

ESSAIS DE DURETE

I) Généralités

La dureté caractérise la résistance à la déformation qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps dur. L'essai de dureté, qui généralement s'effectue sur des machines d'essai appelées **duromètres**, a pour but de déterminer la dureté des matériaux. C'est un moyen de contrôle non destructif utilisé dans la production pour un contrôle rapide de la qualité des produits finis car il permet d'évaluer les propriétés d'un matériau tel que sa résistance à la traction, sa ductilité et sa résistance à l'usure.

Selon les normes, la dureté est exprimée comme un nombre sans dimension.

Les essais les plus courants sont les essais de **dureté Brinell, Vickers et Rockwell**.

II) Essai Brinell

II-1) Principe :

L'essai consiste à enfoncer dans la pièce à essayer un **pénétrateur**, en forme de **bille en acier** ou en **carbure de tungstène** de diamètre **D**, sous une charge **F** bien déterminée, et à mesurer sur l'empreinte, laissée sur la surface après enlèvement de la charge, deux diamètres **d₁** et **d₂** à 90° l'un de l'autre (Fig. 1). La mesure est effectuée à l'aide d'un dispositif grossissant et d'une règle graduée tenant compte du facteur de grossissement.

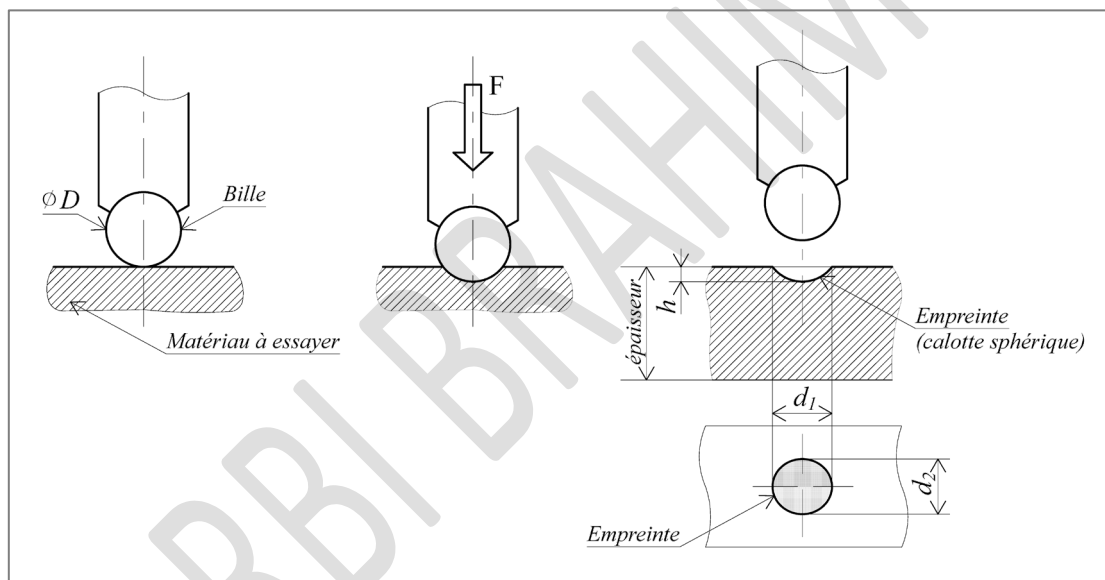


Fig. 1. Principe de l'essai Brinell

La dureté Brinell **HB** est un nombre proportionnel au rapport **F/S**, où **S** est la surface de l'empreinte.

$$HB = \text{Constante} \times F/S$$

Avec :

- **Constante** = $1/g = 1/9,8066 = 0,102$ **g** : accélération de la pesanteur en ms^{-2} ,
- **F** = charge d'essai en Newton (N),
- **S** = surface de l'empreinte (calotte sphérique) = πDh en mm^2 ,
- **h** = profondeur de l'empreinte = $\frac{(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$ en mm,
- **D** = diamètre de la bille en mm,
- **d** = diamètre de l'empreinte = $(d_1 + d_2)/2$ en mm.

Par suite la dureté Brinell est donnée par la relation suivante :

$$HB = 0,102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

En général, des tableaux livrés avec la machine d'essai évitent ce calcul en donnant directement la valeur de la dureté Brinell en fonction de d .

