

# CONTROLES DES SOUDURES

***CODIFOR – AFPI INTERNATIONALE***

# SOMMAIRE

<b>1. ESSAIS DESTRUCTIFS .....</b>	<b>5</b>
1.1. ESSAI DE DURETE.....	5
1.1.1. Classification des essais de dureté .....	5
1.1.2. Essai par rebondissement .....	5
1.1.3. Essais de dureté par pénétration.....	5
1.1.4. L'essai Brinell .....	6
1.1.5. L'essai ROCKWELL .....	7
1.1.6. L'essai VICKERS.....	9
1.2. ESSAIS DE RESILIENCE.....	13
1.2.1. Principe de l'essai.....	13
1.2.2. Forme de l'entaille .....	14
1.2.3. Rôle du choc.....	14
1.2.4. Influence de la température.....	14
1.2.5. Niveau d'énergie et température de transition .....	15
1.2.6. Sécurité vis-à-vis de la rupture fragile .....	15
1.3. ESSAIS DE TRACTION .....	17
1.3.1. Généralités .....	17
1.3.2. Principe .....	17
1.3.3. Formes de dimensions de l'éprouvette.....	17
1.3.4. Résultat de l'essai .....	18
1.3.5. Formule résultant de l'essai.....	18
1.3.6. Etude du palier élastique .....	19
1.4. ESSAIS DE PLIAGE .....	21
1.4.1. Principe .....	21
1.4.2. Essais de pliage sur assemblages soudés.....	21
1.5. ESSAIS METALLOGRAPHIQUES .....	25
1.5.1. Examen macrographique .....	25
1.5.2. EXamen micrographique .....	27

<b>2. ESSAIS NON DESTRUCTIFS .....</b>	<b>30</b>
2.1. CONTROLE PAR ULTRASONS.....	30
2.1.1. Principe .....	30
2.1.2. Emission et réception des ondes ultrasons .....	31
2.1.3. Les différents types d'ondes utilisées .....	31
2.1.4. Le générateur d'ultrasons .....	33
2.1.5. Le détecteur ou palpeur.....	33
2.2. LE CONTROLE PAR RADIOGRAPHIE .....	34
2.2.1. Les sources de rayonnement .....	35
2.2.2. L'examen radiographique .....	36
2.3. CONTROLE PAR RESSUAGE .....	36
2.3.1. Ressuage colore.....	36
2.3.2. Méthode d'examen .....	37
2.3.3. L'interprétation.....	38
2.3.4. Les applications.....	38
2.3.5. Ressuage par fluorescence .....	38
2.4. LE CONTROLE PAR MAGNETOSCOPIE .....	38
2.4.1. Méthode d'examen .....	39
2.4.2. La détection .....	39
2.4.3. Les applications .....	40
2.5. CONTROLE PAR COURANTS DE FOUCAULT .....	40
2.5.1. La mesure .....	41
2.6. L'ECOUTE ACOUSTIQUE.....	41
2.6.1. Principe .....	41
2.6.2. Les applications.....	41
<b>3. L'ORGANISATION PROFESSIONNELLE .....</b>	<b>42</b>



# 1. ESSAIS DESTRUCTIFS

## 1.1. ESSAI DE DURETE

La dureté n'est pas une propriété simple des aciers mais elle caractérise la résistance à la déformation.

Les valeurs repères obtenues permettent des classements et peuvent être reliées dans une certaine mesure aux caractéristiques de traction.

La commodité des mesures et leur caractère semi-destructif justifient largement leur emploi surtout pour contrôler l'état d'un métal, en particulier les traitements thermiques. Il faut d'ailleurs noter que, dans certain cas, toute autre mesure est impossible (pièces non découpables, métal trop fragile ou encombrant.....).

***Le caractère conventionnel des mesures oblige pour conserver la reproductibilité et la fidélité à suivre des modes opératoires très précis, d'où la grande importance des normes dans ce domaine.***

### 1.1.1. Classification des essais de dureté

On distingue 3 groupes de méthodes de mesure suivant le principe utilisé :

- 1. Les essais par rebondissement**
- 2. Les essais de pénétration**
- 3. Les méthodes indirectes (magnétiques, ultrasons).**

Nous parlerons en particulier des essais de pénétration qui sont les plus importants, nous étudierons les problèmes de conversion entre chaque méthode et nous aborderons avec précaution la correspondance avec l'essai de traction.

### 1.1.2. Essai par rebondissement

L'essai consiste à mesurer la hauteur du rebondissement d'une bille tombant d'une certaine hauteur sur la surface du métal, en déterminant ainsi la capacité de restitution de l'énergie reçue au cours du choc.

L'essai SHORE reste le plus répandu. Une petite masse d'acier, terminée par un diamant ponctuel arrondi tombe d'une hauteur fixe en glissant dans un tube de verre, et rebondit sur la surface du métal. On mesure la hauteur du rebondissement le plus souvent à la volée, d'où un coefficient d'opérateur important. Cette méthode offre l'avantage d'être légère et mobile, d'où son utilisation sur chantier.

### 1.1.3. Essais de dureté par pénétration

Ce sont les essais les plus importants. Ils utilisent des pénétrateurs variés et des machines parfois très différentes mais ils ont en commun certains principes :

Il s'agit d'enfoncer un pénétrateur dans un métal à essayer, ce qui demande une charge d'autant plus forte que le métal est dur. Il s'agit donc d'essais de compression mais, pour des raisons de commodité, la charge est constante et l'on apprécie la dimension de l'empreinte.

L'empreinte est d'autant plus petite que le métal est plus dur.

On exprime la dureté sous forme du quotient de la force par la surface de l'empreinte :

$$H = F/S$$

Les divers systèmes se distinguent par le choix de la forme du pénétrateur et sa dimension, la force exercée, la mesure effectuée (surface de l'empreinte ou profondeur), la conversion en dureté grâce à la formule ou non.

Si on exprime la charge en Newtons et la surface en  $\text{mm}^2$ , on aurait tendance à exprimer la dureté en  $\text{N}/\text{mm}^2$  comme les caractéristiques de traction. Cette pratique dangereuse a été définitivement interdite par les normes qui considèrent avec raison les chiffres de dureté comme conventionnels et sans dimension, c'est-à-dire donnés par une échelle.

On distingue les essais suivants :

- L'essai Brinell qui utilise des billes
- Les essais Rockwell qui utilisent des billes ou des cônes
- Les essais Vickers qui utilisent des pyramides
- Les essais secondaires qui utilisent des pénétrateurs variés.

#### 1.1.4. L'essai Brinell

Une bille en acier extra dur, en acier trempé ou en carbure de tungstène de diamètre  $D$  (mm) est imprimée sur une portion plane de la pièce à étudier, sous l'action d'une charge  $F$  (daN). On détermine le diamètre de l'empreinte de la calotte sphérique fermée et on déduit la surface  $S$  ( $\text{mm}^2$ ). La dureté Brinell désignée par le symbole  $HB$  s'exprime par :

$$HB = 2 \frac{0.102 \times F}{\pi \times D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (F \text{ en Newtons})$$

Selon les métaux essayés, le diamètre de la bille et l'effort de pénétration varient. Il est recommandé d'utiliser.

<b>Matériaux</b>	<b>Diamètre de la bille D en mm</b>	<b>Force F en daN</b>
<b>Aciers</b> <b>Alliages de cuivre et nickel</b> <b>Les bronzes spéciaux</b> <b>Le mailleshort</b>	10 5 2.5 1	3 000 750 $187.5 F = 30 D^2$ 30
<b>Laitons</b> <b>Alliages légers</b>	10 5 2.5 1	1 000 250 $62.5 F = 10 D^2$ 10
<b>Cuivres</b> <b>Zinc</b> <b>Alliages légers type Dural</b>	10 5 2.5 1	500 125 $31.25 F = 5 D^2$ 5
<b>Alliages et métaux mous</b> <b>Etain</b> <b>Zinc</b>	10 5 2.5 1	200 50 $12.5 F = 2 D^2$ 2

La vitesse et la durée d'application de la charge ont une influence non négligeable sur le résultat obtenu.

Dans l'essai Brinell un certain nombre de précautions doivent être prises afin d'éviter de nombreuses causes d'erreurs.

**A)** enlever la croûte qui recouvre toute pièce de fonderie ou toute pièce ayant subi un traitement thermique

**B)** l'empreinte ayant autour d'elle un effet d'écrouissage il faudra espacer les emplacements des essais d'environ 3 fois le diamètre de l'empreinte et avoir une épaisseur de pièce au moins égale au double du diamètre de l'empreinte.

**C)** éviter l'emploi de cet essai pour les métaux très durs (H 500) car la bille se déforme.

### 1.1.5. L'essai ROCKWELL

Les machines ROCKWELL utilisent de petits pénétateurs avec des charges relativement faibles, elles sont donc compactes et assez commodes ; on ne mesure pas le diamètre de l'empreinte mais sa profondeur, avec un comparateur au micron.

La dureté s'exprime d'ailleurs directement en fonction de la profondeur et le cadran est gradué en conséquence.

Ce qui rend ces essais un peu plus délicats, c'est la nécessité d'une pré-charge pour mettre le comparateur à zéro.

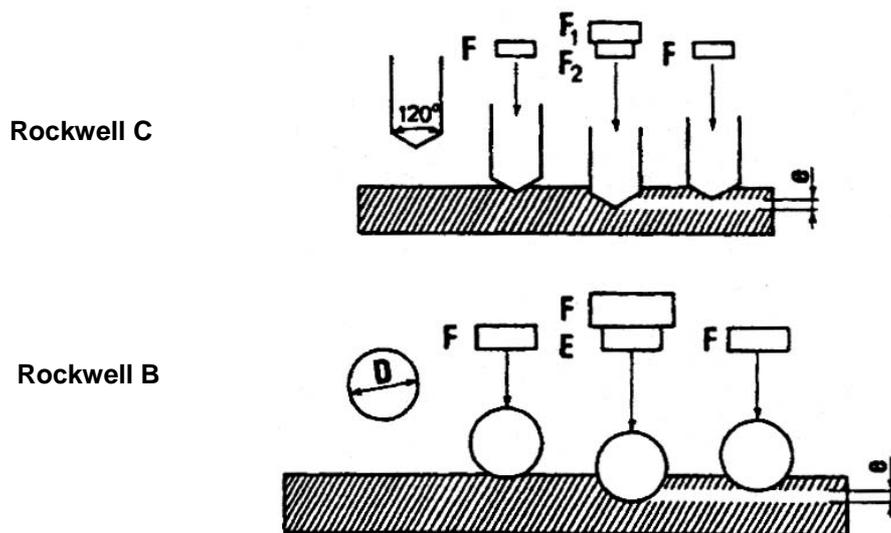
Un des avantages est la lecture directe de la dureté, donc il n'est pas besoin de tables. L'état de surface nécessaire doit être bien meilleur qu'en essai Brinell, de même le parallélisme des faces de l'échantillon ou du montage est important.

