Brütsch/Rüegger AG
Tubes acier
Althardstrasse 83
CH-8105 Regensdorf
Tél. 01/871 34 34
Fax 01/871 34 99
www.b-r.ch
Email : info@brr.ch
Certification ISO 9001:2000

# Cahier technique 01

## Méthodes de contrôle des tubes en acier

# Méthodes de contrôle des tubes en acier

Un aspect important de l'assurance qualité réside dans la surveillance et la réalisation d'essais de qualité en continu au cours de la fabrication. Ceux-ci débutent dès la coulée de l'acier et se terminent par le contrôle prescrit pour chaque type de tubes à la livraison. Le type et l'importance des différents essais dépendent de l'utilisation ultérieure des tubes, c'est-à-dire du niveau, de la durée et du mode d'action des contraintes. Il faut entendre par cela, entre autres, la pression et la température de fonctionnement, ainsi que le mode d'action régulier, irrégulier ou par à-coups.

Les Conditions Techniques de livraison, les fiches DIN ainsi que de nombreuses autres spécifications nationales et étrangères précisent, pour les différents domaines d'application, l'amplitude et le type des essais. Ils ont été établis par des professionnels faisant partie du milieu des consommateurs, fabricants et contrôleurs. Ils sont adaptés en permanence à l'évolution technique.

Parmi les contrôles, il convient de faire une distinction entre les essais destructifs et les essais non destructifs. Les premiers englobent les essais mécaniques. Pour ceux-ci, il faut prélever des sections sur les produits et fabriquer des échantillons. Les essais de traction et de résilience servent à déterminer les propriétés mécaniques de la matière : la limite élastique, la résistance à la traction, l'allongement à la rupture et la résilience. Toutes ces valeurs sont décisives pour le dimensionnement d'une pièce de construction.

L'allongement à la rupture et la résilience permettent de caractériser la ténacité d'un acier. D'autres types d'essais donnent des indications surtout au niveau de l'usinabilité et de la déformabilité des tubes.

Différentes méthodes de contrôle non destructif s'ajoutent à ces essais mécaniques. L'avantage principal est qu'elles permettent également d'étudier les défauts internes d'un échantillon sans être obligé de le détruire. Pour les tubes de qualité sans soudure utilisés en tant que tubes de chaudière, en tant que tubes fortement sollicités dans la construction d'appareils ou dans l'industrie chimique, un contrôle intégral aux ultra-sons est obligatoire. Pour les tubes de canalisations soudés, le cordon de soudure est contrôlé grâce à une méthode non destructive adéquate.

Les principaux types d'essais mécaniques ainsi que les essais non destructifs sont décrits dans les deux chapitres suivants.

# Essais mécaniques

Ces essais mécaniques ont été introduits pour garantir les propriétés et la qualité générale des produits en acier. Ils ont particulièrement pris de l'importance pour les tubes en acier, car ceux-ci sont la plupart du temps, utilisés en leur état d'usinage final, sans autre modification.

Les sections suivantes traitent des différents essais inclus dans les Conditions Techniques de Livraison des tubes en acier. La plupart de ces essais sont réalisés selon des normes ou recommandations reconnues à l'échelon mondial. Elles sont complétées par des critères d'évaluation des tubes en acier pouvant être comparés au niveau international.

D'autres types d'essais sont axés sur l'adéquation des tubes à un usinage ultérieur par cintrage, bordage, laminage, etc. Pour certains secteurs d'application, comme par exemple les centrales thermiques, ces essais sont également utilisés pour faire la preuve de l'absence de défauts aux extrémités des tubes.

## Essais de traction

Les éprouvettes de traction prélevées sur les tubes à tester servent au calcul des valeurs caractéristiques de résistance et de déformabilité : limite élastique, résistance à la traction et allongement à la rupture. Les essais de traction sont réalisés essentiellement à température ambiante, également à des températures supérieures pour les éléments de construction exposés à la chaleur. Dans ce cas, outre les essais habituels avec sollicitation par traction, des méthodes ont été développées pour déterminer les qualités spécifiques de l'acier à température supérieur. La limite de fluage et la résistance au fluage sont ainsi connues.