II-2) Conditions d'essai :

- L'essai est normalement conduit à température ambiante.
- La charge est appliquée progressivement de façon à atteindre au bout d'un temps déterminé ($\cong 15$ secondes) la charge fixée, sans chocs ni vibrations, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes (dans les conditions normales c'est-à-dire avec une bille de 10mm de diamètre et sous une charge de 29430 N ou de $29430 \times 0,102 = 3000$ kgf).
- On nettoie la surface pour éviter toute altération. Un état de surface de qualité permettra aussi de lire aisément le diamètre de l'empreinte.
- Les charges d'essai utilisées sont normalisées. Elles doivent être choisies de telle façon que le diamètre d de l'empreinte soit compris entre les valeurs $0,24D$ et $0,6D$.
- L'épaisseur minimale de la pièce est fonction du diamètre d de l'empreinte. Elle doit être suffisante afin que la pénétration de la bille ne déforme pas la pièce. Dans le cas contraire la mesure ne sera pas fiable. A titre d'exemple, pour une bille de diamètre 10 mm, qui est celle que l'on utilisera de préférence, et d égale à 4,0 mm, la norme donne une épaisseur minimale égale à 3,34 mm.
- Pour des essais successifs sur la même pièce, des conditions de positionnement (distance entre centres de deux empreintes voisines et distance du centre d'une empreinte au bord de la pièce) sont fixées pour assurer la conformité de ces essais.
- La pièce doit reposer sur un support rigide.

II-3) Désignation :

Deux symboles sont utilisés pour indiquer une dureté Brinell :

- **HBS** pour l'essai effectué avec une bille en acier,
- **HBW** pour l'essai effectué avec une bille en carbure de tungstène.

Des chiffres sont placés devant et derrière ces symboles, le chiffre qui précède donne la valeur de la dureté et les trois chiffres placés derrière le symbole indiquent les conditions d'essai à savoir :

- le 1^{er} donne le diamètre de la bille en mm,
- le 2^{ème} indique la valeur de la charge en N multipliée par le facteur de proportionnalité 0,102 (autrement dit la charge exprimée en kgf),
- le 3^{ème} et dernier chiffre donne la durée de maintien de la charge en secondes, si elle diffère du temps spécifié (10 à 15 secondes).

Exemples :

350 HBS 5/750 correspond à une dureté Brinell de 350 mesurée avec une bille en acier de 5mm de diamètre sous une charge de 750 kgf, soit $750 \times 9,8066 = 7355$ N, maintenue durant 10 à 15 secondes.

600 HBW 1/30/20 correspond à une dureté Brinell de 600 mesurée avec une bille en carbure de tungstène de 1mm de diamètre sous une charge de 30 kgf, soit $30 \times 9,8066 = 294,2$ N, maintenue pendant 20 secondes.

Remarque :

- Les billes habituellement utilisées pour les essais Brinell ont des diamètres de 1 – 2 – 2,5 – 5 et 10 mm.
- Si aucun chiffre ne figure derrière le symbole HBS ou HBW, cela signifie que l'essai a été réalisé dans des conditions normales, c.-à-d. avec une bille de 10 mm de diamètre et sous une charge 29430 N (3000 kgf) appliquée pendant 10 à 15 secondes.
- Bille en acier HBS < 350.
- Bille en carbure de tungstène HBW < 650.
- Pour mesurer la dureté **des métaux très durs**, les billes ne laissent plus d'empreintes nettes. On utilise alors des **pénétrateurs coniques** en diamant (essai Rockwell) ou des **pénétrateurs pyramidales** en diamant (essai Vickers).

II-4) Application :

La méthode Brinell convient pour les essais de dureté de **métaux tendres** (métaux légers qui sont des éléments métalliques dont la masse volumique est $< 5\text{mg/cm}^3$ tel que l'Aluminium, le Titane, les métaux alcalins et les métaux alcalino-terreux, le Plomb, le Zinc) à **durs** (Acier ou Fer). L'essai Brinell sous sa forme

habituelle {pour les aciers bille de 10 mm de diamètre, charge de 29430 N (3000 kgf), ou bille de 5 mm de diamètre, charge de 7350 N (750 kgf)} convient spécialement pour les **mesures d'Atelier**.

L'empreinte ayant des dimensions importantes (de 2,5 à 6 mm de diamètre environ avec la bille de 10 mm et de 1,4 à 3 mm avec la bille de 5 mm), les lectures sont relativement faciles. L'état de surface n'a pas besoin d'être particulièrement soigné. Un tournage fin ou un meulage avec une meule fine donnent une estimation suffisante.