**Pour les essais ROCKWELL B et C la pré-charge est de 98 N.**

	<i>Pénétrateur</i>	<i>Charge totale</i>	<i>Lecture</i>
<b>ROCKWELL B</b>	Bille de 1/16e de pouce soit 1.59 mm	100 daN 980 N = 98 + 882	HRB = 100 - e
<b>ROCKWELL C</b>	Cône de diamant d'angle au sommet 120°, la pointe a un rayon de 0.2 mm	150 daN 1470 N = 98 + 1 372	HRC = 130 - e

**Remarque :** e est l'accroissement de profondeur exprimé en unités égales à 0.002 mm.

Le schéma de l'essai est donné sur la figure ci-dessous :



La mesure comporte :

- La mise en contact du pénétrateur à la surface grâce à la précharge avec mise au zéro de l'indicateur.
- L'imposition de la charge telle que : précharge + surcharge = charge totale.
- Puis retour à la précharge et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

**Application du procédé :**

- L'essai Rockwell B s'applique aux aciers dont la résistance est comprise entre 300 et 980 N/mm<sup>2</sup>.
- L'essai Rockwell C s'applique aux aciers dont la résistance est supérieure à 980 N/mm<sup>2</sup>.

**TABLEAU DES ESSAIS USUELS DE DURETE ROCKWELL**

Type	Symbole	Pénétrateur	Charge N (kgf)	Formule (F en newtons)	Unités	Observations
<b>Rockwell</b>	<b>B</b>	HRB	bille acier 1,5875 mm	98 + 882 = 980 (10 + 90 = 100)	HRB = 130 - e	sans
	<b>C</b>	HRC	cône diamant 120°	98 + 1 372 = 1 470 (10 + 140 = 150)	HRC = 100 - e	sans
<b>Rockwell 30 T</b>	HR 30 T	bille 1,5875 mm	29 + 265 = 294 (3 + 27 = 30)	HR 30 T = 100 - e	sans	Produits minces
<b>Rockwell 30 N</b>	HR 30 N	Cône diamant 120°	29 + 265 = 294 (3 + 27 = 30)	HR 30 N = 100 - e	sans	"

**1.1.6. L'essai VICKERS**

Cet essai s'apparente beaucoup à l'essai Brinell. On mesure les dimensions de l'empreinte laissée par un pénétrateur. Le pénétrateur à base carrée en diamant, d'angle au sommet 136°. La loi de similitude est automatiquement respectée; on obtient donc des empreintes géométriquement semblables quand on fait varier la charge, d'où une valeur sensiblement constante pour la dureté.

L'empreinte est carrée, on mesure, grâce à un microscope (en général incorporé à l'appareil), les 2 diagonales; la moyenne donne la dureté par la formule ci-après :

$$HV = 1.8544 \frac{0.102 F}{d^2} \text{ avec } F \text{ en Newton}$$

**d** : moyenne des 2 diagonales

Des tables donnent directement HV en fonction de **d** pour une valeur de **F**.

La charge la plus courante est 294 N (30 daN) mais on a intérêt à choisir une charge qui donne une empreinte de tailles suffisante. Les normes autorisent la gamme 49 à 980 N (5 à 100 daN).

Pour les contrôles de dureté des soudures, il est employé HV5 et HV10.

La préparation de la surface doit être soignée, ce qui oblige en général à une rectification et à un polissage de la surface. C'est le grand défaut de l'essai VICKERS qui est par contre certainement le plus précis.

**Remarque :**

la dureté Vickers sous faible charge, c'est à dire 0.98 N et 49 N (HV1 et HV5) est de plus en plus utilisée. Elle est réalisée sur des machines spéciales avec des microscopes grossissant davantage que les machines classiques. Cela permet des mesures locales (petites éprouvettes), des filiations de dureté surtout en zones affectées par la chaleur (soudure).

L'espace minimum entre deux essais est d'environ 2,5 x d.

### TABLEAU DES ESSAIS USUELS DE DURETE VICKERS

<i>Type</i>	<i>Symbole</i>	<i>Pénétrateur</i>	<i>Charge N (kgf)</i>	<i>Mesure</i>	<i>Formule</i>	<i>Unités</i>	<i>Observations</i>
<b>Vickers</b>	HV	pyramide diamant 136°	49 à 980 (5 à 100)	diagonale d mm	$HV = 2 \frac{0,102 F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2}$ $= 1,8544 \frac{0,102 F}{d^2}$	sans	
<b>Vickers sous faible charge</b>	HV	pyramide diamant angle 136°	0,98 à 49 N (100 à 5000 g)	d mm	$HV = 1,8544 \frac{0,102 F}{d^2}$	sans	duretés locales
<b>Microdureté</b>	HV	pyramide diamant angle 136°	< 0,98 N (< 100 g)	d mm	$HV = 1,8544 \frac{0,102 F}{d^2}$	sans	duretés sur phases microscopiques

**CONVERSION SELON NF A 3 - 172 ET NF A 3 -173**

DURETE HV F ≥ 98,1 N	DURETE HBS HBW	DURETE HRA	DURETE HRB	DURETE HRC	DURETE HRD	RESISTANCE A LA TRACTION R <sub>m</sub> (Mpa) N/mm <sup>2</sup>	DURETE HV F ≥ 98,1 N	DURETE HBS HBW	DURETE HRA	DURETE HRC	DURETE HRD	RESISTANCE A LA TRACTION R <sub>m</sub> (Mpa) N/mm <sup>2</sup>
80	76,0					280	350	332,5	68,1	35,5	51,9	1 120
85	80,7					310	360	342,0	68,7	36,6	52,8	1 160
90	85,5					320	370	351,5	69,2	37,7	53,8	1 190
95	90,2					340	380	361,0	69,8	38,8	54,4	1 220
100	95,0					350	390	370,5	70,3	39,8	55,2	1 260
105	99,8					370	400	380,0	70,8	40,8	56,0	1 290
110	104,5		62,0			380	410	389,5	71,4	41,8	56,8	1 330
115	109,3		64,6			390	420	399,5	71,8	42,7	57,5	1 360
120	114,0		67,0			410	430	408,5	72,0	43,6	58,2	1 400
125	118,8		69,0			420	440	418,0	72,3	44,5	58,8	1 430
130	123,5		71,0			440	450	423,0	73,3	45,3	59,4	1 470
135	128,3		73,1			450	460	432	73,6	46,1	60,1	1 500
140	133,0		75,1			470	470	442	74,1	46,9	60,7	1 540
145	137,8		77,0			480	480	450	74,5	47,7	61,3	1 570
150	142,5		78,8			500	490	456	74,9	48,4	61,6	1 610
155	147,3		80,5			510	500	466	75,3	49,1	62,2	1 650
160	152,0		82,1			530	510	475	75,7	49,8	62,9	1 680
165	156,8		83,5			540	520	483	76,1	50,5	63,5	1 720
170	161,5		85,0			550	530	492	76,4	51,1	63,9	1 760
175	166,3		86,1			570	540	500	76,7	51,7	64,4	1 790
180	171,0		87,3			580	550	509	77	52,3	64,8	1 830
185	175,8		88,5			600	560	517	77,4	53,0	65,4	1 870
190	180,5		89,6			610	570	526	77,8	53,6	65,8	1 910
195	185,3		90,7			630	580	535	78,0	54,1	66,2	1 940
200	190,0		91,8			650	590	543	78,4	54,7	66,7	1 980
205	194,8		92,8			660	600	552	78,6	55,2	67,0	2 020
210	199,5		93,7			680	610	560	78,9	55,7	67,5	2 060
215	204,3		94,6			690	620	569	79,2	56,3	67,9	2 100
220	209,0		95,5			710	630	577	79,5	56,8	68,3	2 140
225	213,8		96,3			720	640	586	79,8	57,3	68,7	2 180
230	218,5					740	650		80,0	57,8	69,0	2 220
235	223,3					750	660		80,3	58,3	69,4	
240	228	60,7		20,3	40,3	770	670		80,6	58,8	69,8	
245	232,8	61,2		21,3	41,1	780	680		80,8	59,2	70,1	
250	235,5	61,6		22,2	41,7	800	690		81,1	59,7	70,5	
255	242,2	62,0		23,1	42,2	820	700		81,3	60,1	70,8	
260	247,0	62,4		24,0	43,1	830	720		81,8	61,0	71,5	
265	251,7	62,7		24,8	43,7	850	740		82,2	61,8	72,1	
270	256,5	63,1		25,6	44,3	860	760		82,6	62,5	72,6	
275	261,2	63,5		26,4	44,9	880	780		83,0	63,3	73,3	
280	266,0	63,8		27,1	45,3	890	800		83,4	64,0	73,8	
285	270,7	64,2		27,8	46,0	910	820		83,8	64,7	74,3	
290	275,5	64,5		28,5	46,5	930	840		84,1	65,3	74,8	
295	280,2	64,8		29,2	47,1	940	860		84,4	65,9	75,3	
300	285,0	65,2		29,8	47,5	960	880		84,7	66,4	75,7	
310	294,5	65,8		31,0	48,4	990	900		85,0	67,0	76,1	
320	304	66,4		32,2	49,4	1020	920		85,3	67,5	76,5	
330	313,5	67,0		33,3	50,2	1060	940		85,6	68,0	76,9	
340	323,0	67,6		34,4	51,1	1090						

## 1.2. ESSAIS DE RESILIENCE

L'essai de résilience, ou de flexion par choc sur barreau entaillé, vise à reconstituer, sur un échantillon de faibles dimensions, le système de contraintes existant localement dans les zones critiques des constructions soudées. Il a pour but de déterminer l'absence de fragilité d'un métal donné ou la valeur de cette fragilité. Il permet d'apprécier le comportement de l'acier vis-à-vis de la rupture fragile.

### 1.2.1. Principe de l'essai

Cet essai consiste à rompre en un seul coup à l'aide d'une machine spéciale dite "Mouton pendule" une éprouvette carrée de 10 mm de côté, de section  $S_0$  au droit de l'entaille et de 55 mm de longueur.

L'éprouvette repose sur 2 appuis distants de 40 mm et l'entaille est située sur la face opposée au point d'impact.

La masse du pendule tombe d'une hauteur  $H$  et casse l'éprouvette en développant une énergie  $P \times H$  et remonte à une hauteur  $h$ .

On détermine le travail absorbé par la rupture de l'éprouvette:

$$W = P \times (H - h)$$

$W$  : en daJ

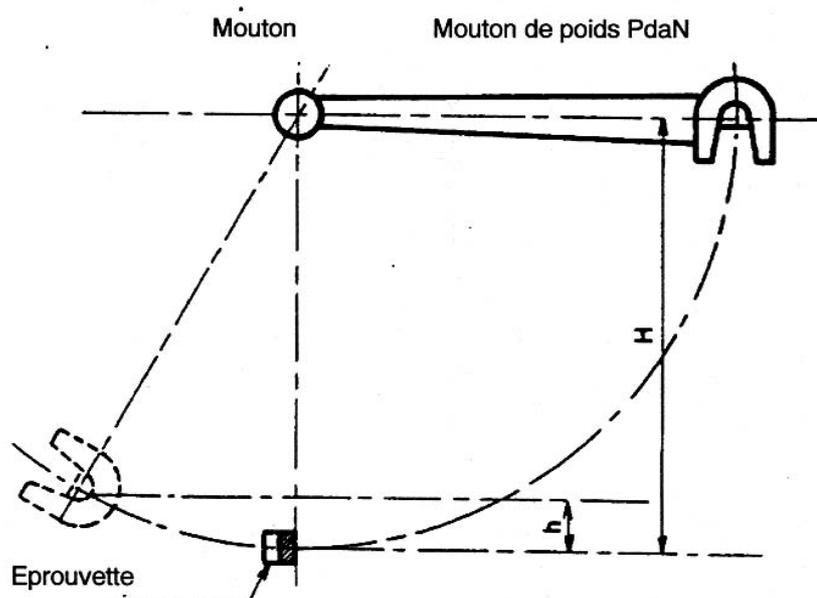
**LA RESILIENCE** désignée par le symbole **K** a pour valeur :

$$K = W / S_0$$

avec  $S_0$  section de l'éprouvette à l'entaille

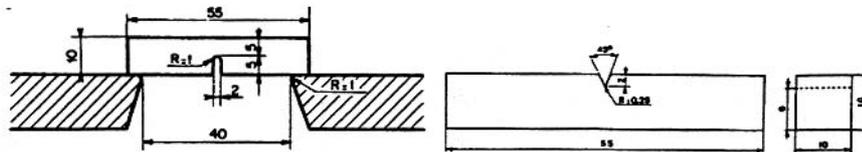
$K$  : en daJ/cm<sup>2</sup>

La vitesse du choc ne doit pas être inférieure à 5m/s.