Les formes d'éprouvettes pour l'essai de traction sont fixées par la DIN 50125 (généralités), la DIN 50140 (essai sur tubes et bandes de tubes) et la DIN 50120 (contrôle des cordons de soudure) ; en ce qui concerne leur réalisation, des renseignements sont donnés par la DIN 50145 et la DIN 50140. Le type d'éprouvette (fréquemment un échantillon de toute l'épaisseur de la paroi de la pièce), ainsi que sa position dans le tube (en longueur ou en largeur) sont déterminés dans les Conditions Techniques de Livraison des tubes.

L'essai de fluage est normalisé dans la DIN 50118 ainsi que dans la DIN 50119.

Les essais de contraintes ondulées sont réalisés selon la DIN 50100 (essai de vibrations de longue durée). L'évaluation des essais de traction en pression interne sur les tubes est faite sur la base de la DIN 2413.

# Essai de résilience

L'essai de résilience ne fait pas ressortir de valeur caractéristique permettant de calculer la résistance. Il ne permet pas non plus de déterminer directement la plus basse température admise pour l'utilisation d'un matériau dans une pièce de construction (voir fiche de renseignements AD W10, pages 27 à 29).

L'essai de résilience sert avant tout à :

- évaluer le comportement au choc des aciers à grains fins,
- évaluer la résistance au vieillissement (contrôle d'éprouvettes vieillies),
- évaluer la ductilité à froid des aciers utilisés à des basses températures.

Lors de l'essai de résilience, on casse d'un seul coup une éprouvette dont les deux côtés sont posés à plat. On mesure la contrainte appliquée pour effectuer cette rupture.

L'essai de résilience est réalisé selon la DIN 50115 (5) ou selon une autre norme équivalente. Ces textes précisent la forme des éprouvettes et décrivent l'essai. Depuis peu, l'éprouvette ISO, qui correspond aux éprouvettes Charpy et KCV, s'est imposée à la place de l'éprouvette DVM.

Figure 1 :Schéma de principe de l'essai de choc

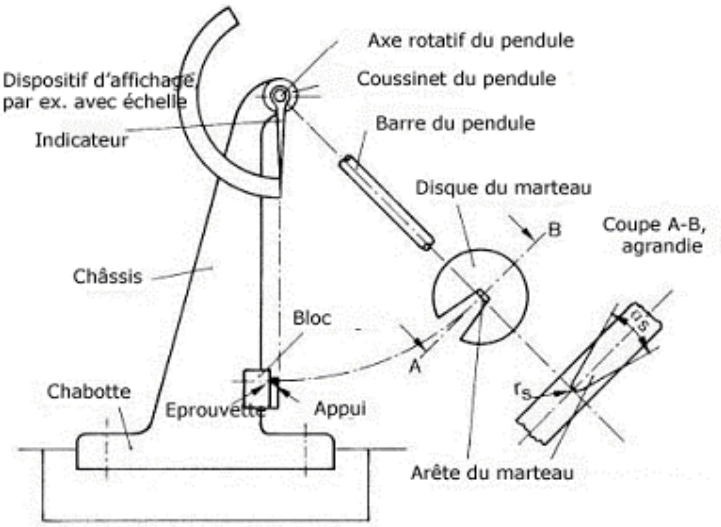
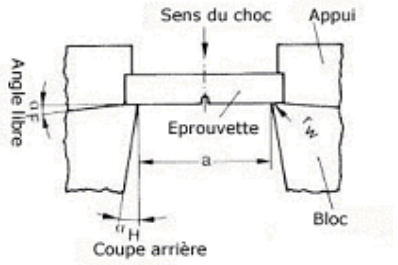



Figure 2 :Forme de l'éprouvette, bloc et appui



Lors du contrôle des tubes, on prévoit habituellement des éprouvettes prélevées en longueur (longitudinalement par rapport à l'axe du tube). Dans des cas particuliers, si cela a été prévu à la commande, on peut aussi tester des éprouvettes prises en travers ; toutefois, dans la mesure où les dimensions du tube permettent de prélever des éprouvettes complètes, l'axe de l'entaille est toujours perpendiculaire à la surface. En ce qui concerne les éprouvettes en longueur, on peut également en prélever d'une dimension inférieure si l'épaisseur de paroi du tube n'est pas suffisante pour y prélever des éprouvettes complètes d'une section transversale de 10 x 10 mm. Les normes allemandes prescrivent un essai de résilience lorsqu'une éprouvette de 5 mm de large peut être prélevée. Selon l'ASTM, des éprouvettes d'une largeur de 2,5 mm sont également testées. Selon les normes allemandes, pour les éprouvettes de dimension inférieure à la norme, la contrainte de choc est diminuée en fonction de la section transversale (pour une éprouvette de 5 mm, la contrainte de choc sur entaille en J est diminuée de moitié). L'ASTM définit tout particulièrement la contrainte de choc en J/cm² pour les petites éprouvettes, de sorte que la valeur comparée à une éprouvette complète, soit plus importante.