III) Essai Vickers

III-1) Principe :

Le principe de l'essai Vickers est le même que celui de l'essai Brinell, seule la forme du pénétrateur change. L'essai consiste à enfoncer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de **pyramide droite** en diamant, à **base carrée**, d'angle au sommet égal à **136°**, sous une charge **F** bien déterminée, et à mesurer sur l'empreinte, laissée sur la surface après enlèvement de la charge, deux diagonales **d₁** et **d₂** (Fig. 2, 3 et 4). La mesure est effectuée à l'aide d'un système optique approprié.

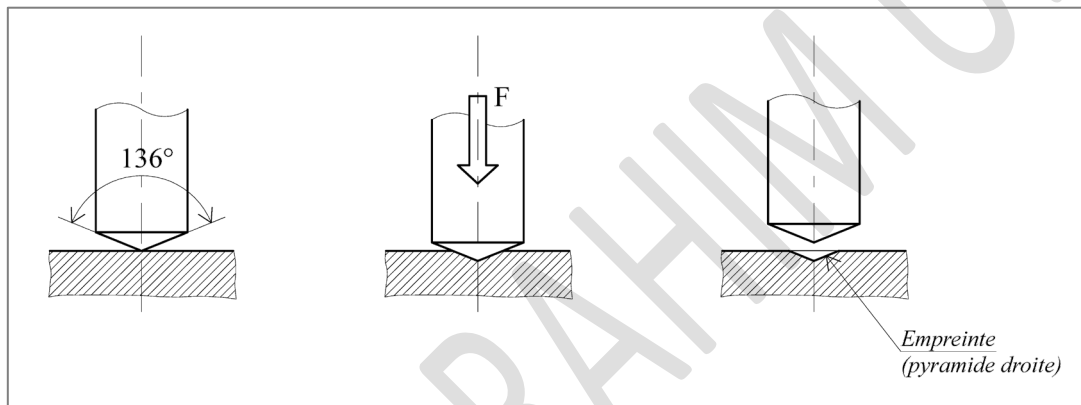


Fig. 2. Principe de l'essai Vickers

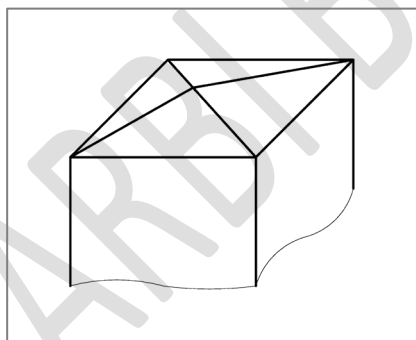


Fig. 3. Géométrie du Pénétrateur

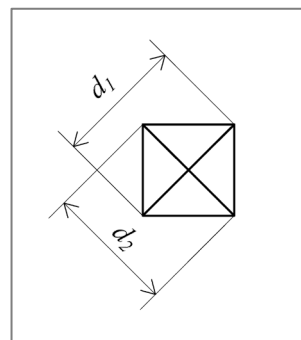


Fig. 4. Mesure de l'empreinte

La dureté Vickers **HV** est un nombre proportionnel au rapport **F/S**, où **S** est la surface de l'empreinte considérée comme **pyramide droite** ;

$$HV = \text{constante} \times F/S$$

Avec :

- **Constante** = $1/g = 1/9,8066 = 0,102$ **g** : accélération de la pesanteur en ms^{-2} ,
- **F** = charge d'essai en Newton (N),
- **S** = surface de l'empreinte (pyramide droite) en mm^2 ,

On déduit
$$HV = 0,102 \times \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{d^2}$$

Soit $HV = 0,189 \times \frac{F}{d^2}$ où d = diagonale de l'empreinte = $(d_1 + d_2)/2$ en mm (Fig. 4).

Pour éviter de faire le calcul, le degré de dureté est souvent lu sur un abaque (une table) ; il y a un abaque par force d'appui.

III-2) Conditions d'essai :

Cet essai est décrit dans une norme propre aux aciers. Pour les alliages d'Aluminium et de Cuivre, il faut se reporter à une autre norme.

