingt ans. La corrosion de l'assemblage de tubes n'est pas non plus autorisée. L'utilisation du soudage par impulsion électromagnétique comme alternative au brasage réduit les coûts grâce à l'élimination de matériaux d'apport nécessaires pour le brasage et au raccourcissement du cycle de production. Une amélioration de la qualité de soudage est également attendue.



## SOUDAGE PAR IMPULSION ELECTROMAGNETIQUE

La technologie par impulsion électromagnétique est une technique de production automatisée innovante utilisant des forces électromagnétiques pour déformer et souder des pièces. Une bobine est placée au-dessus de la pièce à souder, sans contact. Pendant le cycle de soudage, une grande quantité d'énergie électrique est libérée en un court laps de temps. Certains systèmes peuvent décharger 2 millions d'ampères en seulement 100 microsecondes. L'important flux d'énergie passe par la bobine et cette décharge de courant induit des courants de Foucault dans la pièce externe. Les deux courants induisent un champ magnétique, s'opposant. Cela génère une force, qui déplace la pièce externe à grande vitesse vers la pièce interne. Cela donne une déformation permanente, sans que la pièce reprenne sa position initiale. Vu que seule la pièce déformée doit être en un matériau à conduction électrique, ce processus convient pour l'assemblage de matériaux semblables comme dissemblables. Quelques avantages:

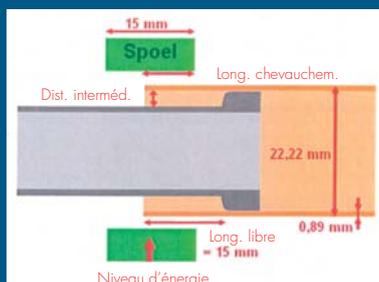
- Par rapport aux procédés de soudage conventionnels, le procédé par impulsion

magnétique est un **procédé à froid**. La pièce ne chauffe que sous l'effet des courants de Foucault et de la déformation plastique, mais cela reste limité à 50 °C. Il n'y a donc pas de zone affectée thermiquement, ni de dégradation induite thermiquement, et le matériau ne perd pas ses propriétés;

- **Grande reproductibilité** en raison de l'adaptation précise des forces;
- **Grande vitesse de production**;
- **Procédé de soudage écologique**, car il n'y a pas de production de chaleur, de gaz, ni de fumée de soudage.

## SOUDABILITE DES ASSEMBLAGES DE TUBES CUIVRE-ACIER

Dans le cadre du projet de recherche européen *Join'Em*, le soudage par impulsion électromagnétique de métaux dissemblables est étudié, plus spécifiquement l'assemblage d'aluminium et de cuivre, de cuivre et d'acier au carbone, et de cuivre et d'acier inoxydable, en tôles comme en tubes. Cet article décrit en particulier la soudabilité de tubes en cuivre (Cu-DHP R220) à des barres et tubes en acier au carbone (11SMnPb30+C) déformés à froid, ayant une résistance à la traction de resp. 220-260 MPa et 460-760 MPa.



La configuration des pièces dans la bobine est illustrée sur cette figure. Le chevauchement est la longueur entre la bobine et le tube en cuivre. La longueur libre est la longueur du tube en cuivre impactant sur le tube/la barre en acier. Avec la distance intermédiaire entre le tube en cuivre et le tube/la barre en acier, cela détermine l'angle et la vitesse auxquels le tube en cuivre impacte sur le tube/la barre en acier. L'angle et la vitesse d'impact déterminent, à leur tour, aussi la qualité de l'assemblage soudé

**TAB.: PLAGE DE LONG. DE SOUDURE ET REDUCTION DU DIAMETRE INT.**

	Assembl. tube-barre	Assembl. tube-tube	Assembl. tube-tube	Assembl. tube-tube
Long. de soud. mm	2,3-6,7	1,1-5,6	1,4-4,9	1,1-2,9
Réduction du diamètre intérieur du tube interne (mm)	-	0,9-1,3	2,4-3,0	5,7-7,7

Différentes séries de tests ont été exécutées, en jouant à chaque fois sur la configuration géométrique et les paramètres de soudage. Les assemblages tube-tube étaient obtenus avec des tubes en acier internes de trois épaisseurs de paroi différentes (1, 2 et 3 mm) sans soutien interne.