On peut, par exemple, prélever une éprouvette de 2,5 mm de large (diamètre extérieur x épaisseur minimale de paroi), sur des tubes de 16 x 4,3 ; 26,9 x 3,5 ou 54 x 3,0. De la même manière, on a besoin, pour une éprouvette de 5 mm de large, d'un tube de 21,3 x 6,3 ; 44,5 x 5,6 ou 219,1 x 5,2.

En fonction de la température de test, on distingue le stade supérieur, la zone de transition et le stade inférieur de la contrainte de choc (voir figure 4).

*Figure 3 : Désignation et dimensions des éprouvettes pour essai de résilience*

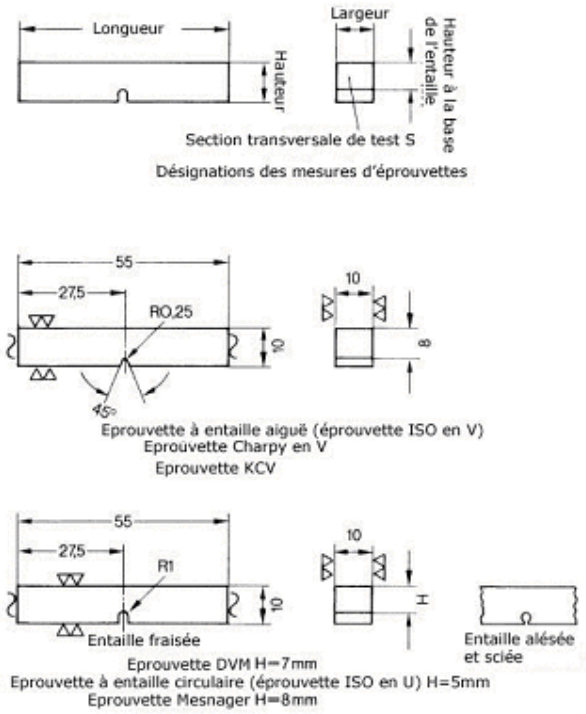
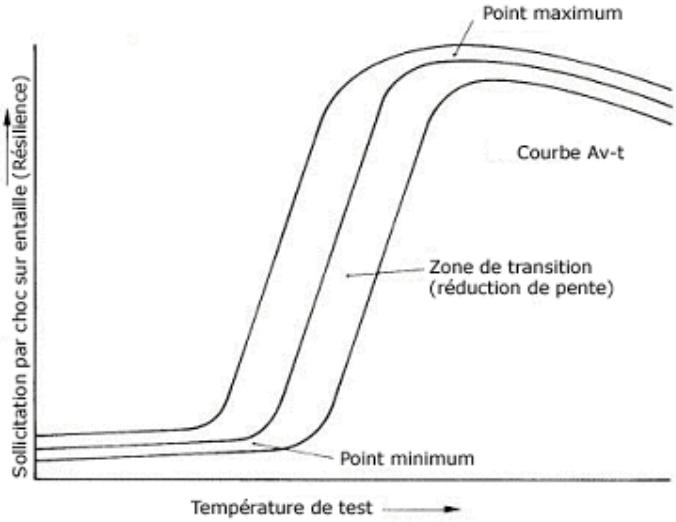



*Figure 4 : Courbe de température pour contrainte de choc sur entaille (résilience) avec champ de dispersion*

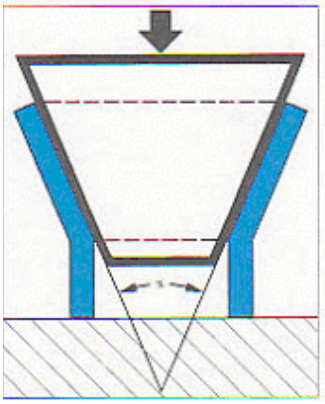


## Essai d'élargissement selon la DIN 50135

L'essai d'élargissement (évasement) sert à démontrer la déformabilité des tubes lors de leur élargissement jusqu'à une limite prescrite.