**1.2.2. Forme de l'entaille**

L'entaille peut être en V ou en U (Kcv ou Kcu) et constitue un moyen simple de produire la pointe de contrainte responsable du déclenchement d'une rupture fragile.

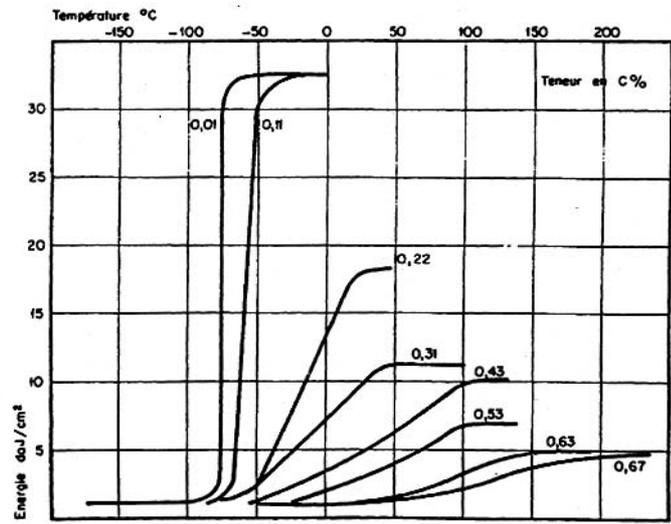


**1.2.3. Rôle du choc**

Un choc accentue l'effet d'entaille en retardant la déformation plastique par rapport à la déformation élastique. L'action du choc va également augmenter la contrainte en fond d'entaille puisque la déformation plastique à cet endroit intervient trop tard pour l'atténuer.

**1.2.4. Influence de la température**

La température à laquelle les mesures s'effectuent a également une grosse importance. En général la résilience est déterminée à la température ambiante (20°). Elle peut varier considérablement en fonction de la température et il est intéressant quand cela est possible d'établir la courbe K en fonction de la température.



## **INFLUENCE DE LA TENEUR EN CARBONE & DE LA TEMPERATURE SUR LA COURBE DE TRANSITION DE LA RESILIENCE**

L'application de cette courbe sert à la mettre en évidence la fragilité de l'acier lors de l'emploi de celui-ci dans des plages de températures variables.

### **1.2.5. Niveau d'énergie et température de transition**

La déformation plastique s'apprécie généralement par la valeur de l'énergie absorbée lors de la rupture.

Une absence de rupture entraînerait des perturbations (projection de l'éprouvette, coincement du balancier) excluant toute possibilité de mesure de l'énergie absorbée.

***On caractérise ainsi, par un essai de choc entraînant la rupture, l'aptitude d'un acier à supporter une formation plastique lente destinée, précisément, à éviter la rupture.***

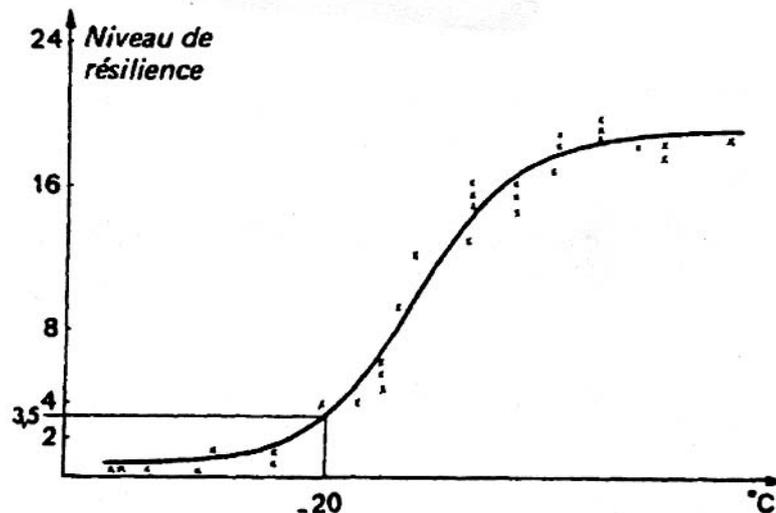
Pour être représentatif du phénomène étudié, la zone de déformation plastique doit être très localisée. En conséquence, le niveau d'énergie qui lui correspond ne doit pas être trop élevé. Le code SNCT de construction des appareils à pression a retenu le niveau de 3.5 daJ/cm<sup>2</sup> pour les aciers alliés dont la résistance minimale va de 37 à 48 daN/mm<sup>2</sup> et le niveau 5 daJ/cm<sup>2</sup> pour les aciers au carbone manganèse dont la résistance minimale atteint 52 daN/mm<sup>2</sup>.

### **1.2.6. Sécurité vis-à-vis de la rupture fragile**

***Rappel*** : La rupture fragile prend naissance en des points singuliers de la construction et se propage à très grande vitesse ***sans être accompagnée d'une déformation notable du métal.***

Les premières ruptures fragiles furent consécutives à un abaissement de la température de l'ouvrage et les essais sur éprouvettes ont, ensuite, confirmé l'influence exercée par la température sur le mode de rupture "***ductile ou fragile***" du métal.

Cette influence a conduit à définir ***une température de transition***, marquant le passage de la rupture ductile à la rupture fragile.

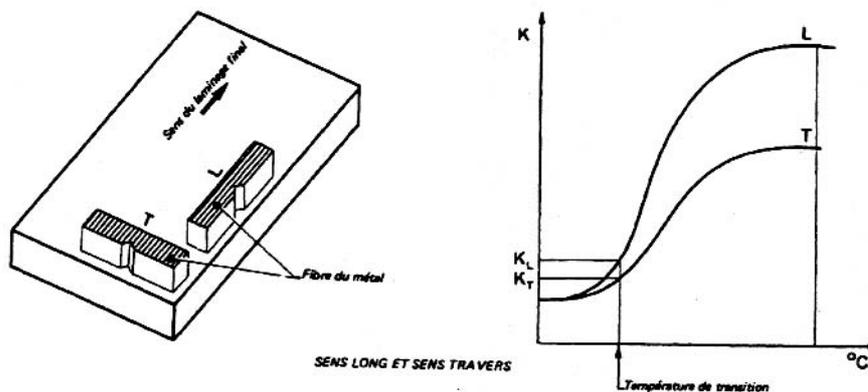


La température de transition correspondant au niveau 3,5 daJ est, dans ce cas de figure, exactement égale à  $-20^{\circ}\text{C}$

### COURBE DE TRANSITION TRACEE PAR POINTS

L'appréciation du comportement de l'acier vis-à-vis de la rupture fragile implique alors la détermination de la température à laquelle le niveau d'énergie conventionnel de 3,5 ou 5 daJ/cm<sup>2</sup>, est obtenu.

La recherche de la température correspondant au niveau retenu peut nécessiter l'exécution de nombreuses éprouvettes, en raison des tâtonnements qu'elle impose. Pour cette raison, elle n'est pas pratiquée lors des essais de réception, où l'on se contente de vérifier que le niveau d'énergie, obtenu à une température préalablement fixée, est supérieur à la valeur imposée 3.5 ou 5 daJ/cm<sup>2</sup>. Cette recherche s'effectue en revanche couramment lors des essais d'homologation d'une nouvelle nuance d'acier. On trace à ce moment, la courbe de transition du métal qui pourra être ultérieurement utilisée à des fins de comparaison.



## 1.3. ESSAIS DE TRACTION

### 1.3.1. Généralités

L'essai de traction constitue l'essai mécanique le plus classique et le mieux étudié. Il permet de déterminer, la charge de rupture R, la limite élastique E, les allongements A% et la striction  $\Sigma$  %; il renseigne sur la ductilité statique.

### 1.3.2. Principe

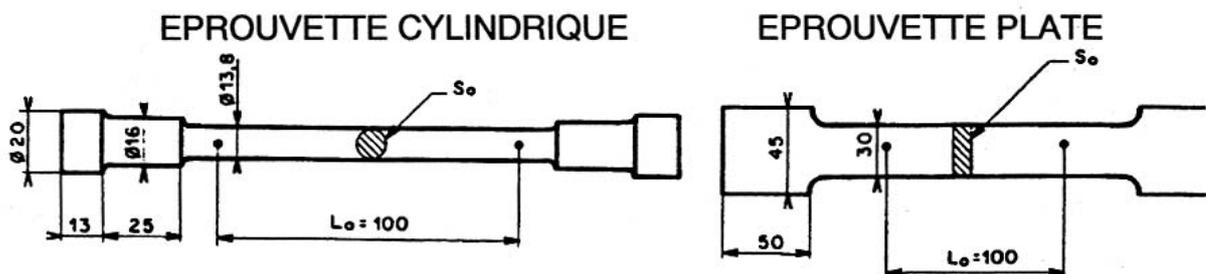
Il consiste à soumettre une éprouvette de forme et de dimensions déterminées à un effort de traction exercé selon son axe longitudinal. L'effort est progressivement croissant et il est poursuivi jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

### 1.3.3. Formes de dimensions de l'éprouvette

L'essai est en général fait, sauf indication contraire sur une éprouvette cylindrique de 13.85 mm de diamètre (section 150 mm<sup>2</sup>) comportant deux repères distants de 100 mm.

