

REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

J. SERRE

Détermination de la température optimum de laminage à chaud d'un cupro-aluminium à l'aide d'essais de résilience à chaud

Revue de statistique appliquée, tome 10, n° 4 (1962), p. 55-70

http://www.numdam.org/item?id=RSA_1962__10_4_55_0

© Société française de statistique, 1962, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « *Revue de statistique appliquée* » (<http://www.sfds.asso.fr/publicat/rsa.htm>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

DÉTERMINATION DE LA TEMPÉRATURE OPTIMUM DE LAMINAGE A CHAUD D'UN CUPRO-ALUMINIUM A L'AIDE D'ESSAIS DE RÉSILIENCE A CHAUD

J. SERRE

Ingénieur ENSMIM, Chef du Laboratoire Central Tréfimétaux
Usine de Givet

L'essai de résilience à chaud consiste à casser au Mouton de Charpy une éprouvette normalisée type UF portée préalablement pendant 1/2 heure à la température de l'essai. L'angle de remontée du pendule permet de calculer l'énergie absorbée par la cassure et donne une indication utile sur l'énergie nécessaire pendant le laminage à chaud du produit. L'aspect de la cassure, déchirée ou plastique avec tous les stades intermédiaires possibles, donne une idée de la plasticité du métal pendant sa déformation à chaud.

A l'aide de tels essais nous avons essayé de déterminer la température optimum de laminage à chaud d'un cupro-aluminium au nickel en étudiant l'influence du type de cristallisation du produit de fonderie (basaltique ou à grains fins équiaxes) et en échantillonnant hiérarchiquement les produits pour déterminer les dispersions inter et intra plateaux.

La limitation du nombre d'éprouvettes à 64 au total nous a conduit à utiliser un plan d'expérience composé de 16 carrés latins 2×2 à trois facteurs principaux agencés eux-mêmes suivant un carré latin 4×4 vis à vis de ces mêmes 3 facteurs.

Le dépouillement de ce plan a permis de mettre en évidence par ordre d'importance :

L'effet cristallisation

l'effet température

la non-linéarité de l'effet température

l'interaction température x cristallisation

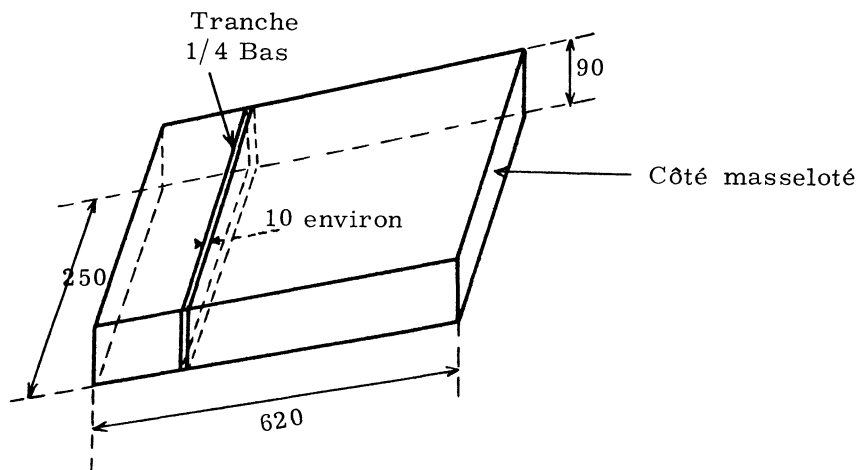
la dispersion entre plateaux

L'analyse des aspects des cassures, orientée par les résultats obtenus pour les résiliences, a alors conduit à la conclusion que le laminage des plateaux devait se faire à la température la plus élevée possible compatible avec les autres exigences de la fabrication et que ce laminage nécessiterait une énergie relative - ment élevée.

1 - ECHANTILLONNAGE -

Les plateaux sont coulés en coulée basculante Durville avec une lingotière bassin. Ils font 250 mm de large, 620 mm de haut et 90 mm d'épaisseur.