- L'essai est normalement effectué à température ambiante,
- La charge est appliquée progressivement de façon à atteindre au bout d'un temps déterminé ($\cong 15$ secondes) la charge fixée, sans chocs ni vibrations, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes.
- On préparera la surface pour éviter toute altération.
- L'épaisseur minimale de la pièce doit être suffisante afin que la pénétration de la pyramide droite ne déforme pas la pièce sinon la mesure ne sera pas fiable.
Elle est choisie de telle sorte qu'elle soit supérieure ou égale à 1,5 fois la diagonale d de l'empreinte.
- Pour des essais successifs sur la même pièce, des conditions de positionnement sont fixées pour assurer la conformité de ces essais.
- La charge d'essai sera :
 $49 \text{ N} \leq F \leq 981 \text{ N}$ (pour les Aciers),
 $49 \text{ N} \leq F \leq 180 \text{ N}$ (pour Al, Cu et alliages).

III-3) Désignation :

La formulation d'une dureté Vickers est assez proche de celle de la dureté Brinell.

- A gauche du symbole **HV** se trouve un chiffre donnant la valeur de la dureté.
- A droite du symbole **HV** peuvent figurer jusqu'à 2 chiffres :

- Le 1^{er} donne la valeur de la charge d'essai (en N) multipliée par 0,102 (c.-à-d. la charge en kgf),
- Le 2^{ème} donne la durée (en secondes) de maintien de la charge lorsqu'elle diffère du temps spécifié (10 à 15 secondes).

Exemples :

640 HV 50/20 signifie que la dureté Vickers de 640 a été déterminée sous une charge de 490,3 N (50 kgf) appliquée pendant 20 secondes.

640 HV 30 signifie que la dureté Vickers de 640 a été déterminé sous une charge de 294,2 N (30 kgf) appliquée pendant 10 à 15 secondes.

Remarque :

- La méthode est à éviter pour les pièces à gros grains (pièces moulées).
- Des écarts entre les longueurs des diagonales peuvent exister dans le cas de métaux très anisotropes.
- La préparation de surface très soignée (rectification, polissage) est un inconvénient de l'essai Vickers, qui est par ailleurs le **plus précis**.
- Pour la mesure de la dureté de pièces sphériques ou cylindriques, il existe dans la norme des tableaux **de coefficients de correction**.
- La dureté Vickers peut être étendue aux faibles charges de 1,961 à 49,03 N (HV 0,2 à HV 5) on parle d'essai de dureté Vickers **sous charge réduite**. Pour des charges inférieures à 1,961 N (HV 0,2 et en dessous), on parle d'essai de **microdureté Vickers**.
- Après l'essai, aucune déformation ne doit être visible sur la face opposée à celle du Pénétrateur.

III-4) Application :

L'essai Vickers convient aussi bien pour les matériaux **très durs** que pour les matériaux **tendres**, car, en raison de la constante de l'angle de pénétration, la mesure est indépendante de la charge (entre 49 et 981 N). Mais le fini superficiel doit être soigné ; la pièce ne peut avoir que de **faibles dimensions**. Ce mode d'essai est plutôt du domaine du **Laboratoire**. Il comprend un sous-groupe d'essai de **dureté des soudures**.

IV) Essai Rockwell

Il consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur de type normalisé (**cône en diamant** ou **bille en acier**) et à mesurer l'accroissement rémanent h de la profondeur de pénétration.

IV-1) Exécution de l'essai (Fig. 5 et 6) :

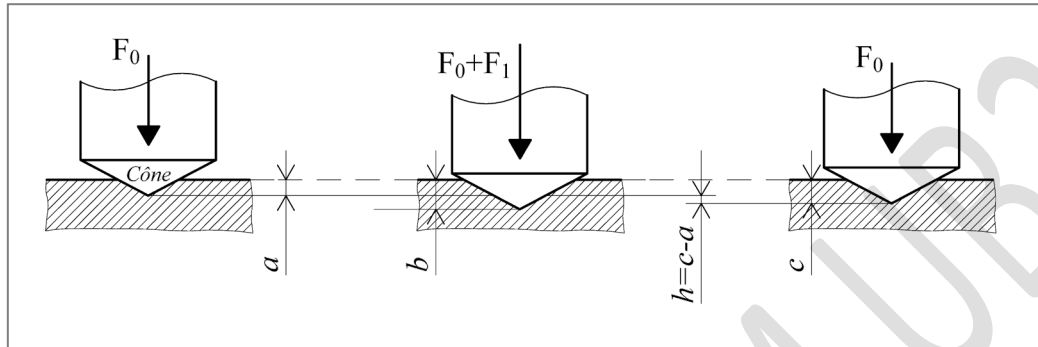


Fig. 5. Principe de l'essai Rockwell avec cône.