On peut utiliser des éprouvettes plates dont la largeur uniforme est de :

- 30 mm pour les épaisseurs comprises entre 3 et 10 mm
- 25 mm pour les épaisseurs comprises entre 11 et 20 mm
- 20 mm pour les épaisseurs comprises entre 21 et 37 mm
- 15 mm pour les épaisseurs comprises entre 38 et 49 mm
- 12 mm pour les épaisseurs comprises entre 50 et 60 mm



Lorsque la section et la longueur ne sont pas conformes aux valeurs de la norme, alors la relation suivante doit être vérifiée :

$$L = \sqrt{66.67 \times S}$$

**1.3.4. Résultat de l'essai**

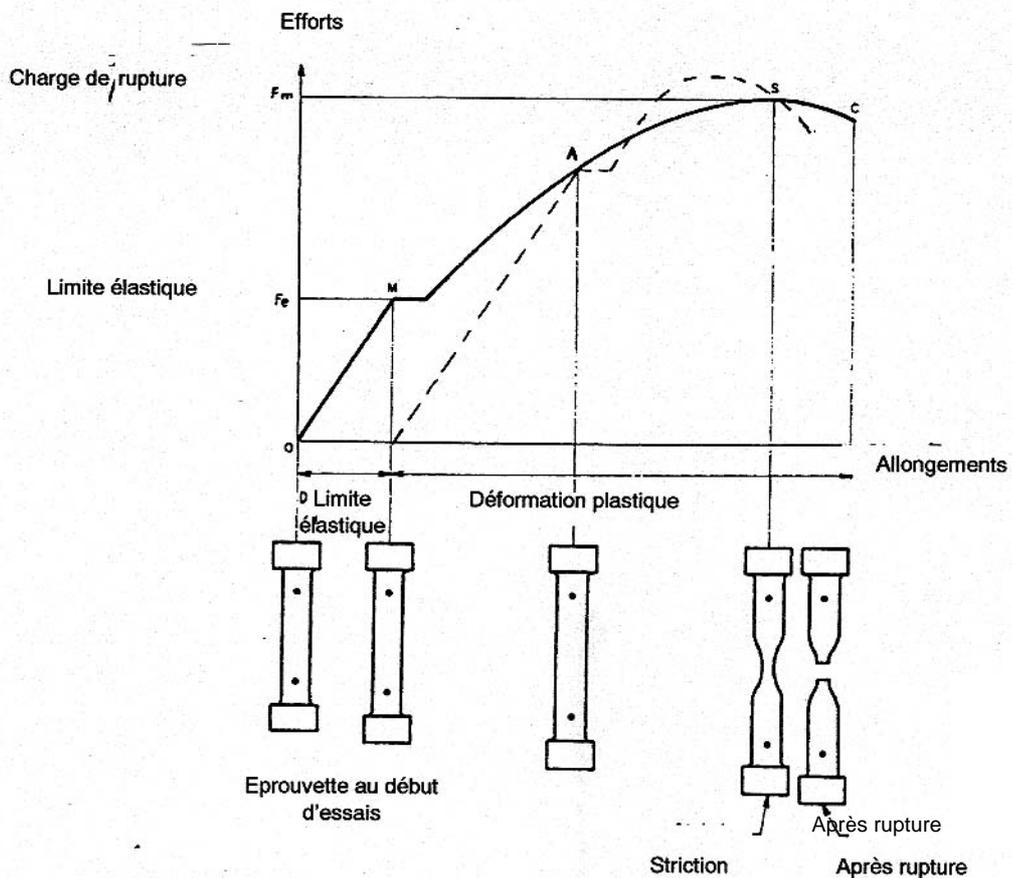
Un diagramme de traction présente toujours la même allure.

Entre O et M les déformations sont proportionnelles aux efforts, période ELASTIQUE.

Entre M et S l'éprouvette s'allonge et le métal se déforme plastiquement. La courbe passe par un maximum au point S.

Au-delà du maximum apparaît la phase de striction caractérisée par une diminution locale de la section S de l'éprouvette.

Au point C s'achève la courbe de traction avec la rupture de l'éprouvette.



**1.3.5. Formule resultant de l'essai**

La limite élastique L'allongement % La striction La résistance maximum

$$E = \frac{Fe}{So} \quad A\% = \frac{L - Lo}{Lo} \times 100 \quad \Sigma = \frac{So - S}{So} \times 100 \quad R = \frac{Fm}{So}$$

## REMARQUE IMPORTANTE

*Soit la courbe tracée en pointillé:* Si arrivé en un point A de la déformation plastique, on supprime la charge, le point représentatif du diagramme efforts-déformations descend parallèlement à la droite OM. La remise en charge de l'éprouvette n'entraîne pas de déformation plastique avant que la charge maximale précédente ne soit atteinte.

On constate :

- que la limite élastique du métal s'est élevée de façon importante.
- que la charge de rupture a légèrement augmenté.
- que l'allongement du métal à diminué.

Le phénomène s'appelle **l'écrouissage**. Il réduit la malléabilité du métal mais élève sa limite élastique. Le réseau cristallin du métal écroui est légèrement déformé, il peut retrouver sa capacité de déformation initiale à la suite d'un traitement thermique dit de recristallisation. Ce traitement provoque la germinisation puis la croissance de nouveaux cristaux à partir des cristaux écrouis.

### 1.3.6. Etude du palier élastique

#### 1.3.6.1. Cas de courbes à palier

On distingue sur ces trois courbes 3 zones :

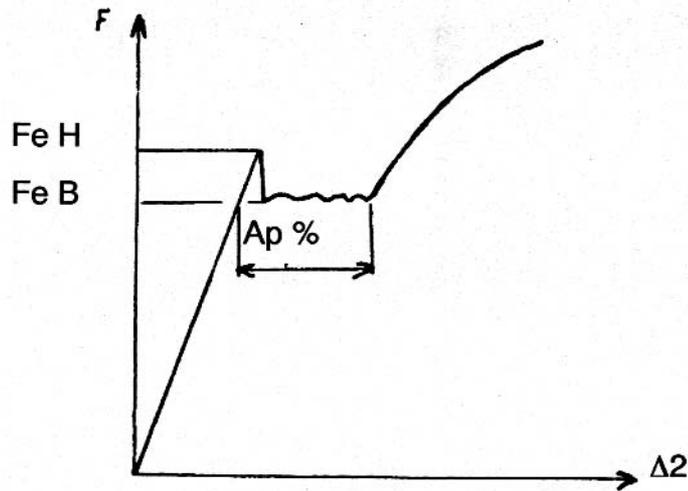
- la limite élastique  $F_{eH}$
- la limite élastique  $F_{eB}$
- la longueur du palier  $A_p\%$

Lors des essais courants, on n'observe pas toujours de limite supérieure car elle est très sensible aux conditions d'essai et à la qualité de l'éprouvette.

La limite inférieure est moins sensible aux défauts géométriques de l'éprouvette, mais le palier est rarement horizontal en raison des irrégularités de propagation des bandes de *Piobert-Luders*.

Les phénomènes du palier correspondent à une déformation hétérogène de l'éprouvette, c'est à dire à la naissance d'une petite zone déformée locale, en général près des têtes de l'éprouvette, qui traverse la largeur de l'éprouvette puis se propage ensuite à tout le volume de l'éprouvette. La charge recommencera à croître quand toute l'éprouvette sera déformée d'une façon homogène.

Le front ou les fronts de la zone déformée, qui progressent, ont des formes géométriques simples, ce sont en général des droites. S'il y a plusieurs fronts, on observe tout un réseau de lignes que l'on désigne sous le nom de *Piobert-Luders*.



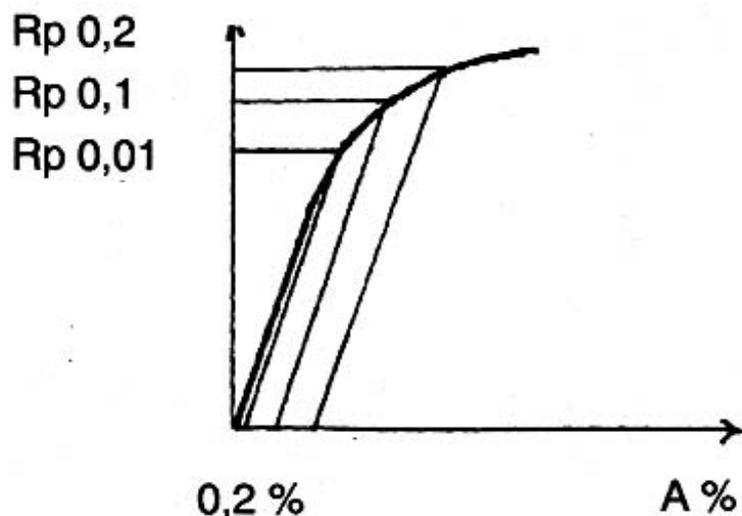
### 1.3.6.2. Cas de courbes sans palier

Comme le montre la figure ci-dessous, il y a passage progressif de l'élasticité linéaire à la déformation plastique. La limite d'élasticité pourrait être égale à la limite de proportionnalité, mais au fur et à mesure que l'on amplifie l'enregistrement de l'allongement pour mieux voir cette limite, on met en évidence le manque de linéarité de la montée élastique pour des raisons d'imperfections d'éprouvette et de non-obéissance rigoureuse à la loi de HOOKE.

Dans ce cas, il est préférable de définir des limites conventionnelles où l'on apprécie un allongement permanent faible mais mesurable avec précision comme 0.2% par exemple.

**ON DEFINIT DES LIMITES CONVENTIONNELLES A 0.2% OU 0.1%.**

L'emploi le plus répandu est R 0,02 (Rp 0.2%). Cette limite conventionnelle s'obtient alors en traçant par la valeur d'allongement choisie une parallèle à la montée élastique.



## **1.4. ESSAIS DE PLIAGE**

L'essai de pliage consiste à soumettre une éprouvette à section plane à une déformation plastique progressive sans choc, par pliage et sans inversion de sens au cours de l'essai.

### **1.4.1. Principe**

L'éprouvette placée sur des rouleaux correctement espacés est soumise dans sa partie centrale à l'action verticale du poinçon d'une machine.

L'éprouvette est pliée jusqu'à ce que l'une des branches fasse avec le prolongement de l'autre un angle  $\alpha$  désiré. En général l'angle de pliage est  $180^\circ$ .

La qualité de l'essai de pliage est jugée d'après l'angle de pliage atteint sans fissuration. Un pliage sans fissuration à  $180^\circ$  est l'indice d'une grande ductilité du métal. Si une rupture se produit avant le pliage total, elle peut être due à la fragilité du métal ou à la présence de défauts.

Sur les éprouvettes soudées, on distingue le pliage transversal (par rapport à la soudure), le pliage longitudinal, le pliage envers (poinçon a l'envers de la soudure), le pliage endroit.

Les conditions d'essai (écartement des rouleaux, dimensions du poinçon etc, ... ) sont fixées par les normes appropriées et les codes de construction compte tenu de la nature du métal à essayer.

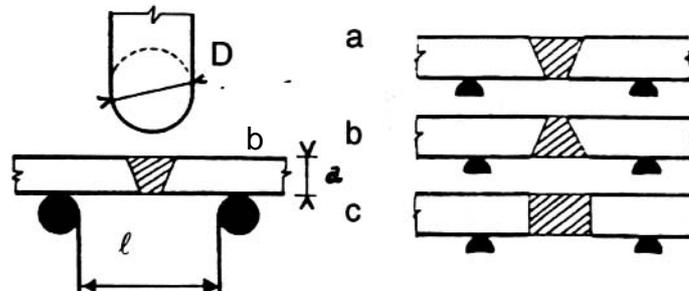
#### **Condition de l'essai :**

- L'essai peut être réalisé à chaud ou a froid suivant la spécification demandée.
- La section de l'éprouvette est généralement rectangulaire pour les tôles.
- Largeur de 25 a 50 mm.