Etant donné le type de coulée et la nécessité de pouvoir laminier une partie suffisante du plateau après prélèvement, il a été décidé de prélever les éprouvettes dans une tranche située au quart bas du plateau comme indiqué ci-dessous :



Pour déterminer l'emplacement exact des échantillons, nous avons examiné la macrographie d'une tranche et on trouvera à la figure 1 ci-dessous une photographie échelle 1/2 de cette macrographie et à la figure 2, la disposition des 8 éprouvettes prélevées par plateau, également à l'échelle 1/2.

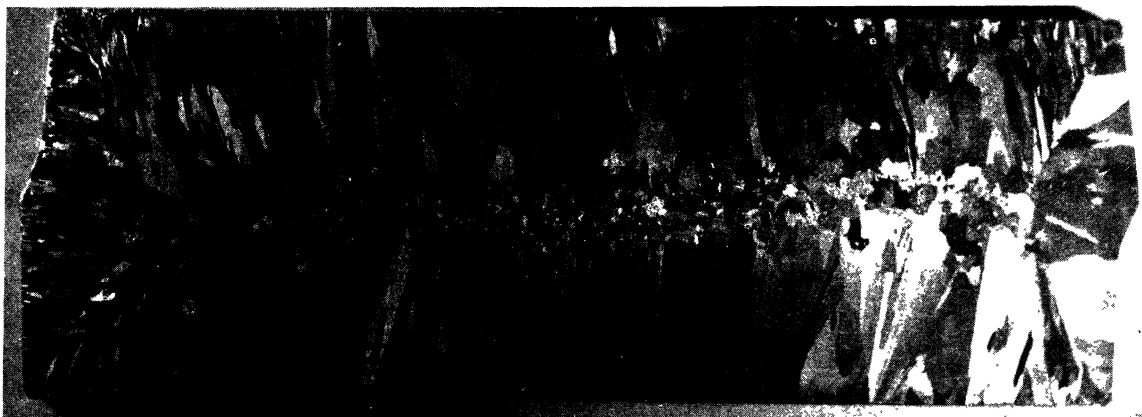


Figure 1 - Macrographie d'une tranche 1/4 bas ($G = 1/2$)

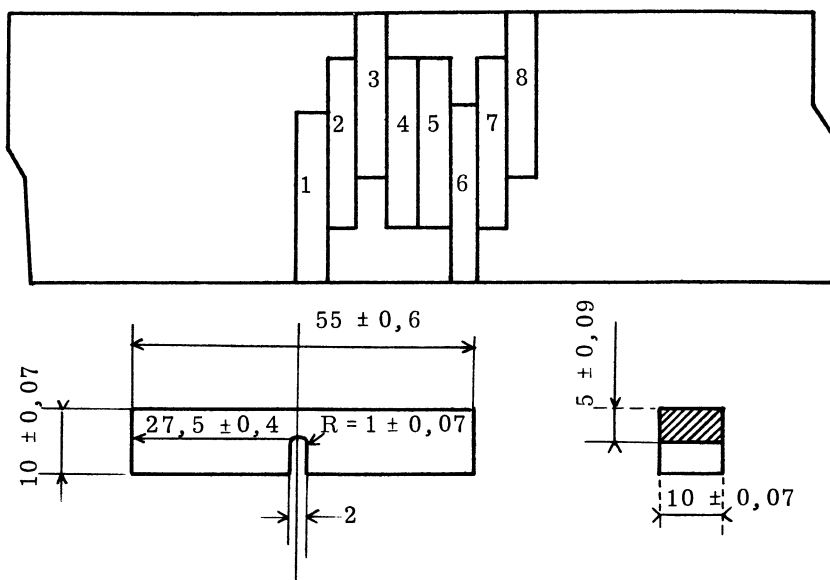


Figure 2 - Emplacement des 8 éprouvettes type UF d'un plateau

Ces éprouvettes sont telles que pour 4 d'entre elles n° 1, 3, 6 et 8 prises sur le bord de la tranche on est certain que l'entaille se place transversalement sur de gros grains allongés (cristallisation basaltique) dont l'axe longitudinal se confond approximativement avec celui de l'éprouvette. Pour les 4 autres, n° 2, 4, 5, et 7 prises au milieu de la tranche cette entaille se trouve dans une zone de petits grains sensiblement équiaxes et peut tomber soit au joint des grains soit au coeur de ces grains. Cette zone est en outre parsemée de nombreuses petites porosités.