Cet essai est appliqué sur des tubes de dimensions maximale de 150 mm de diamètre extérieur et au maximum de 9 mm d'épaisseur de paroi ; essentiellement pour les tubes en acier de précision et les tubes en acier inoxydable austénitique.

*Figure 5 : Essai d'élargissement*



Si l'on n'arrive pas à distinguer le cordon de soudure sur des tubes soudés, cet essai est également réalisé en remplacement de l'essai de pliage sur bague.

Lors de la réalisation de cet essai, grâce à un mandrin sur une presse, on élargit une section de tube jusqu'à atteindre l'élargissement de diamètre extérieur spécifié dans les conditions de livraison. Toutefois, cet élargissement ne doit pas faire apparaître de défauts (figure 5).

## Essai de pliage sur bague selon la DIN 50136

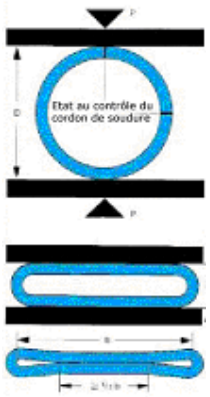
L'essai de pliage sur bague est utilisé principalement pour mettre en évidence les défauts macroscopiques internes et externes, ainsi que pour déceler les cordons de soudure défectueux. On peut également y avoir recours pour évaluer la déformabilité. La fourchette des dimensions est en général limitée à un maximum de 400 mm de diamètre extérieur et à des parois d'une épaisseur allant jusqu'à 15 % du diamètre extérieur.

Cette méthode de test est particulièrement appropriée pour le contrôle de la déformabilité du cordon de soudure. Dans ce cas, on place le cordon de soudure alternativement à une position correspondant à 12 heures et à 3 heures sur le cadran d'une montre (voir figure), de telle sorte que le cordon de soudure soit sollicité en traction alternativement sur la face interne et sur la face externe du tube.

Pour la réalisation de l'essai, une section de tube est comprimée entre deux plaques situées sur un plan parallèle jusqu'à un certain écart, sans que des fissures ne se forment ni que des défauts internes ou externes ne deviennent visibles. Les écarts entre les plaques pour le dosage de la déformation sont fixés dans les différentes normes de livraison des tubes. A titre d'information, on peut continuer l'essai jusqu'au pliage intégral de l'éprouvette (figure 6).

L'essai de pliage sur bague est prévu pour les tubes en acier sans soudure et de préférence soudés sous presse. Pour les gros tubes soudés par fusion, un essai de flexion selon la DIN 50121 est réalisé.

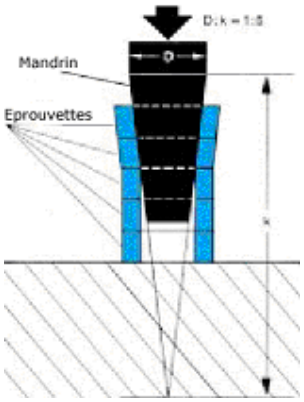
*Figure 6 : Essai de pliage sur bague*




## Essai de mandrinage sur bague selon la DIN 50137

L'essai de mandrinage sur bague permet non seulement de révéler des défauts présents sur les surfaces intérieure et extérieure des tubes, mais aussi d'évaluer la déformabilité (exprimée par l'élargissement du diamètre intérieur du tube). Cette méthode permet aussi de visualiser l'intérieur du tube au vu de l'aspect de la cassure, car cet essai est réalisé en principe en cassant une section de tube. Lors de la réalisation de l'essai sur des tubes d'un diamètre extérieur de 21,3 à 146 mm et d'une épaisseur de paroi d'au moins 2 mm et d'au plus 16 mm, on élargit les anneaux à tester par traction sur un mandrin conique jusqu'à leur rupture (figure 7).