Ensuite, les assemblages tube-tube avec une épaisseur de paroi en acier de 1 mm étaient répétés avec un soutien interne. Celui-ci consiste en une barre creuse en polyuréthane (dureté Shore de A 90  $\Phi$  5) [3], serrée avec un boulon et un écrou jusqu'à ce que le diamètre extérieur soit identique au diamètre intérieur du tube en acier interne. La caractérisation de soudage consistait en la détermination de l'étanchéité au moyen d'un essai d'étanchéité avec de l'air et une analyse métallographique, mettant l'accent sur la morphologie de l'interface de soudage, la longueur de soudure et la déformation du tube en acier interne. Vu que la longueur de soudure était déterminée de part et d'autre de la coupe transversale, les deux longueurs de soudure étaient combinées en un paramètre arbitraire, à savoir l'indicateur de qualité de soudage (WQI). Une première comparaison était

établie entre les assemblages tube-barre et tube-tube sans soutien interne. Ici, l'effet de l'épaisseur de paroi du tube en acier interne et des paramètres de soudage sur l'étanchéité, la longueur de soudure et la réduction du diamètre intérieur du tube interne était déterminé. Dans une deuxième comparaison entre les assemblages tube-tube sans et avec soutien interne, l'effet du soutien interne et des paramètres de soudage sur les mêmes caractéristiques était examiné.

#### Assemblages barre-tube et tube-tube sans soutien interne

Nous considérons un assemblage tube-barre cuivre-acier, soudé via soudage par impulsion électromagnétique. Sur la coupe transversale métallographique d'un assemblage tube-barre, on voit les détails de cette coupe sans et avec défauts (voir encadré en dessous).



Un assemblage tube-barre cuivre-acier, soudé via soudage par impulsion électromagnétique

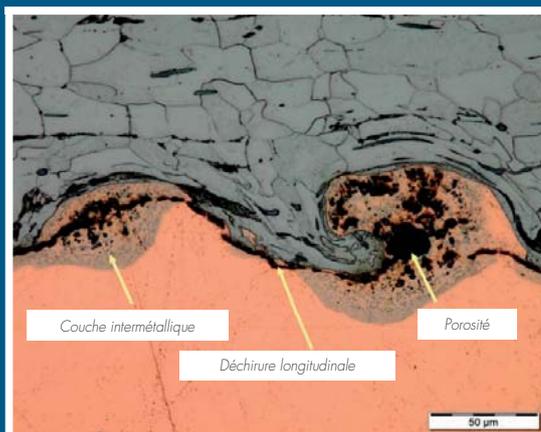
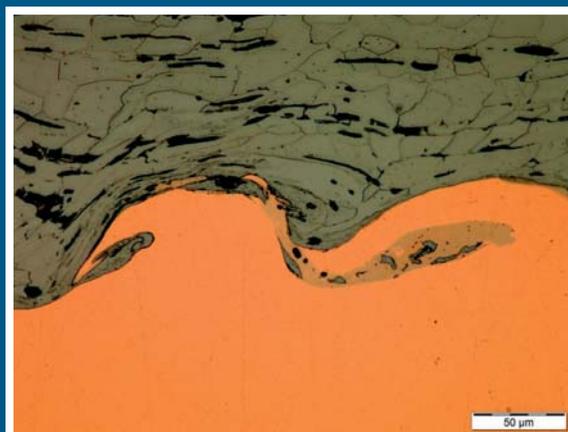
Selon les paramètres de soudage utilisés, des couches intermétalliques, des déchirures et des porosités sont observées au niveau de l'interface de soudage. La transition d'une soudure avec une interface de soudage continue vers une interface de soudage discontinue avec des zones non soudées survient quand l'épaisseur de paroi du tube en acier interne diminue. On trouve dans le tableau la plage des longueurs de soudure et de la réduction du diamètre intérieur pour les assemblages tube-barre et tube-tube étanches sans soutien interne. Les plus grandes longueurs de soudure sont mesurées dans les assemblages tube-barre. La plus petite réduction du diamètre intérieur du tube interne est obtenue pour les assemblages tube-tube avec une épaisseur de paroi du tube interne de 3 mm.

#### Distance intermédiaire

On constate en général que la distance intermédiaire joue principalement un rôle pour la taille de la longueur de soudure. Une distance intermédiaire plus grande de 2 mm donne généralement la plus grande longueur de soudure, ce qui prouve qu'il y a une distance suffisante sur laquelle le tube en cuivre peut accélérer. La réduction du diamètre intérieur du tube en acier interne est, en revanche, déterminée par la distance intermédiaire comme par le niveau d'énergie. Un niveau d'énergie plus élevé et une plus grande distance intermédiaire donnent lieu à une plus grande réduction du diamètre intérieur de la pièce en acier interne. Cela démontre que le tube en cuivre n'a pas encore ralenti à la distance intermédiaire donnée et a donc encore une vitesse d'impact accrue.