Huit plateaux ont été échantillonnés de la même manière. Les 64 éprouvettes ont été numérotées de :

11 à 18 pour le plateau 1

21 à 28 pour le plateau 2

"

"

81 à 88 pour le plateau 8

Ces huit plateaux ont été pris dans 8 coulées différentes (il y a 4 plateaux par coulée) dans un ordre donné par un tirage au sort. Les coulées ont été choisies parmi celles d'analyse voisine de l'analyse type de l'alliage (soit 92 % de cuivre, 6 % d'aluminium et 2 % de nickel). En fait les analyses de ces 8 coulées ont donné :

des teneurs en cuivre comprises entre 91,7 et 92,2 %

des teneurs en nickel " " 1,8 et 2,0 %

des teneurs en manganèse " " 0,17 et 0,21 %

des teneurs en fer voisines de 0,05 % }
 des teneurs en zinc voisines de 0,10 % } (impuretés)

Les teneurs en aluminium que l'on pourrait obtenir par différence sont donc restées très constantes.

2 - PLAN D'EXPERIENCE -

Le plan d'expérience est donné au Tableau I ci-dessous où chaque case représente une éprouvette. La température de l'essai est indiquée dans la case correspondante.

Tableau I

Température d'essai		Emplacement de l'éprouvette (voir figure 2)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Numéro du plateau	1	600	650	900	950	850	800	750	700
	2	650	600	950	900	800	850	700	750
	3	700	750	800	850	950	900	650	600
	4	750	700	850	800	900	950	600	650
	5	800	850	600	650	750	700	950	900
	6	850	800	650	600	700	750	900	950
	7	900	950	700	750	650	600	850	800
	8	950	900	750	700	600	650	800	850

On a affaire à 16 carrés latins 2×2 agencés eux-mêmes suivant un carré latin 4×4 .

Considérons en effet deux plateaux de $n^\circ 2p - 1$ et $2p$ ($p = 1$ à 4) et deux emplacements $2q - 1$ et $2q$ ($q = 1$ à 4).

Les températures d'essai sont données par le Tableau II ci-dessous ;

Tableau II

		Bord	Milieu
plateau n°	$2p - 1$	ϑ	$\vartheta + 50^\circ\text{C}$
	$2p$	$\vartheta + 50^\circ\text{C}$	ϑ

Bord (2q - 1 pour q = 1 ou 2
 (2q pour q = 3 ou 4

Milieu (2q pour q = 1 ou 2
 (2q - 1 pour q = 3 ou 4

et on a bien un carré latin 2×2 permettant de séparer les 4 effets ;

- moyenne
- plateau
- bord-milieu
- température

Pour chacun de ces effets, on a en prenant la moyenne des emplacements bord-milieu $2q - 1$ et $2q$ des plateaux $2p - 1$ et $2p$ des températures ϑ et $\vartheta + 50^\circ\text{C}$

un carré latin 4×4 comme indiqué par le tableau III ci-dessous ;

Tableau III

température moyenne $\vartheta + 25^\circ\text{C}$		Emplacement			
		1 et 2 (q = 1)	3 et 4 (q = 2)	5 et 6 (q = 3)	7 et 8 (q = 4)
Plateaux	1 et 2 (p = 1)	625	925	825	725
	2 et 3 (p = 2)	725	825	925	625
	3 et 4 (p = 3)	825	625	725	925
	5 et 6 (p = 4)	925	725	625	825

et pour chacun des 4 effets indiqués, on peut séparer 4 sous-effets (ou interactions) :

- moyenne
- plateau
- emplacement
- température

3 - ANALYSE DES RESILIENCES -

Le tableau IV ci-dessous donne pour chaque éprouvette :