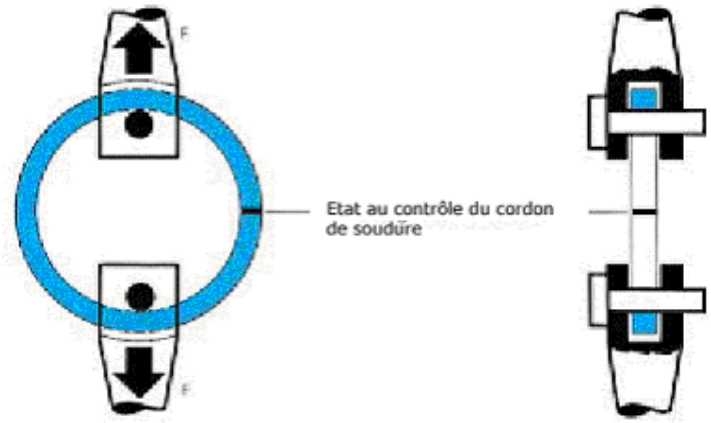
*Figure 7 : Essai de mandrinage sur bague*




## Essai de traction sur bague selon la DIN 50138

L'essai de traction sur bague est réalisé sur des tubes d'un diamètre extérieur de plus de 146 mm ou d'un diamètre intérieur de plus de 100 mm et d'une épaisseur de paroi de 40 mm au maximum. Cet essai permet, outre la mise en évidence des défauts de surface et l'évaluation de la déformabilité, une estimation de l'aspect de la

*Figure 8 : Essai de traction sur bague*




## Essai de bordage selon la DIN 50139

Grâce à cet essai, on vérifie si les tubes peuvent être bordés à un angle de 90°. Cet essai est appliqué sur des tubes d'un diamètre extérieur allant jusqu'à 150 mm.
Les Conditions Techniques de Livraison allemandes ne prévoient plus cet essai.
Au moyen d'outillages adéquats, on replie le bord de l'extrémité du tube jusqu'à l'obtention d'un angle de 90° et du diamètre extérieur $d_b$ prescrit (voir figure 9).

## Essai de flexion selon la DIN 50121

L'essai de flexion donne des indications concernant la déformabilité des raccordements soudés en bout lors d'une sollicitation exercée transversalement par rapport au cordon de soudure. On l'utilise pour les tubes soudés par fusion.

Pour effectuer ce test, on plie, jusqu'à un angle de 180°, des éprouvettes de 30 mm de large entre deux rouleaux, grâce à un mandrin, (figure 10). Les éprouvettes sont prélevées en travers au dessus du cordon de soudure. Aucune fissure ne doit alors apparaître. Le diamètre du mandrin de flexion d est déterminé en fonction de la qualité d'acier utilisée. Il est indiqué dans les Conditions Techniques de Livraison pour les tubes.

## Essai de pression interne

L'essai de pression interne est réalisé en fonction du secteur d'application des tubes, soit en tant que test d'étanchéité, soit en tant que test de résistance. Les tubes destinés à la construction de centrales thermiques ou de chaudières et appareils de pression sont toujours contrôlés au niveau de l'étanchéité à une cassure. Pour les tubes soudés, le cordon de soudure doit être décalé de 90° par rapport au sens de traction (figure 8). Pour sa réalisation, on glisse des sections de tubes sur deux boulons de traction qui sont maintenus en travers par rapport à l'axe de la machine de contrôle par un dispositif de serrage. Les sections de tube sont écartés jusqu'à rupture.
pression de test constante de 50 ou 80 bar. En raison du développement continu des méthodes de contrôle électromagnétique non destructives, ce test d'étanchéité par pression interne est de plus en plus supplanté par les systèmes de contrôle électromagnétique pour prouver l'étanchéité des tubes, selon la fiche de contrôle fer-acier 1925.

Si, suite à un accord spécial, un essai de résistance est réalisé, la pression de contrôle est déterminée de sorte qu'apparaisse dans le tube une tension circonférentielle proche de la limite élastique (DIN 2413).

Pour les tubes d'alimentation en énergie des réseaux interurbains, le contrôle de résistance par pression interne est obligatoire. Ce contrôle est effectué en général avec de l'eau. La pression de test est maintenue au moins pendant 5 secondes lors de l'essai d'étanchéité et au moins pendant 10 secondes lors de l'essai de résistance. Elle est précisée dans les Conditions Techniques de Livraison pour les tubes.