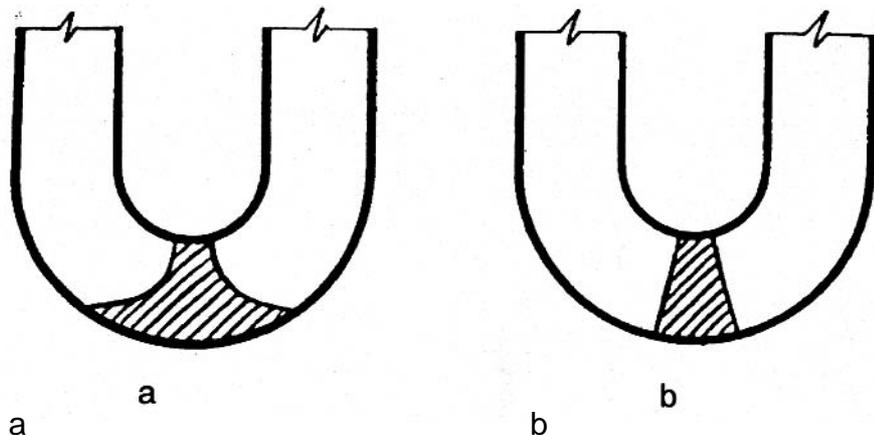
### **1.4.2. Essais de pliage sur assemblages soudés.**

L'application des essais de pliage classiques aux assemblages soudés présente aussi des difficultés associées à la plus ou moins grande hétérogénéité des assemblages à éprouver. Néanmoins, en raison de sa simplicité de mise en oeuvre et des possibilités qu'il offre quant à l'évaluation de la qualité des soudures, l'essai de pliage est très largement utilisé, surtout sur les éprouvettes transversales.

Dans les deux cas de pliage, la sur épaisseur et le bourrelet de pénétration sont arases, en raison de la difficulté d'exécution de l'essai qu'entraîne leur présence.

**Schéma :**

L'essai de pliage transversal (voir ci-dessus) se pratique de manière a ce que soit mis en tension soit à l'endroit (a) soit à l'envers (b), soit encore la surface d'une tranche (c) de l'assemblage essayé. L'angle de pliage imposé est de  $180^\circ$ , une fois cet angle obtenu, on examine l'aspect de la partie tendue ou débouchent les éventuels défauts. En fait, l'essai n'a de sens que si l'allongement au niveau de la partie tendue est à peu près uniforme dans la zone fondue et le métal de base voisin. Dans le cas contraire, l'un des d'eux subit une déformation excessive par rapport à l'autre (voir figure ci-dessous).

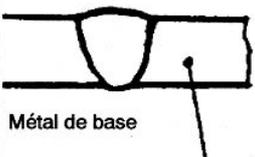
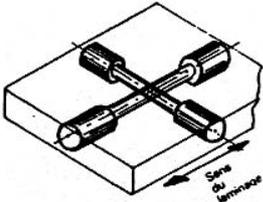
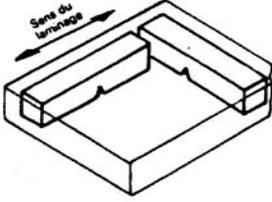
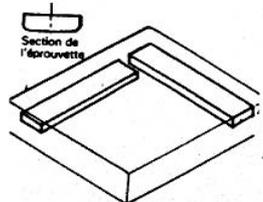
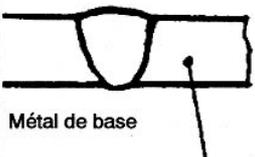
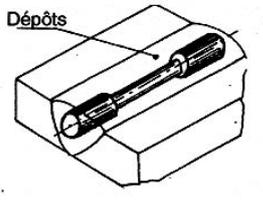
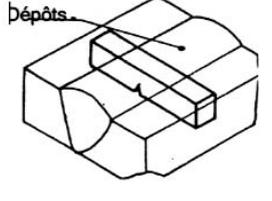
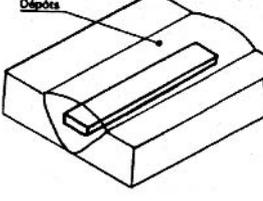
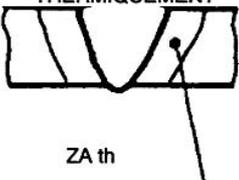
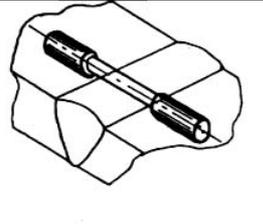
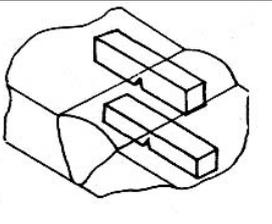
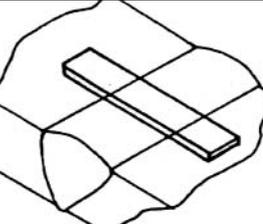


Pour remédier à une telle situation, certaines normes préconisent, dans le cas d'une telle hétérogénéité d'allongement entre métal de base et métal fondu, de pratiquer l'essai de pliage longitudinal. Dans ce cas, la zone fondue occupe l'axe du poinçon.

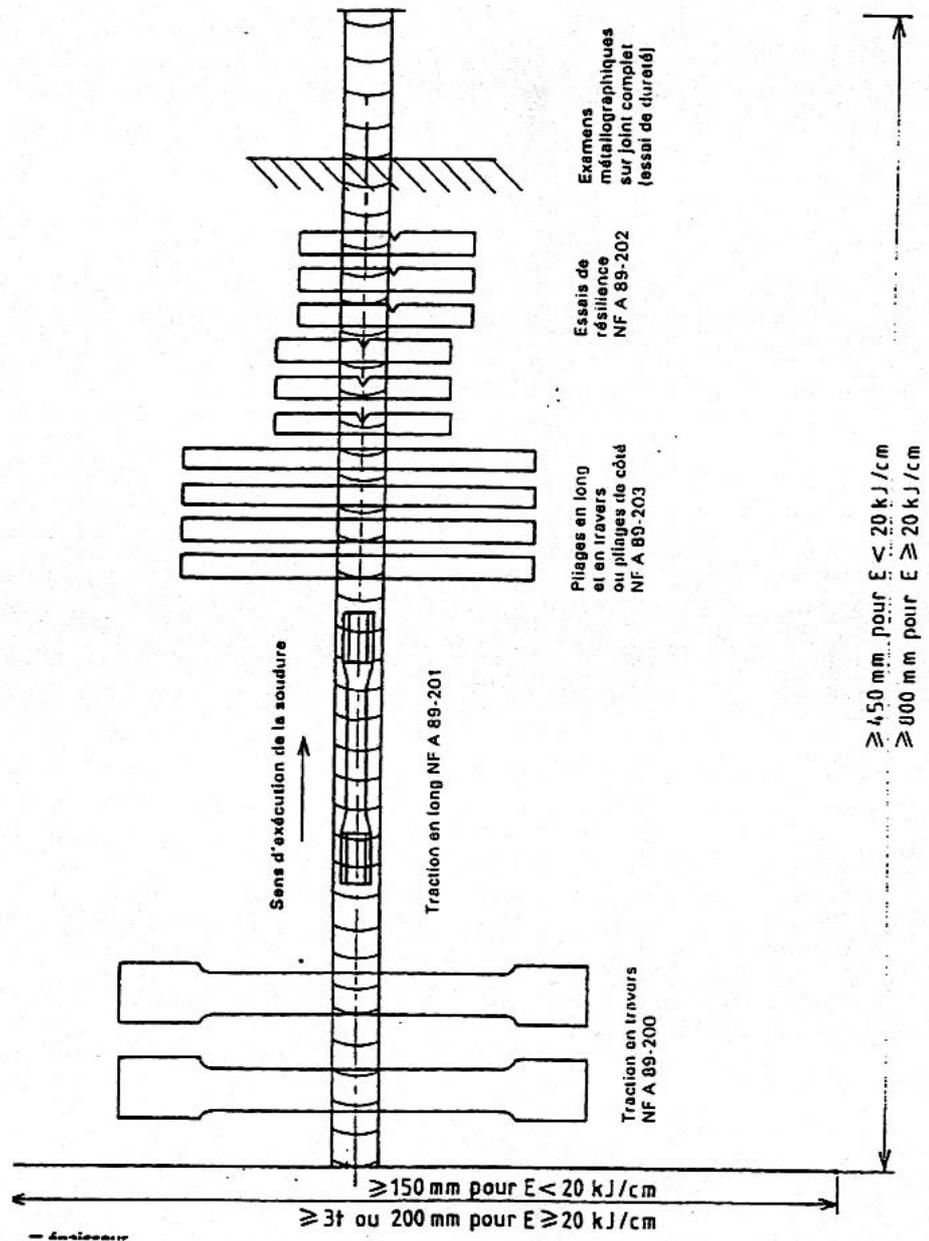
### **EXEMPLES DES EMBLEMES DES EPROUVETTES DANS LES DIFFERENTS ESSAIS**

Les éprouvettes peuvent être usinées dans une chute du métal devant servir à la construction de l'ouvrage. En soudage, la position de l'éprouvette par rapport à

l'assemblage permet de tester le métal de base, le métal déposé, ou la zone affectée thermiquement.

<b>Position</b>	<b>Essai de traction</b>	<b>Essai de résilience KCV</b>	<b>Essai de pliage</b>
<p>MÉTAL DE BASE</p>  <p>Métal de base</p>			
<p>MÉTAL DE BASE</p>  <p>Métal de base</p>	<p>Dépôts</p> 	<p>Dépôts</p> 	<p>Dépôts</p> 
<p>ZONE AFFECTÉE THERMIQUEMENT</p>  <p>ZA th</p>			

## DISPOSITION DES EPROUVETTES POUR ASSEMBLAGES DE QUALIFICATION BOUT A BOUT



t = épaisseur

E = énergie de soudage en kJ/cm

## 1.5. ESSAIS METALLOGRAPHIQUES

La connaissance des propriétés d'un matériau passe par la détermination de la structure qui la compose. Cette structure dépend de l'échelle à laquelle on l'observe. Il est donc important de préciser s'il s'agit d'une :

- structure macroscopique
- structure microscopique
- structure cristalline

### 1.5.1. Examen macrographique

#### 1.5.1.1. Principe

L'examen macroscopique utilise l'oeil nu, une loupe binoculaire ou un banc macrographique, conduisant à un faible grossissement. (< 100). Les observations se font soit sur des pièces polies attaquées ou non chimiquement.