- la température d'essai en $^\circ\text{C}$
- l'angle de remontée du pendule en degrés
- la résilience en kgm/cm^2
- l'aspect de la cassure

Tableau IV

θ °C de l'essai Angle de remontée en degrés - Rési- lience en kgm/cm ² - Aspect du pliage et indice de plasticité		Emplacement							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Numéro du Plateau	1	600 124 11,138 MD-3	650 132 7,694 TPD-1	900 128 9,370 P-5	950 130 8,520 LD-4	850 125 10,688 MD-3	800 124 11,138 P-5	750 122 12,054 MD-3	700 124 11,138 LD-4
	2	650 124 11,138 TPD-1	600 144 3,330 C-0	950 129 8,942 P-5	900 132 7,694 MD-3	800 135 6,504 TPD-1	850 131 8,104 FD-2	700 124 11,138 MD-3	750 121 12,520 P-5
	3	700 127 9,802 FD-2	750 130 8,520 TPD-1	800 128 9,370 FD-2	850 125 10,688 FD-2	950 131 8,104 FD-2	900 129 8,942 LD-4	650 140 4,658 C-0	600 137 5,744 C-0
	4	750 123 11,594 LD-4	700 126 10,242 FD-2	850 124 11,138 LD-4	800 123 11,594 FD-2	900 129 8,942 MD-3	950 129 8,942 P-5	600 147 2,380 C-0	650 125 10,688 FD-2
	5	800 137 5,744 FD-2	850 130 8,520 FD-2	600 136 6,120 TPD-1	650 132 7,694 TPD-1	750 139 5,012 TPD-1	700 122 12,054 LD-4	950 138 5,376 TPD-1	900 128 9,370 LD-4
	6	850 128 9,370 LD-4	800 134 6,894 TPD-1	650 124 11,138 P-5	600 142 3,970 C-0	700 136 6,120 C-0	750 131 8,104 TPD-1	900 127 9,802 LD-4	950 131 8,104 MD-3
	7	900 130 8,520 MD-3	950 131 8,104 P-5	700 124 11,138 MD-3	750 141 4,310 C-0	650 143 3,636 C-0	600 131 8,104 TPD-1	850 131 8,104 FD-2	800 133 7,290 TPD-1
	8	950 129 8,942 P-5	900 127 9,802 FD-2	750 133 7,290 TPD-1	700 138 5,376 C-0	600 142 3,970 C-0	650 135 6,504 TPD-1	800 139 5,012 TPD-1	850 124 11,138 MD-3

Dans ce paragraphe, nous étudierons seulement les valeurs des résiliences.

a/ Méthode d'analyse.

Reportons nous au tableau II et soient X_1 , X_2 , X_3 , et X_4 les 4 résiliences obtenues.

X_1 pour le plateau 2p - I, bord , θ

X_2 pour le plateau 2p - I, milieu, θ + 50°C

X_3 pour le plateau 2p , bord , θ + 50°C

X_4 pour le plateau 2p , milieu, θ

Nous supposons qu'à l'intérieur d'un tel carré de 4 résultats il n'y a pas d'interaction entre les 3 facteurs ; plateau, bord-milieu, température.

Nous verrons plus loin l'existence d'une interaction entre bord-milieu et température mais on peut la considérer comme négligeable pour un écart de température de 50°C seulement.

Les 4 résultats peuvent alors s'écrire :

$$X_1 = \mu + a_1 + \beta_1 + c_1 + \delta_1$$

$$X_2 = \mu + a_2 + \beta_1 + c_2 + \delta_2$$

$$X_3 = \mu + a_2 + \beta_2 + c_1 + \delta_3$$

$$X_4 = \mu + a_1 + \beta_2 + c_2 + \delta_4$$

- où μ désigne la moyenne des résultats de l'essai 2 x 2, supposés non entachés d'erreurs aléatoires.