*Figure 9 : Essai de bordage*

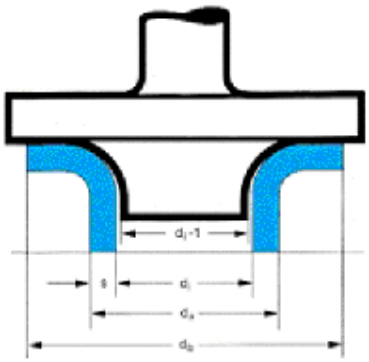
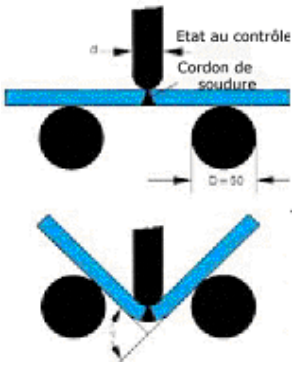


*Figure 10 : Essai de flexion*



# Contrôles non destructifs

## Contrôles aux ultrasons, électromagnétiques et aux rayons X

Le contrôle non destructif des défauts des tubes est aujourd'hui l'un des tests les plus importants pour les tubes en acier. Il est réalisé, en fonction du domaine d'application des tubes, soit sous forme de contrôle partiel de pièce (par exemple, le cordon de soudure ou les extrémités des tubes), soit sous forme de contrôle intégral.

Le contrôle non destructif des défauts a pour avantage de pouvoir être étendu sur la longueur des tubes et de ne pas être limité à leurs extrémités. C'est pourquoi les essais destructifs, qui étaient jusqu'à présent d'une grande ampleur, ont été considérablement limités dans la nouvelle édition des normes pour les tubes de chaudière du grade de qualité 3 (DIN 17175 et DIN 17177), et remplacés par un contrôle intégral des tubes.

Le contrôle non destructif des défauts a donc, par conséquent, largement contribué à augmenter la fiabilité des tubes. Ceci est particulièrement vrai pour les tubes soumis à des exigences de qualité élevées, dans lesquels il s'agit également de détecter les défauts isolés cachés. Pour les tubes soudés, cela s'exprime directement lors du paramétrage des tubes. Le contrôle non destructif des cordons de soudure tient compte du calcul de contrainte utilisé (coefficient de soudure) grâce au choix de la sensibilité au contrôle, du procédé et de l'ampleur du contrôle. Les méthodes de contrôle non destructif sont également utilisées de nos jours, pour le contrôle pendant la fabrication dans le flux de production, et ceci,afin d'éviter, dès le départ, toutes les anomalies dans la fabrication. Ces méthodes font ainsi fonction de contrôle de processus et de système d'alerte rapide. Ainsi, par exemple, les tubes Fretz-Moon sont testés au niveau de l'étanchéité par courant Foucault à des fins d'installation à des températures supérieures à 800°C.

Pour chaque méthode de contrôle non destructif, il est impératif que les indications affichées soient reproductibles et que les défauts non admissibles puissent être cernés avec certitude grâce à un choix approprié du réglage de la sensibilité. Cette exigence de reproductibilité et d'objectivité a eu pour conséquence une automatisation toujours accrue des installations de contrôle. Ceci permet l'élaboration d'un standard homogène de qualité des tubes.

## Contrôles intégraux non destructifs

Pour le contrôle non destructif, on utilise dans une large mesure, la méthode de contrôle aux ultrasons car elle est particulièrement adaptée pour le contrôle de la plupart des diamètres et épaisseurs de parois de tubes, du fait d'une sensibilité uniforme dans toute la paroi du tube. C'est pourquoi elle est, même pour les tubes à paroi épaisse, la méthode préférée pour déceler les parties non homogènes sur la face interne des tubes.

On peut atteindre des vitesses de contrôle supérieures grâce aux méthodes électromagnétiques. Dans ces procédés, la sensibilité de révélation diminue au fur et à mesure que l'épaisseur de la paroi augmente, en raison de la profondeur de pénétration limitée du champ de courant Foucault – effet pelliculaire-. Les procédés électromagnétiques sont également utilisés en remplacement du contrôle d'étanchéité (SEP 1925).

On utilise les méthodes du courant Foucault et du flux de dispersion magnétique.