La macrographie met en évidence :

- la grosseur et la forme des grains
- les traitements mécaniques
- la répartition d'inclusions ou cavités
- la structure dendritique

L'essai dépend de la qualité d'usinage de la pièce, cette opération comprend :

- un polissage avec rectification à la meule fine ou papier émeri à grain fin.
- une attaque de la face polie avec un réactif approprié au métal considéré
- un examen visuel ou à la loupe

### 1.5.1.2. Tableaux des Acides

#### Acides minéraux forts

<i>Nature de l'attaque</i>	<i>Composition</i> ∅	<i>∅</i>	<i>Durée d'attaque</i>
<b>Attaque chlorhydrique</b>	HCl (ρ <sub>20</sub> 1,19 g/ml) H <sub>2</sub> O à utiliser à 80°C ou ébullition	1 volume 1 volume	1 heure à 80° C ou ébullition
<b>Attaque sulfurique</b>	H <sub>2</sub> O SO <sub>4</sub> (ρ <sub>20</sub> 1,84 g/ml) H <sub>2</sub> O utilisé à froid ou à 70 °C	15 volumes 85 volumes	12 heures à froid 30 mn à 70° C
<b>Attaque à l'eau régale</b>	HCl (ρ <sub>20</sub> 1,19 g/ml) HNO <sub>2</sub> (ρ <sub>20</sub> 1,33 g/ml) 1 volume utilisé à 60° C	3 volumes 1 volume	quelques minutes à 60° C

### 1.5.1.3. Sels de cuivre

<i>Nature de l'attaque</i>	<i>Composition</i>	<i>∅</i>	<i>Durée d'attaque</i>
<b>Attaque OBERHOFFER</b>	Chlorure cuivrique Chlorure ferrique Chlorure stanneux Acide chlorhydrique (ρ <sub>20</sub> 1,19 g/ml) Eau Alcool éthylique	1 g 30 g 0,5 g 50 ml 50 ml 500 ml	10 min à 20 min
<b>Attaque STEAD</b>	Chlorure cuivrique Chlorure de magnésium Acide chlorhydrique (ρ <sub>20</sub> 1,19 g/ml) Eau Alcool éthylique	5 g 4 g 1 ml 20 ml 100 ml	10 min à 20 min
<b>Attaque LE CHATELIER DUPUY</b>	Chlorure cuivrique Acide chlorhydrique (ρ <sub>20</sub> 1,19 g/ml) Acide picrique Eau Alcool éthylique	1 g 1,5 à 2,5 ml suivant l'acier 0,5 g 10 ml 100 ml	10 min à 20 min
<b>Attaque FRY n° 1</b>	Chlorure cuivrique Acide chlorhydrique (ρ <sub>20</sub> 1,19 g/ml) Eau Alcool éthylique	1,5 g 30 ml 95 ml 30 ml	30 s à 5 min
<b>Attaque FRY n° 4</b>	Chlorure cuivrique Acide chlorhydrique (ρ <sub>20</sub> 1,19 g/ml) Eau	90 g 120 ml 100 ml	30 s à 30 min

## **1.5.2. EXamen micrographique**

### **1.5.2.1. Principe**

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon. Pour cela, on procède à l'examen au microscope par réflexion d'une surface polie et généralement attaquée.

Une opération de micrographie comprend :

- un prélèvement de l'échantillon
- un polissage
- une attaque au réactif approprié
- un examen microscopique (de 50 à 600 fois)

### **1.5.2.2. Prélèvement de L'échantillon**

Des précautions devront être prises pour éviter toute modification de la structure du métal.

Le prélèvement se pratique le plus souvent à la scie et l'on obtient généralement un cube de 10 à 15 mm de côté. Il sera très souvent enrobé dans une matière plastique, ce qui facilite le travail de polissage.

### **1.5.2.3. Polissage**

Le polissage se fait généralement en 2 étapes :

- prépolissage
- polissage de finition

#### **Le prépolissage**

Il se fait par frottement de l'échantillon sur les papiers abrasifs à granulométrie de plus en plus fine (de 120 à 500).

**Polissage à l'alumine** : ce polissage consiste à frotter l'échantillon sur des disques de feutre imbibés d'une suspension d'alumine.

**Polissage à la pâte diamantée** : ce polissage se fait comme précédemment, l'agent de polissage étant la pâte diamantée.

### 1.5.2.4. Attaque aux Réactifs

L'attaque a pour but de révéler les joints des cristaux et de différencier les constituants de l'alliage.

Les réactifs sont des solutions aqueuses ou alcooliques suffisamment diluées afin que l'attaque soit lente.

Pour arrêter l'attaque, on lave soigneusement l'échantillon dans un courant d'eau suivi d'un séchage à air chaud.

### Examen microscopique

On utilise des grossissements appropriés, à la lecture recherchée. Cet examen est souvent accompagné de la prise d'une photographie.

### 1.5.2.5. Tableau des réactifs d'attaque

DESIGNATION	COMPOSITION	DOMAINE D'APPLICATION	ANCIEN NOM
<b>C1 : solution alcoolique nitrique</b>	2 à 5 ml d'acide nitrique ( $\rho_{20} = 1,33$ g/ml) 100 ml d'éthanol pur (si possible) Durée d'attaque : 5 à 1,5 min ( $\theta$ ambiante)	Examen des structures des - aciers au carbone faiblement alliés - aciers alliés	NITAL
<b>C2 : solution alcoolique d'acide picrique</b>	4 g d'acide picrique (cristallisé) 100 ml d'alcool Durée d'attaque : 15 à 40 s ( $\theta$ ambiante)	Examen des structures des - aciers au carbone faiblement alliés - aciers alliés	PICRAL
<b>C3 : réactif au ferricyanure de potassium alcalin</b>	10 g de ferricyanure de potassium 10 g d'hydroxyde de sodium (soude caustique) 100 ml d'eau (à utiliser fraîchement préparée) Durée d'attaque : 30 s à 5 min	Mise en évidence des carbures de la phase sigma de la ferrite des - aciers inoxydables - aciers au chrome - aciers hypereutectoïdes	MURAKAMI
<b>C4 : eau régale glycinée</b>	1 volume d'acide nitrique ( $\rho_{20} = 1,33$ g/ml) 2 à 3 volumes d'acide chlorhydrique 2 à 3 volumes de glycérine (à utiliser fraîchement préparée) Durée d'attaque : 30 s à 5 min ( $\theta$ ambiante)	Examen de la structure des - aciers inoxydables - aciers réfractaires - aciers au chrome et chrome-nickel - alliages ferrocromes	
<b>C5 : solution alcoolique d'acide nitrofluorhydrique</b>	15 ml d'acide fluorhydrique 5 ml d'acide nitrique concentré 80 ml d'éthanol Durée d'attaque : 2 à 5 min à ébullition	Examen de la structure des - aciers inoxydables austénitiques à haute teneur en chrome - aciers réfractaires	
<b>C6 : réactif au persulfate d'ammonium</b>	10 g de persulfate d'ammonium 100 ml d'eau Durée d'attaque : 15 s à 2 min ( $\theta$ ambiante)	Examen de la structure des - aciers alliés - aciers inoxydables	RAWDON HANEMAN SCHRADER
<b>C7 : réactif au chlorure ferrique et à l'acide chlorhydrique en solution aqueuse</b>	10 g de chlorure ferrique 30 ml d'acide chlorhydrique ( $\rho_{20} = 1,19$ g/ml) 120 ml d'eau Durée d'attaque : 30 s à $\theta$ ambiante	Examen de la structure des - aciers inoxydables austénitiques - alliages et aciers réfractaires	CURRAN
<b>C8 : solution aqueuse saturée d'acide picrique</b>	solution saturée d'acide picrique 0,5 % à 5 % d'alkylsulfonate de sodium Durée d'attaque : 30 s à 2 min ( $\theta$ ambiante)	Mise en évidence - du grain austénitique (aciers trempés et revenus) - de la cémentite dans le cas des aciers extra-doux	ROBIN GARTNER
<b>C9 : solution alcoolique d'acide picrique et d'acide chlorhydrique</b>	1 g d'acide picrique (cristallisé) 5 ml d'acide chlorhydrique ( $\rho_{20} = 1,19$ g/ml) 100 ml d'éthanol Durée d'attaque : de 20 s à quelques minutes	Examen de la structure des - aciers inoxydables - aciers réfractaires - aciers au chrome à l'état trempé	VILELLA

<b>DESIGNATION</b>	<b>COMPOSITION</b>	<b>DOMAINE D'APPLICATION</b>	<b>ANCIEN NOM</b>
<b>C 10 : solution alcoolique d'acide chlorhydrique</b>	solution de 10 à 20 % d'acide chlorhydrique ( $\rho_{20} = 1,19$ g/ml) dans l'éthanol Durée d'attaque : 3 à 30 min	Examen des grains austénitiques des - aciers inoxydables - aciers au chrome	KALLING PAGELS
<b>C11 : réactif au permanganate de potassium alcalin</b>	4 à 10 g de permanganate de potassium 1 à 10 g d'hydroxyde de potassium 80 à 100 ml d'eau Durée d'attaque : 1 à 5 min d'ébullition	Mise en évidence de la phase sigma et des carbures alliés des - aciers alliés - aciers inoxydables et réfractaires	GROESBECK
<b>C 12 : solution alcaline de picrate de sodium</b>	2 g d'acide picrique (cristallisé) 25 g d'hydroxyde de sodium (soude) 100 ml d'eau Durée d'attaque : 30 s à 10 min à ébullition	Mise en évidence par coloration de la cémentite ou des carbures des - aciers de construction - aciers de cémentation - aciers hypereutectoïdes	LE CHATELIER IGEVSKI
<b>C12 : réactif au sulfate de cuivre acide</b>	20 ml d'acide chlorhydrique ( $\rho_{20} = 1,19$ g/ml) 4 g de sulfate de cuivre 20 ml d'eau Durée d'attaque : 2 à 5 min ( $\theta$ ambiante)	Examen de la structure des - aciers inoxydables austénitiques - aciers réfractaires	MARBLE

## 2. ESSAIS NON DESTRUCTIFS

### 2.1. CONTROLE PAR ULTRASONS

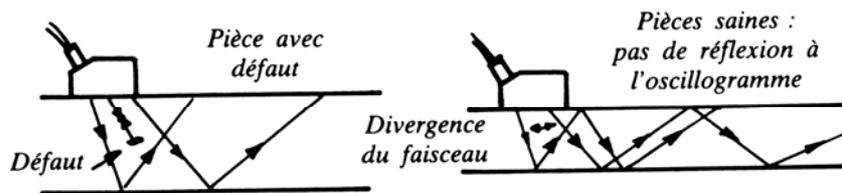
#### 2.1.1. Principe

Le contrôle par ultrasons fait appel à des vibrations mécaniques qui ébranlent de proche en proche le matériau examiner.

L'ondée créée se propage à grande vitesse dans tout le volume de la pièce, se rétracte, se réfléchit, se diffuse au contact des interfaces. Les interfaces modifient le sens de la vitesse de propagation en fonction de leur nature dont on peut citer quelques exemples :

- manque de matière : fissures, cavités.
- corps étrangers
- textures métallurgiques liées au laminage et à l'état d'écroissage
- structures métallurgiques : zones fondues des soudures des aciers austénitiques.

L'analyse des signaux issus des interfaces est un sujet complexe mobilisant de nombreuses équipes de recherche. Au stade industriel, le procédé est néanmoins exploité à partir de paramètres relativement simples.



### **2.1.2. Emission et réception des ondes ultrasons**

Le phénomène le plus utilisé pour l'émission d'ondes ultrasonores est la piézoélectricité. Cette propriété appartient aux cristaux naturels tels que le quartz ou artificiels. Sous l'action d'une impulsion électrique de tension, ces matériaux se contractent ou se dilatent produisant ainsi une déformation mécanique transmissible au sein des matériaux.

L'émission est séquentielle. La fréquence de récurrence courante est de l'ordre de 1 000 à 2 000 Hz. A la réception, le phénomène inverse est mis en oeuvre. L'onde réfléchi par une discontinuité revient généralement dans la direction d'émission et provoque à son tour une déformation mécanique des faces du cristal, générant un signal électrique. Dans les appareils à ultrasons les périodes d'interruption de l'émission sont mises à profit pour être en écoute des signaux réfléchis. Le domaine de fréquence pour l'émission va de 0,5 MHz à 25 MHz dans les applications industrielles.

Le palpeur réunissant émetteur et récepteur confondus est un boîtier de petites dimensions tenu et manipulé à la main par un opérateur. La transmission des ondes ultrasonores dans le matériau s'effectue par l'intermédiaire d'un couplant qui peut être de l'eau, de la graisse, de l'huile ou de la colle.