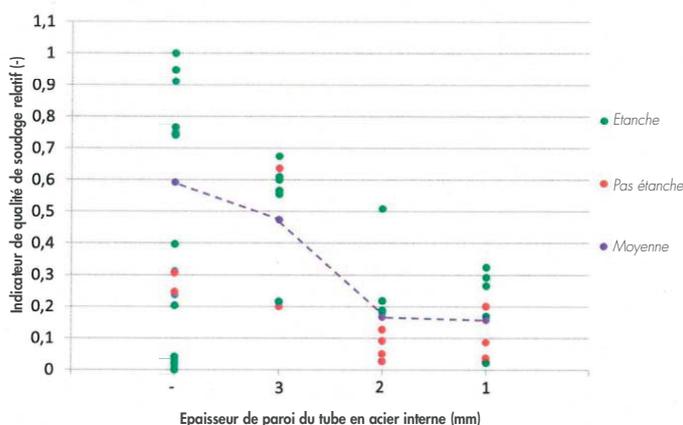
#### GRAPHIQUES

Le **graphique 1** sur la page suivante illustre l'évolution de l'indicateur de qualité de soudage relatif en fonction de l'épaisseur de paroi de la pièce en acier interne, obtenu pour les différents niveaux d'énergie et distances intermédiaires. Le plus grand indicateur de qualité de soudage relatif est obtenu pour les assemblages tube-barre. Ensuite, les valeurs diminuent au fur et à mesure que

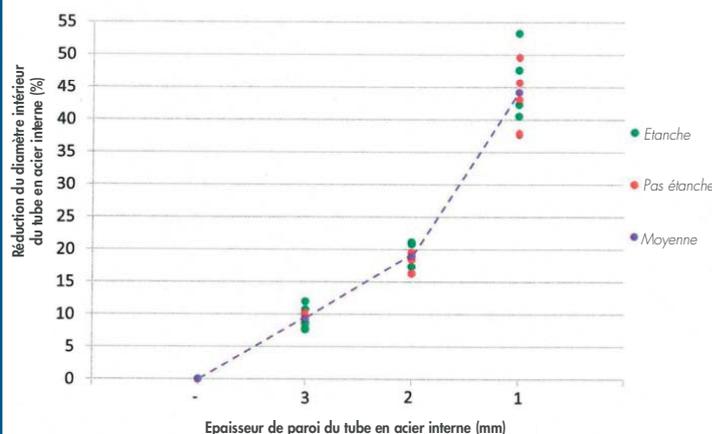


Coupe transversale métallographique d'un assemblage tube-barre sur laquelle on ne voit pas de défauts à gauche et bien à droite

**Graphique 1**



**Graphique 2**



l'épaisseur de paroi du tube en acier interne diminue. Cela correspond à la coupe transversale métallographique des assemblages, où une transition d'une interface de soudage continue avec une zone soudée complète vers une interface de soudage sans zone soudée survient lors d'une réduction de l'épaisseur de paroi du tube en acier interne.

Le **graphique 2** montre qu'au fur et à mesure que l'épaisseur de paroi du tube interne diminue, la réduction en pourcentage du diamètre intérieur du tube interne augmente. Dans le cas des assemblages tube-tube avec une épaisseur de paroi de 1 mm du tube interne, on observe même une déformation non uniforme, ce qui indique la nécessité d'utiliser un soutien interne.

L'étanchéité des assemblages tube-barre et tube-tube en fonction de la distance intermédiaire et du niveau d'énergie est illustrée sur le **graphique 3**. Une étanchéité complète est obtenue pour les assemblages avec une plus grande distance intermédiaire, les assemblages tube-tube avec une plus grande épaisseur de paroi et les assemblages tube-barre. L'étanchéité est liée à la qualité de l'interface de soudage, vu qu'une interface discontinue

donne une étanchéité médiocre. Cette interface de soudage discontinue est obtenue en cas de distances intermédiaires plus petites et pour les pièces internes en acier avec une épaisseur de paroi plus petite.