## Contrôle aux ultrasons

Un émetteur (tête de contrôle émettrice) émet un faisceau acoustique, habituellement à des fréquences de 2 à 4 MHz, qui, dans la plupart du temps avec solution d'eau, est projeté sur l'éprouvette. Les parties non homogènes de l'éprouvette, reflètent une partie de l'énergie acoustique lorsqu'elles sont touchées par le rayon acoustique. Une partie du son reflété est de nouveau réceptionnée et elle est affichée. Comme, l'émission et la réception des sons sont des processus physiquement réversibles, on peut se contenter de travailler dans de nombreux cas, avec une seule tête de contrôle. Celle-ci fonctionne alors alternativement comme émetteur ou comme récepteur. Cette méthode de travail est présentée en figure 11.

Pour une des techniques d'essai appliquées, le tube est avancé en rotation jusqu'à la tête de contrôle ou aux règles oscillatoires. On peut en l'occurrence, pour augmenter la vitesse de test et la fiabilité de l'ensemble du palpage, installer plusieurs têtes de contrôle parallèles. La figure 12 représente un schéma de cette technique. Pour une autre technique de contrôle, les têtes de contrôle sont intégrées dans un bloc de contrôle qui tourne autour du tube à tester ; ce dernier se déplace dans le sens longitudinal.

*Figure 11 : Contrôle aux ultra-sons*

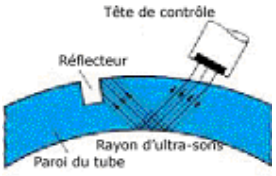
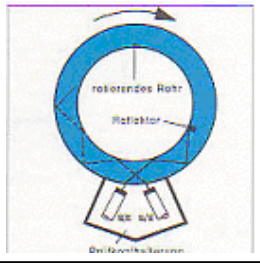



*Figure 12 : Contrôle aux ultra-sons avec têtes de contrôle fixes et tube rotatif*



*Figures 13a et 13b : Contrôle aux ultra-sons par têtes de contrôle rotatives et transition axiale du tube*

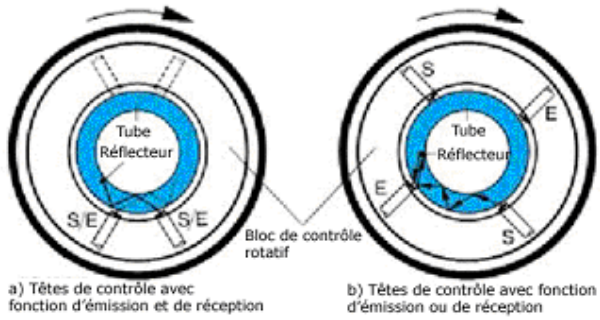
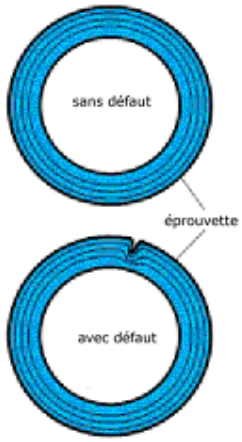



*Figure 15 : Répartition du courant parasitaire dans l'éprouvette*



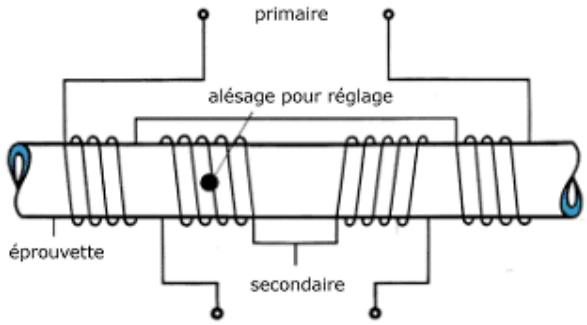

Dans ce cas, on peut également installer plusieurs têtes de contrôle dans différents plans de test pour augmenter la vitesse de débit lors d'un palpage intégral. La figure 13 illustre le schéma de cette technique de contrôle. Pour cette technique, l'utilisation de têtes de contrôle à fonction simultanée d'émission et de réception (figure 13a) aussi bien que celle de têtes de contrôle distinctes pour la fonction d'émission et de réception (figure 13b) ont fait leurs preuves. Pour les procédés développés récemment, les ultrasons sont générés par électromagnétisme : on n'a plus besoin de liant. Quant aux tubes de petits diamètres, ils peuvent être testés à partir d'une extrémité sans déplacement du tube ou d'une sonde.