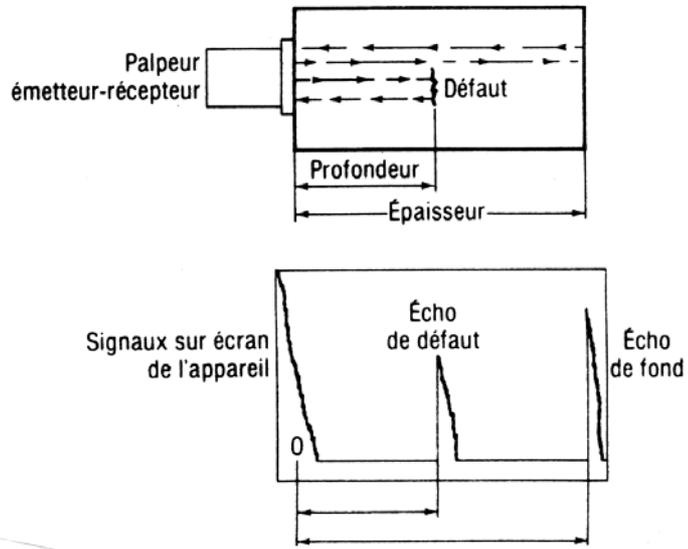
### **2.1.3. Les différents types d'ondes utilisées**

On distingue les ondes longitudinales, les ondes transversales qui intéressent le volume de la pièce. Les ondes de surface n'intéressent que la couche superficielle du matériau.

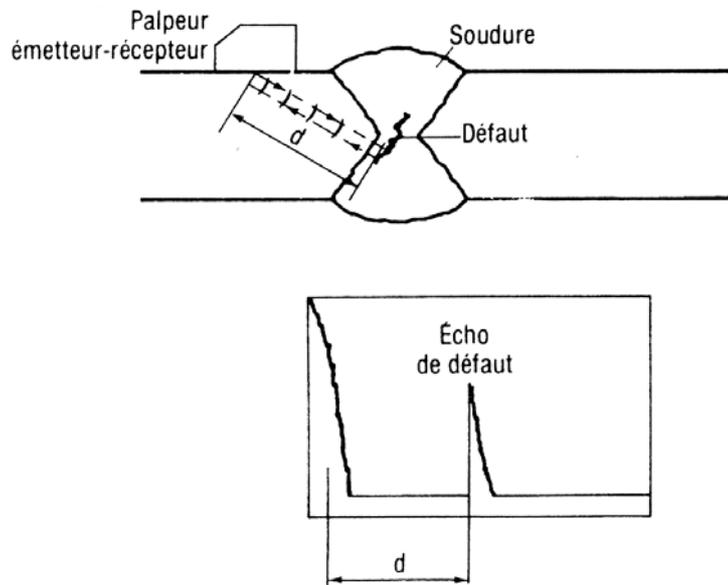
Ces différents types d'ondes ont des vitesses de propagation qui évoluent entre 1 480 m/s dans l'eau et 13 000 m/s dans le béryllium. Le tableau 1 rappelle les vitesses de propagation pour les matériaux usuels.

Ces ondes peuvent être dirigées selon des lois d'optique acoustique très proches de celle de l'optique lumineuse. Les lois de réflexion ou de réfraction font qu'un faisceau ultrasonore passant d'un milieu à un autre sera orienté sous une incidence précise avec un diamètre connu à partir des faces d'accès du produit à contrôler.

## ONDES LONGITUDINALES



## ONDES TRANSVERSALES



#### 2.1.4. Le générateur d'ultrasons

Le générateur d'ultrasons couramment utilisé est un appareil portable dont la taille est comparable à celle d'un petit oscilloscope dont il utilise les fonctions principales de la ventilation.

L'opérateur observe un écran dont la base de temps est étalonnée suivant la vitesse de propagation du type d'ondes dans le matériau examiné.

L'amplitude des signaux réfléchis appelé «échos» est un paramètre simple qui va servir d'élément d'appréciation et d'évaluation par comparaison avec des critères conventionnels issus de codes de contrôle ou élaborés à la demande.

A chaque instant de l'exploration de la pièce et en fonction de la position du détecteur (ou palpeur), l'opérateur peut localiser les anomalies rencontrées.

Matériaux	Vitesse des ondes longitudinales m/s	Vitesse des ondes transversales m/s	Vitesse des ondes de surface m/s
Air .....	332	n'existe pas	n'existe pas
Aluminium.....	6400	3 130	2817
Acier doux .....	5960	3240	2916
Cuivre .....	4759	2325	2092
Polystyrène .....	2350	1 120	1 008
Titane .....	5990	3 120	2808
Eau .....	1 480	n'existe pas	n'existe pas

#### 2.1.5. Le détecteur ou palpeur

Il se compose essentiellement d'une pastille piézoélectrique de section rectangulaire ou circulaire (5 mm à 150 mm) collée sur un matériau amortisseur chargé d'absorber les impulsions vibratoires provenant de la face arrière de la pastille piézoélectrique et d'envoyer ainsi le maximum d'énergie dans le matériau.

La composition de l'amortisseur influe sur la sensibilité et la résolution du palpeur. La face émettrice est protégée par une membrane plastique interchangeable ou une couche dure (chromage) ou un relais acoustique métallique.

Les palpeurs dits focalisés sont conçus avec des pastilles piézoélectriques hémisphériques de focale fixe ou à partir d'éléments plans sur lesquels on a rapporté une lentille acoustique usinée et de focale calculée.

### **2.1.5.1. Les applications**

L'application la plus simple est la mesure d'épaisseur d'une paroi dont une des faces est inaccessible.

La mesure s'exprime soit en graduations d'écran, soit directement en mm par affichage numérique.

L'épaisseur minimale en mesure manuelle est de l'ordre de 0,3 mm par simple application de la sonde sur le matériau. La précision est de l'ordre de  $1/10$  ou  $1/100$  de mm. Cette mesure débouche naturellement sur la mesure de la corrosion interne des tuyauteries ou des réservoirs (figure 1).

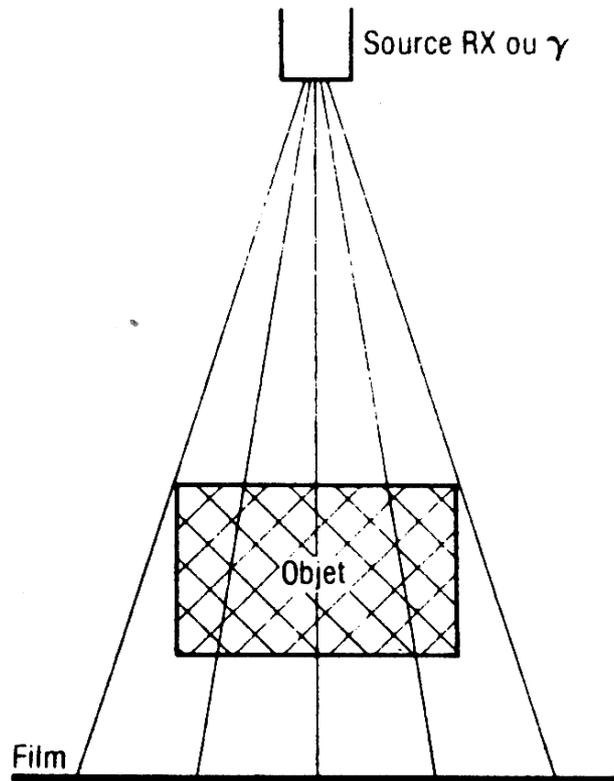
Une autre application très répandue est le contrôle des joints soudés et des tôles planes. Les épaisseurs contrôlées peuvent varier entre 4 mm et 200 mm ou plus (cuves de réacteurs nucléaires, réacteurs catalytiques).

La configuration de base du contrôle d'une soudure est donnée figure 2. L'opérateur explore la soudure par balayage latéral et longitudinal à l'aide du faisceau ultrasonore.

## **2.2. LE CONTROLE PAR RADIOGRAPHIE**

On utilise une propriété des radiations ionisantes qui est leur pouvoir de pénétration dans les matériaux. Cette pénétration dépend de la longueur d'onde du rayonnement (0,1 à 0,001 mm), des épaisseurs de matériau traversées et des nombres atomiques des éléments rencontrés.

Le rayonnement émergent en sortie du matériau est visualisé au moyen de films photographiques, d'écrans fluorescents ou de détecteurs solides. Les variations d'intensité du rayonnement sont traduites par ces détecteurs qui restituent l'image interne du matériau.



## 2.2.1. Les sources de rayonnement

### 2.2.1.1. Les générateurs de rayons X

Les rayons X prennent naissance au niveau du cortège atomique de l'atome. Pour produire des rayons X, il faut une cible que nous appellerons anode et des projectiles constitués par les électrons émis par une cathode.

La rencontre de la cible et des électrons se fait dans une enceinte sous vide pour assurer le passage de ceux-ci. Les électrons sont accélérés par la haute tension appliquée entre cathode et anode qui définira à la fois l'énergie et l'intensité du rayonnement. Industriellement, le générateur de rayons X est très compact, souvent portable, et la partie émissive peut prendre la forme d'une canne de diamètre  $\leq 15$  mm pour l'inspection de structures tubulaires.

### 2.2.1.2. Les sources radioactives

Elles sont produites par l'irradiation de certains matériaux dans les réacteurs nucléaires. L'activation du matériau est obtenue par un bombardement des atomes stables de celui-ci par des neutrons.

La source radioactive obtenue qui peut être de l'iridium 192, du cobalt 60, du thulium 170, du césium 137 vivra plus ou moins longtemps suivant l'élément. Ainsi, une source de cobalt 60 perd la moitié de son activité en 5,3 ans alors qu'une source d'iridium 192 arrive au même résultat en 74 jours.

Le processus de retour à l'équilibre de l'isotope radioactif est accompagné d'une libération d'énergie, sous forme de protons. Les performances obtenues sont données dans le tableau 2. Ces sources sont portables et manipulables au moyen de dispositifs de transfert afin de les placer au point d'utilisation.

Il convient de souligner que l'emploi des générateurs X ou des sources radioactives implique une protection des manipulateurs et des lieux d'examen en raison de la nocivité des radiations ionisantes pour les tissus humains.

Radioélément	Domaine d'utilisation	
	Acier	Aluminium
Cobalt <sub>60</sub>	15 à 120 mm	
Iridium <sub>192</sub>	5 à 60 mm	
Thullium <sub>170</sub>	0,5 à 3 mm	0,5 à 5 mm
Césium <sub>137</sub>	-	-

### 2.2.2. L'examen radiographique

Il suffit d'interposer l'objet à examiner entre la source de rayonnement et le détecteur. Cette opération apparemment simple nécessite toutefois quelques précautions dont par analogie tout amateur photographe a déjà fait l'expérience.

Ainsi le cliché photographique doit présenter une bonne définition, un bon contraste, une bonne qualité d'image. Ces paramètres dépendent du diamètre de la source, de la qualité du rayonnement (niveau d'énergie), de la qualité du détecteur. Le film photographique exploité visuellement fournit une image précise et fine du défaut, donc de sa dimension.