**Assemblages tube-tube avec et sans soutien interne**

Dans le cas d'un assemblage tube-tube avec une épaisseur de paroi du tube interne de 1 mm, avec un soutien interne, une augmentation du diamètre extérieur par rapport au diamètre extérieur original du tube en acier interne a été constatée à 5 mm à côté de la zone d'impact du tube en cuivre sur celui en acier. Cela est dû à la compression du soutien en polyuréthane se trouvant juste sous la zone d'impact. De ce fait, la partie en polyuréthane juste à côté de la zone d'impact se dilate et le diamètre extérieur du tube interne augmente donc. Le diamètre intérieur minimal, maximal et original du tube interne d'un assemblage tube-tube avec soutien interne est montré sur l'illustration sur la page suivante.

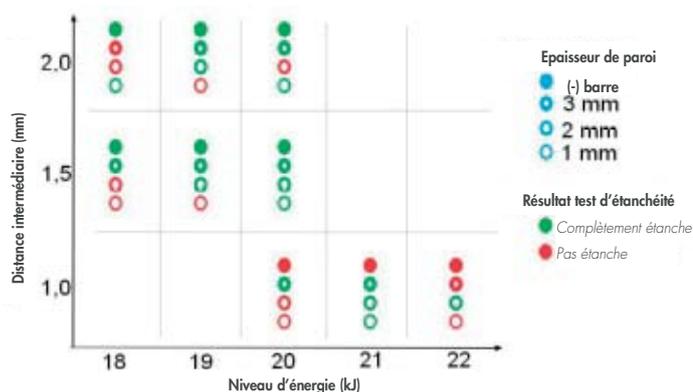
**GRAPHIQUES**

Le **graphique 4** illustre la réduction du diamètre intérieur du tube en acier interne en

fonction de la distance intermédiaire pour les assemblages tube-tube avec une épaisseur de paroi du tube interne de 1 mm, avec et sans soutien interne. L'utilisation d'un soutien interne réduit la réduction du diamètre intérieur d'un facteur 3,4. La plage de la réduction du diamètre intérieur des assemblages tube-tube avec un soutien interne varie de 1,2 à 2,2 mm, ce qui est comparable aux valeurs obtenues pour les assemblages tube-tube avec une épaisseur de paroi du tube interne de 2 et 3 mm, sans soutien interne. Des assemblages tube-tube étanches avec et sans soutien interne, en combinaison avec la plus petite réduction du diamètre intérieur, sont obtenus avec une distance intermédiaire de 2 mm et un niveau d'énergie de 18 kJ.

Le **graphique 5** présente l'indicateur de qualité de soudage relatif en fonction de la distance intermédiaire pour les assemblages tube-tube avec et sans soutien interne. Ici aussi, l'utilisation d'un soutien interne induit une augmentation de l'indicateur de qualité de soudage relatif d'un facteur 3,4. La plage des longueurs de soudure mesurées des assemblages tube-tube avec un soutien interne varie de 1,5 à 5,7 mm. Des assemblages tube-tube étanches avec le plus grand indicateur de

**Graphique 3**

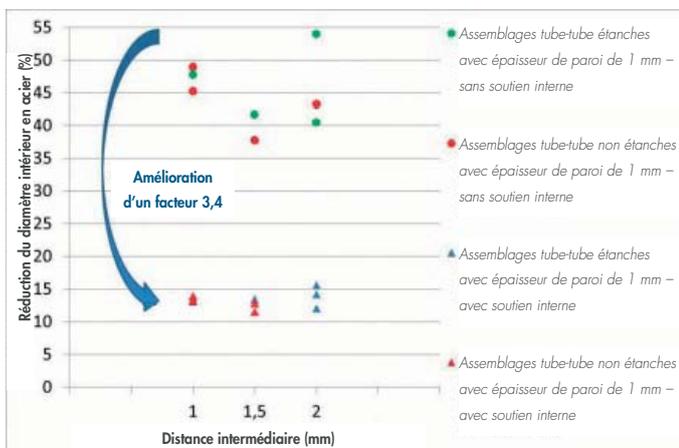


**VU LES EXIGENCES DE PLUS EN PLUS STRICTES EN MATIERE DE POIDS ET DE FONCTIONNALITE DANS L'INDUSTRIE, DES MATERIAUX DISSEMBLABLES DOIVENT ETRE ASSEMBLES**