## Méthode du courant Foucault

Le procédé à courant parasitaire le plus connu, à savoir la méthode auto-comparative avec transition par bobines, est également souvent préférée pour les tubes de plus petits diamètres. La figure 14 montre un schéma de ce procédé. Dans ce cas, deux systèmes de bobines entourent l'éprouvette : les bobines primaires et secondaires. La bobine primaire est traversée par un courant Foucault d'une certaine fréquence et génère, par le champ alternatif magnétique, dans la partie encerclée de l'éprouvette, des courants Foucault (figure 15). Ceux-ci produisent ou ont une influence sur les tensions induites dans les bobines secondaires par le champ alternatif magnétique.
Si on branche, dans le cercle secondaire, deux bobines identiques l'une contre l'autre, la tension alternative prend la valeur zéro dans la zone de mesure

lorsqu'un tube totalement homogène transite par le système de bobines. Les modifications du corps du tube dans le secteur d'une des deux bobines de mesure dans la bobine secondaire peuvent être mises en évidence grâce à un affichage approprié ou à des appareils d'enregistrement. Pour éliminer les perturbations dues aux fluctuations de la perméabilité de la matière, les tubes ferritiques sont saturés par magnétisation en dessous du point Curie. Ceci est réalisé lors de leur introduction dans le système de bobines, au moyen de bobines supplémentaires.

*Figure 14 : Méthode auto-comparative à courant parasitaire par transition de bobines*



## Méthode du flux de dispersion magnétique

Dans la méthode du flux de dispersion magnétique, l'éprouvette, comme on le voit sur la figure 16, est magnétisée. Ceci peut être réalisé aussi bien en utilisant des cadres de magnétisation rotatifs (figure 17) qu'à l'aide du champ magnétique de courants puissants qui sont guidés directement à travers l'éprouvette.

Le flux de dispersion magnétique est rendu localement visible dans la méthode d'essai magnétoscopique par l'application de particules pouvant adhérer par magnétisme à la surface du tube ; il peut aussi être déterminé au moyen de sondes de champ magnétique. Il permet de discerner les parties non homogènes du tube.

*Figure 16 : Contrôle par flux de dispersion magnétique*

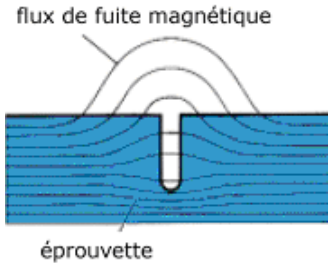
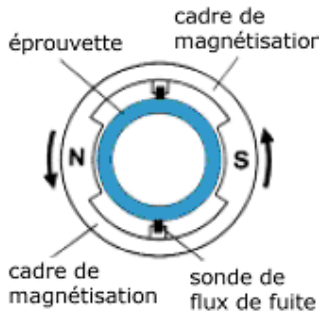



*Figure 17 : Méthode de flux de dispersion magnétique avec cadres de magnétisation rotatifs*




## Contrôles non destructifs sur tubes en acier soudés

a) Contrôle intégral comme pour les tubes sans soudure
b) Cordon de soudure, bout de tube SEP 1917 ou SEP 1916.

Les tubes soudés par pression sont fabriqués à partir de feuillards laminés à chaud et à froid. Les gros tubes soudés par fusion avec cordon de soudure longitudinal sont produits à partir de tôles laminées thermo-mécaniquement Les gros tubes soudés par fusion avec soudure hélicoïdale sont fait à partir de bandes larges. Alors que pour les tôles, il est habituel d'effectuer, dès la sortie du laminoir, un contrôle aux ultrasons de la surface et des bords, le contrôle de la matière en feuillards n'est le plus souvent réalisé que sur le tube fini soudé. Il est souvent judicieux pour les gros tubes à soudure longitudinale, de réaliser en supplément, un contrôle des arêtes des tôles pendant le contrôle des cordons de soudure.

Le contrôle non destructif sur les tubes soudés est effectué pour l'essentiel sur le cordon de soudure dans le sens longitudinal et transversal. Le contrôle interne et la surveillance du procédé de soudure ont lieu, pour les tubes soudés par induction à haute fréquence et les tubes soudés à cordon hélicoïdal, dans la ligne de soudure ; ceci avant le tronçonnage en tubes individuels et pour les tubes à soudure longitudinale avant même l'expansion. Cette surveillance du processus, après le contrôle par pression interne, s'intègre au contrôle de réception final non destructif. Les valeurs affichées par les ultra--sons sont évaluées par contrôle radiographique.