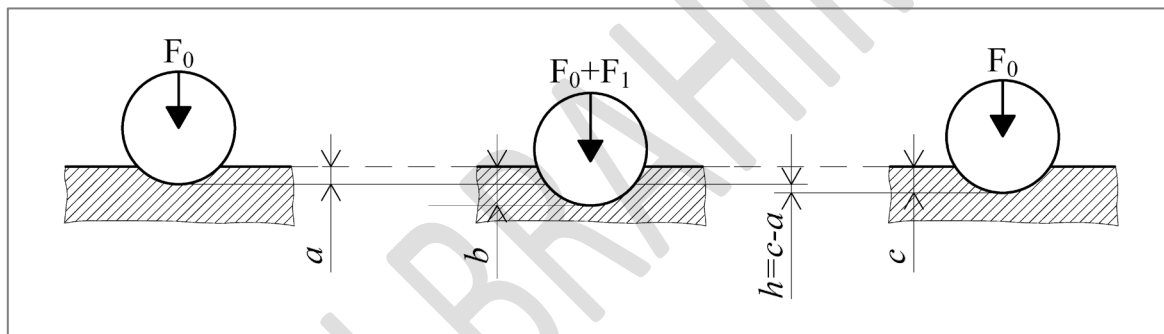


Fig. 6. Principe de l'essai Rockwell avec bille.

- Le pénétrateur est mis en contact (perpendiculairement) avec la surface du matériau à essayer, il est soumis sans choc à une charge initiale de pénétration F_0 . Cette charge entraîne une pénétration a du pénétrateur, qui sert d'origine de mesure de la dureté.
- On applique au pénétrateur, progressivement et sans choc (en 2 à 8 secondes), une surcharge F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur b .
- On enlève F_1 pour revenir à la charge initiale F_0 . La pénétration du pénétrateur est alors égale à c .
- On mesure alors l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration h , c.-à-d. la différence entre la pénétration c sous charge F_0 à la fin de l'essai et la pénétration a sous charge F_0 au début de l'essai ; $h = c - a$. A partir de la valeur h est déduit le nombre appelé **dureté Rockwell**.

La combinaison de divers pénétrateurs et de diverses charges conduit à utiliser plusieurs échelles de dureté Rockwell.

Le tableau 1 indique les différentes échelles de dureté Rockwell en fonction des types de pénétration et des charges F .

Le tableau 2 montre le calcul de la dureté pour les différentes échelles de dureté Rockwell.

Echelle de dureté Rockwell	Symbole de dureté	Type de pénétrateur	Charge initiale F_0	Surcharge F_1	Charge totale F	Domaine d'application (fourchette de dureté Rockwell)
A	HRA	Cône diamant	98,07 N	490,3 N	588,4 N	20 à 88 HRA
B	HRB	Bille d'acier 1,5875 mm	98,07 N	882,6 N	980,7 N	20 à 100 HRB
C	HRC	Cône diamant	98,07 N	1,373 kN	1,471 kN	20 à 70 HRC
D	HRD	Cône diamant	98,07 N	882,6 N	980,7 N	40 à 77 HRD
E	HRE	Bille d'acier 3,175 mm	98,07 N	882,6 N	980,7 N	70 à 100 HRE
F	HRF	Bille d'acier 1,5875 mm	98,07 N	490,3 N	588,4 N	60 à 100 HRF
G	HRG	Bille d'acier 1,5875 mm	98,07 N	1,373 kN	1,471 kN	30 à 94 HRG
H	HRH	Bille d'acier 3,175 mm	98,07 N	490,3 N	588,4 N	80 à 100 HRH
K	HRK	Bille d'acier 3,175 mm	98,07 N	1,373 kN	1,471 kN	80 à 100 HRK
15N	HR15N	Cône diamant	29,42 N	117,7 N	147,1 N	70 à 94 HR15N
30N	HR30N	Cône diamant	29,42 N	264,8 N	294,2 N	42 à 86 HR30N
45N	HR45N	Cône diamant	29,42 N	411,9 N	441,3 N	20 à 77 HR45N
15T	HR15T	Bille d'acier 1,5875 mm	29,42 N	117,7 N	147,1 N	67 à 93 HR15T
30T	HR30T	Bille d'acier 1,5875 mm	29,42 N	264,8 N	294,2 N	29 à 82 HR30T
45T	HR45T	Bille d'acier 1,5875 mm	29,42 N	411,9 N	411,3 N	1 à 72 HR45T