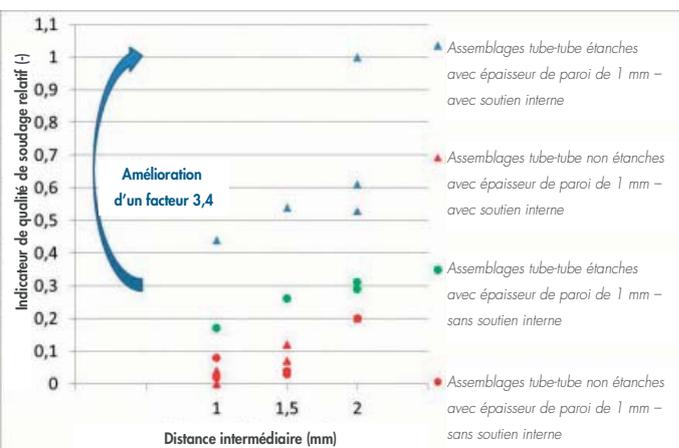
*Éléments pour l'assemblage d'un tube en cuivre à un manchon en acier au carbone*



### Graphique 4



### Graphique 5



qualité de soudage relatif sont obtenus pour une distance intermédiaire de 2 mm, en combinaison avec un niveau d'énergie de 19 kJ pour les assemblages tube-tube avec soutien interne, et avec un niveau d'énergie de 18 kJ pour les assemblages tube-tube sans soutien interne. L'utilisation d'un soutien interne se solde par une étanchéité complète pour quelques assemblages tube-tube.

#### RESUME

- Pour les assemblages tube-barre et les assemblages tube-tube sans soutien interne, les plus grandes longueurs de soudure sont obtenues avec la plus grande distance intermédiaire et avec une plus grande épaisseur de paroi du tube interne. La plus petite réduction du diamètre intérieur de la pièce en acier interne est généralement obtenue pour le niveau d'énergie le plus faible, la plus petite distance intermédiaire et une plus grande épaisseur de paroi. La distance intermédiaire joue un rôle majeur pour la qualité du soudage: à la plus grande distance intermédiaire, le tube en cuivre est probablement toujours en accélération et n'a donc pas encore atteint sa vitesse d'impact maximale. Cela explique les plus grandes longueurs de

soudure obtenues, ainsi que la plus grande réduction du diamètre intérieur du tube en acier interne.

- L'utilisation d'un soutien interne en polyuréthane pour les assemblages tube-tube avec une épaisseur de paroi de 1 mm du tube en acier interne réduit la réduction du diamètre intérieur en acier et augmente les longueurs de soudure d'un facteur 3,4 (par rapport aux assemblages tube-tube avec une épaisseur de paroi de 1 mm du tube interne, sans soutien interne). Le soutien interne résulte aussi pour certains assemblages tube-tube en une étanchéité complète.
- La plus petite réduction du diamètre intérieur du tube en acier interne survient à une distance intermédiaire de 2 mm, un niveau d'énergie de 18 kJ et une longueur de chevauchement de 8 mm, pour les assemblages tube-tube avec et sans soutien interne.
- Les plus grandes longueurs de soudure sont obtenues pour une distance intermédiaire de 2 mm, une longueur de chevauchement de 8 mm, en combinaison avec un niveau d'énergie de 18 kJ pour les assemblages tube-tube sans soutien interne et un niveau d'énergie de 19 kJ pour les assemblages tube-tube avec soutien interne. □

Les résultats décrits dans cet article font partie du projet de recherche européen Join'Em. Ce projet a bénéficié d'un financement d'Horizon 2020, le programme-cadre de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation, sous la convention de subvention n° H2020-FoF-2014-677660 – JOIN'EM.

Pour plus d'informations concernant la technologie par impulsion électromagnétique, contactez Koen Faes:  
E-mail: [Koen.Faes@bil-ibs.be](mailto:Koen.Faes@bil-ibs.be)



Le diamètre intérieur minimal, maximal et original du tube interne d'un assemblage tube-tube avec soutien interne est montré sur cette illustration

#### Références

- [1] Projet Join'Em.  
Disponible en ligne: [www.join-em.eu](http://www.join-em.eu)
- [2] Refco N.V.  
Disponible en ligne: [www.refco.be](http://www.refco.be)
- [3] P+S. Elastomère diepothan.  
Disponible en ligne: [http://www.pus-polyurethan.de/it\\_files/files/PDF-Products/P+S\\_Elastomer\\_springs.pdf](http://www.pus-polyurethan.de/it_files/files/PDF-Products/P+S_Elastomer_springs.pdf)