- où a désigne l'effet température (a_1 pour ϑ et a_2 pour $\vartheta + 50^\circ\text{C}$)

$$\text{avec } a_1 + a_2 = 0$$

- où β désigne l'effet plateau (β_1 pour le plateau 2q - I et β_2 pour le plateau 2q).

On supposera que β est aléatoire, distribué normalement avec une moyenne nulle et un écart-type σ_1 et que tous les β sont 2 à 2 indépendants en probabilité.

- où c désigne l'effet bord-milieu (c_1 pour le bord, c_2 pour le milieu)

$$\text{avec } c_1 + c_2 = 0$$

- où δ désigne le terme d'erreur (échantillonnage et mesure).

On supposera que δ est aléatoire, distribué normalement avec une moyenne nulle et un écart-type σ_2 et que tous les δ sont 2 à 2 indépendants en probabilité et également indépendants des β .

On peut remplacer ces 4 variables X_1, X_2, X_3, X_4 par quatre autres Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 :

$$Y_1 = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 4\mu + 2(\beta_1 + \beta_2) + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$$

$$Y_2 = X_1 - X_2 - X_3 + X_4 = 2(a_1 - a_2) + \delta_1 - \delta_2 - \delta_3 + \delta_4$$

$$Y_3 = X_1 + X_2 - X_3 - X_4 = 2(\beta_1 - \beta_2) + \delta_1 + \delta_2 - \delta_3 - \delta_4$$

$$Y_4 = X_1 - X_2 + X_3 - X_4 = 2(c_1 - c_2) + \delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4$$

Ces 4 variables $Y_1, Y_2, Y_3,$ et Y_4 sont indépendantes entre elles en probabilité aussi bien vis à vis des termes aléatoires δ que des termes aléatoires β .

L'ensemble des 16 valeurs de Y_1 peut donc être analysé comme carré latin ordinaire. Il en est de même de Y_2, Y_3, Y_4 .

Avant d'explicitier l'analyse de ces 4 variables, nous conviendrons des appellations suivantes :

- Effet A "température" : écarts entre les 4 groupes de températures :

- 600 - 650
- 700 - 750
- 800 - 850
- 900 - 950

- Effet B "50° C" : écarts dans les groupes de températures c'est-à-dire entre :

- 600 et 650
- ou 700 et 750
- ou 800 et 850
- ou 900 et 950

- Effet D "bord-milieu" : écarts entre les éprouvettes :

- 1 et 2
- ou 3 et 4
- ou 5 et 6
- ou 7 et 8

- Effet E "emplacement" : écarts entre les 4 groupes d'éprouvettes :

- 1 - 2
- 3 - 4
- 5 - 6
- 7 - 8

En fait, comme il y a symétrie de la tranche il n'y a pas lieu d'associer les emplacements 1 - 2 entre eux plutôt qu'avec les emplacements 7 - 8, de même pour les emplacements 3 - 4 d'une part et 5 - 6 d'autre part. Cette association n'est qu'une commodité d'analyse du carré latin 4 × 4.

On doit donc considérer seulement 2 emplacements distincts : le centre (éprouvettes 3, 4, 5 et 6) et l'extérieur (éprouvettes 1, 2, 7 et 8).

Nous appellerons E' l'effet pouvant résulter de différences significatives entre ces 2 types d'emplacement.

- Effet F "groupe de plateaux" : écarts entre les 4 groupes de plateaux

- 1 - 2
- 3 - 4
- 5 - 6
- 7 - 8

- Effet G "Entre plateaux dans les groupes de plateaux" : écarts entre les plateaux

- 1 et 2
- ou 3 et 4
- ou 5 et 6
- ou 7 et 8

En fait, la distinction entre les effets F' et G est purement formelle

étant donné que les plateaux ont été choisis au hasard. Cette décomposition n'est ici encore qu'une commodité d'analyse du carré latin 4×4 .

Nous verrons lorsque nous arriverons à l'analyse de variance de l'ensemble des résultats que les effets F et G pourront être regroupés pour donner naissance à l'effet "dispersion entre plateaux".

Explicitons également la signification des effets aléatoires β et δ .