Tableau 1. Différentes échelles de dureté Rockwell (NF EN 10109)

HRA HRC HRD	Dureté Rockwell = $100 - \frac{h}{0,002}$	Formule applicable pour les échelles de dureté Rockwell A, C et D (h en mm)
HRB HRE HRF HRG HRH HRK	Dureté Rockwell = $130 - \frac{h}{0,002}$	Formule applicable pour les échelles de dureté Rockwell B, E, F, G, H, et K
HRN HRT	Dureté Rockwell = $100 - \frac{h}{0,001}$	Formule applicable pour les échelles de dureté Rockwell N et T

Tableau 2. Calcul de la dureté Rockwell (NF EN 10109)

Les deux échelles de dureté Rockwell les plus utilisées sont :

- Echelle de dureté Rockwell C ; le pénétrateur est un cône de diamant auquel est appliquée une charge total de **1471 N** (charge initiale $F_0 = 98,07 \text{ N}$). Cette échelle est utilisée pour mesurer l'**acier, la fonte, le Titane** (résistance à la traction supérieure à 1000 N/mm^2).
- Echelle de dureté Rockwell B ; Le pénétrateur est ici une bille d'acier de 1,5875 mm de diamètre soumise à une charge total de **980,7 N** (charge initiale $F_0 = 98,07 \text{ N}$). Cette échelle est utilisée pour mesurer l'**alliage de cuivre, l'acier doux, l'alliage d'aluminium** (résistance à la traction comprise entre 340 et 1000 N/mm^2).

IV-2) Conditions d'essai :

- L'essai est effectué à température ambiante.
- Les charges doivent être appliquées sans choc.
- On prépare la surface pour éviter toute altération.
- La pièce doit reposer sur un support rigide.
- Aucune marque ne doit apparaître au dos de la pièce.

- L'épaisseur de la pièce à essayer doit être au moins égale à **10 h** pour les essais effectués avec le pénétrateur conique, et à **15 h** pour les essais effectués avec le pénétrateur sphérique.
- Pour les essais successifs, la distance entre centres de deux empreintes voisines doit être au moins égale à **4 fois** le diamètre de l'empreinte (mais avec un minimum de 2 mm).
- La distance du centre d'une empreinte au bord de la pièce doit être au moins égale à **2,5 fois** le diamètre de l'empreinte (mais avec un minimum de 1mm).
- **Le nombre de la dureté Rockwell est habituellement lu directement sur le cadran de l'appareil de mesure.**
- Pour la mesure de la dureté des pièces sphériques ou cylindriques, il existe dans les normes des tableaux de coefficient de correction.

Remarque :

Comme pour Vickers, la dureté Rockwell peut être étendue **aux faibles charges** pour, par exemple, réaliser des essais sur des **produits minces**.

IV-3) Désignation :

- La dureté Rockwell pour les échelles A, B, C, D, E, F, G, H, et K est désignée par le symbole **HR** précédé par la valeur de dureté et complété par une lettre indiquant l'échelle.
Exemple : 59 HRC = dureté Rockwell de 59, mesurée sur l'échelle C.
- La dureté superficielle Rockwell pour les échelles N et T est désignée par le symbole **HR** précédé de la valeur de la dureté et complété par un nombre (représentant la charge total) et une lettre indiquant l'échelle.
Exemple : 70 HR30N = dureté superficielle Rockwell de 70, mesurée sur l'échelle 30N avec une charge de 294,2 N (soit 30kgf).

Dans le cas de produits minces où l'apparition d'empreintes au dos de la pièce est permise, l'essai s'exécute dans des conditions analogues à celles de l'essai HR30T. Sa dénomination est alors HR30T_m.

IV-4) Application :

L'essai Rockwell, simple et rapide, convient pour les **petites pièces et pour les hautes duretés** (supérieures à 400 Brinell).

La dispersion des résultats est nettement plus forte que pour l'essai Brinell, et il est généralement nécessaire de prendre la moyenne de deux ou trois mesures. La pièce doit être bien assise sur son support, ce qui pose parfois des problèmes d'adaptation, et l'état de surface doit être correct (la présence de rayures donne des valeurs sous estimées).