## 2.3. CONTROLE PAR RESSUAGE

### 2.3.1. Ressuage colore

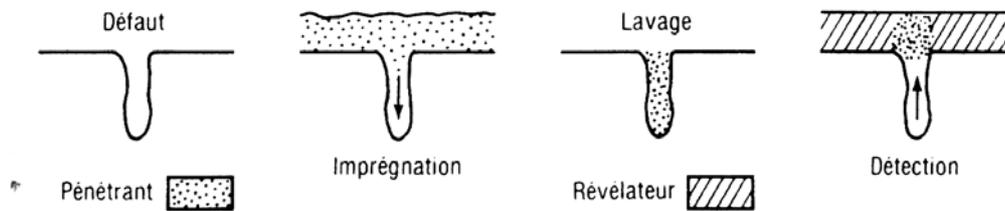
#### 2.3.1.1. Principe

Le contrôle par ressuage utilise un liquide d'imprégnation coloré ou fluorescent qui, après immersion ou aspersion de la pièce à examiner, pénètre par capillarité en raison de sa très faible tension superficielle dans tous les interstices de celle-ci (fissures, piqûres, replis, etc.).

Le pénétrant reste appliqué sur la pièce pendant un temps déterminé, puis on procède à l'élimination de l'excédent, en général par lavage à l'eau. Ensuite, après un court séchage à l'air ambiant, on pulvérise un révélateur constitué d'une poudre très fine qui va aspirer les traces de pénétrant restées dans les défauts superficiels

La limitation du procédé résulte de son principe même. c'est une méthode volumétrique qui ne peut détecter que les cavités de volume notable. Il faut reconnaître que les produits de ressuage fluorescent repoussent très loin ces limites.

### PRINCIPE DU RESSUAGE



#### **2.3.2. Méthode d'examen**

Les opérations d'imprégnation et de révélation réalisées, la pièce se présente lardée de blanc. Sur ce fond blanc vont apparaître très rapidement des taches de couleur rouge ou violet qui sont les indications d'orifices par lesquels le pénétrant ressuie.

L'abondance du phénomène de ressuage peut parfois dégrader très rapidement l'image au point de la rendre illisible. En général, la révélation est totale au bout d'une vingtaine de minutes. Les traces colorées indiquent ainsi très rapidement la présence de défauts superficiels qui pour l'œil humain auraient été imperceptibles.

Le ressuage fluorescent utilise le même principe de base mais l'examen est fait en éclairant la pièce à l'aide de rayonnement ultraviolet afin d'exciter la fluorescence du pénétrant. Cette méthode est plus sensible que le ressuage coloré mais nécessite une préparation soignée.

### **2.3.3. L'interprétation**

L'interprétation des traces colorées est essentiellement visuelle et l'opérateur doit être entraîné. Les procédures d'examen sont codifiées mais l'interprétation à la fiabilité de l'acuité visuelle de l'opérateur donc elle ne peut être totalement satisfaisante dans des examens répétitifs.

### **2.3.4. Les applications**

Le ressuage est un procédé de contrôle économique, applicable à tous les matériaux et leurs alliages. Il s'applique aussi aux caoutchoucs, aux élastomères de synthèse et aux composites.

Il peut être employé sur des pièces de formes complexes en atelier ou sur chantier. Le prix de revient extrêmement bas d'une opération l'a fait adopter aussi bien dans les fabrications de grande série (automobile) que sur des pièces de grande valeur (aubes de turbine). Il est un auxiliaire précieux pour le soudeur qui, au fur et à mesure des passes de soudage, peut vérifier lui-même le résultat de son travail.

### **2.3.5. Ressuage par fluorescence**

Cet examen permet de détecter des défauts plus fins qu'avec l'opération de ressuage.

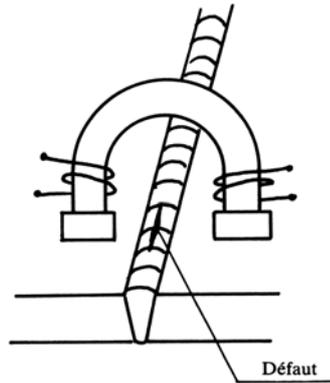
Les liquides d'imprégnation sont fluorescents et l'examen a lieu en milieu sombre avec une lumière de Wood (rayons ultraviolets).

## **2.4. LE CONTROLE PAR MAGNETOSCOPIE**

L'aimantation d'une pièce se traduit par une déviation des lignes de force à l'emplacement de toute zone hétérogène et en conséquence, par la concentration de ces lignes au voisinage du défaut. Si le défaut est proche de la surface, les lignes de force entourant le défaut sortent de la pièce et se referment dans l'air.

Si l'on répand de la poudre magnétique sur la surface de la pièce, la poudre a tendance à s'accumuler à l'endroit où les forces magnétiques l'attirent davantage, c'est-à-dire au droit du défaut.

Cette méthode naturellement applicable seulement aux matériaux magnétiques est utilisée pour la détection des défauts superficiels et des défauts sous-jacents, c'est-à-dire proche de la surface.



### 2.4.1. Méthode d'examen

La première étape est la magnétisation du matériau. Deux techniques sont utilisées.

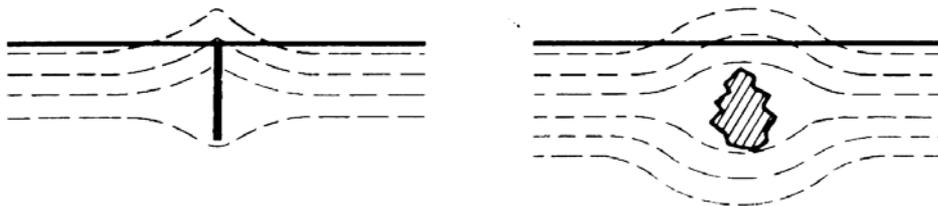
#### Sens de circulation courant

C'est-à-dire que la pièce constitue ou termine le circuit magnétique dans le cas d'appareils à pôles fixes ou mobiles. Le courant d'excitation est continu.

#### Avec circulation de courant

Le champ magnétique est circulaire et axé suivant la direction générale du courant. Le courant est directement transmis à la pièce par des pôles qui sont alimentés en courant sinusoïdal monophasé 50 Hz ou en courant continu ou en courant pulsé ou sinusoïdal basse fréquence. Les intensités sont très élevées de l'ordre de 2 000 ou 4 000 A. La détection ou après la suppression du courant.

#### Magnétoscopie : déviation des lignes de champs par défaut débouchant et non débouchant



### 2.4.2. La détection

#### La voie sèche

La poudre magnétique est projetée sur la pièce. Instantanément, elle s'oriente et se fixe préférentiellement dans les zones à défaut.

#### La voie humide

Elle utilise une poudre ferro-magnétique de granulométrie 0,5 à 1  $\mu$ m en suspension dans une huile minérale légère éventuellement associée à des produits fluorescents.

L'observation est visuelle et les spectres observés sont convenables. Les défauts détectés par cette méthode le sont en fonction de leur orientation par rapport à la direction générale du champ (l'optimum étant la perpendiculaire), de leur profondeur, de leur étendue.

La magnétoscopie est une méthode qualitative.

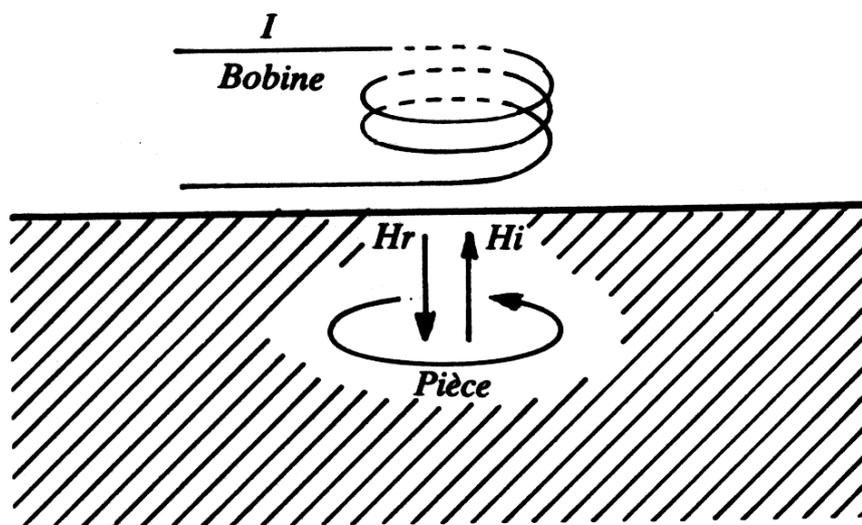
### 2.4.3. Les applications

Les domaines de prédilection sont la recherche de criques sur pièces moulées ou après meulage ou rectification. Tous les produits ferro-magnétiques peuvent être examinés spécialement les barres, les profilés, de façon quasi automatique. Suivant les défauts recherchés, les cordons de soudures peuvent être aussi examinés soit en fabrication, soit à titre préventif sur les composants en service.

## 2.5. CONTROLE PAR COURANTS DE FOUCAULT

Les courants de Foucault sont induits dans la pièce à contrôler par l'action d'un champ électrique alternatif produit par une bobine alimentée par un courant sinusoïdal. Les fluctuations de circulation des courants de Foucault dues aux anisotropies superficielles du matériau provoquent des variations d'impédance, donc d'inductance de la bobine émettrice qui servent d'éléments de mesure.

Dès qu'une anomalie se présente dans le champ de la bobine, une variation brutale de l'impédance apparente de celle-ci est constatée. En combinant intensité et phase du courant induit, il est possible de distinguer ce qui est provoqué par la géométrie de la pièce et ce qui est dû aux anomalies.



### 2.5.1. La mesure

La chaîne de mesure est en général constituée :

- d'un détecteur (bobines) ;
- d'un oscillateur pour l'excitation du détecteur
- d'un circuit de détection,
- d'un circuit d'analyse et d'exploitation
- des signaux ;
- d'un dispositif de visualisation des signaux.

La détection consiste dans la comparaison des composantes du signal à étudier et celles d'un signal de référence.

## 2.6. L'ECOUTE ACOUSTIQUE

### 2.6.1. Principe

L'émission acoustique est un phénomène qui prend naissance quand un matériau est soumis à une déformation irréversible. La contrainte locale provoque un réarrangement des microstructures avec libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques.

On distingue trois sources principales qui sont : la déformation plastique, les phénomènes de ruine (fissure, fatigue, fluage), les changements de structures cristallines.

Le domaine de fréquence de bruit d'émission s'étend de l'audible à plusieurs MHz. Il est à noter que l'émission acoustique est volumique et dynamique. En l'absence de contrainte il n'y a pas d'émission.

### 2.6.2. Les applications

Toutes les structures qui sont soumises à contraintes peuvent faire l'objet d'une instrumentation destinée à surveiller leur comportement : ponts, tunnels, câbles d'ouvrages suspendus, etc.

La difficulté de séparer les bruits caractéristiques d'une évolution du bruit environnant limite souvent l'expérimentation. Quelques résultats intéressants sont obtenus lors des épreuves hydrauliques de réservoirs ou sur l'état de précontrainte de barres de torsion dans l'industrie automobile.

### **3. L'ORGANISATION PROFESSIONNELLE**

Elle s'appuie en France sur le COFREND (Comité français des essais non destructifs) qui regroupe des associations ou organisme intéressés par le contrôle non destructif.

Les buts principaux du COFREND sont :

- présenter les réalisations de la technique française
- recueillir et diffuser les résultats des études et recherches
- favoriser l'enseignement des essais non destructifs et organiser la certification du personnel chargé de ces essais ;
- obtenir les équivalences de certification avec les autres pays afin que les entreprises françaises puissent accéder aux marchés soumis aux procédures d'assurance qualité.