Erreur intra-plateau δ : elle provient de la différence entre les résultats que l'on obtiendrait en cassant à la même température 2 éprouvettes découpées dans le même plateau, du même côté (bord ou milieu) et au même emplacement (1 - 2, 3 - 4, 5 - 6, ou 7 - 8).

Erreur entre-plateau β : elle provient de la différence entre les résiliences à la même température de 2 éprouvettes découpées dans 2 plateaux différents, du même côté, (bord ou milieu et au même emplacement (1 - 2, 3 - 4, 5 - 6, ou 7 - 8).

1/ Analyse des Y_1 .

Elle met en évidence les effets :

Moyenne générale	avec 1 ddl
A - Température	avec 3 ddl
E - Emplacement	avec 3 ddl
F - Entre groupes de plateaux	avec 3 ddl
- Résiduelle intra-plateaux	avec 6 ddl

En fait, l'effet E est fictif et doit être remplacé par l'effet E' : Centre - extérieur et l'analyse devient :

Moyenne générale	avec 1 ddl
A - Température	avec 3 ddl
E' - Centre - Extérieur	avec 1 ddl
F - Entre groupes de plateaux	avec 3 ddl
Résiduelle intra plateaux	avec 8 ddl

2/ Analyse des Y_2 .

Elle met en évidence les effets :

B - 50° C	avec 1 ddl
C = AB - linéarité de l'effet température	avec 3 ddl
EB - interaction 50° C x Emplacement	avec 3 ddl
FB - interaction 50° C x groupe de plateaux	avec 3 ddl
- résiduelle intra plateaux	avec 6 ddl

En fait l'interaction EB est fictive et doit être remplacée par l'interaction E'B : 50° C x Centre -Extérieur et l'analyse devient :

B - 50° C	avec 1 ddl
C = AB - linéarité de l'effet température	avec 3 ddl
E'B - Interaction 50° C x Centre Extér.	avec 1 ddl
FB - Interaction 50° C x groupes de plateaux	avec 3 ddl
Résiduelle intra plateaux	avec 8 ddl

L'interaction C = AB : 50°C x température rend compte de la linéarité de l'effet température puisqu'elle permet de tester le fait que les écarts en résilience dus aux 4 différences de températures 600-625, 700-725, 800-825, ou 900-925 sont ou non, différents.

3/ Analyse des Y₃.

Les Y₃ ne comportent que des termes aléatoires β et δ mais alors que les 16 δ sont différents, il n'en est pas de même des β qui sont les mêmes pour un même groupe de plateaux. De ce fait, l'analyse des Y₃ met en évidence les effets :

G - entre plateaux intra groupes de plateaux	avec 4 ddl
- résiduelle intra plateaux	avec 12 ddl

4/ Analyse des Y₄.

Elle met en évidence les effets :

D - bord-milieu	avec 1 ddl
AD - interaction bord-milieu x température	avec 3 ddl
ED - interaction bord-milieu x Emplacement	avec 3 ddl
FD - interaction bord-milieu x Groupe de plateaux	avec 3 ddl
- Résiduelle intra-plateaux	avec 6 ddl

En fait, l'interaction ED est fictive et doit être remplacée par l'interaction E'D : Bord-Milieu x Centre Extérieur et l'analyse devient :

D - Bord-Milieu	avec 1 ddl
AD - interaction Bord-milieu x Température	avec 3 ddl
E'D - interaction Bord-milieu x Centre-Extérieur	avec 1 ddl
FD - interaction Bord-milieu x groupe de plateaux	avec 3 ddl
- Résiduelle intra-plateaux	avec 8 ddl

b/ Analyse de variance

Le tableau V ci-dessous donne pour les 16 groupes de 4 essais les valeurs de Y₁, Y₂, Y₃ et Y₄ en kgm/cm².

Tableau V

Y_1 Y_2 Y_3 Y_4		Emplacements			
		1 & 2	3 & 4	5 & 6	7 & 8
Groupes de Plateaux	1 & 2	625°	925°	825°	725°
		+ 33,300	+ 34,526	+ 36,434	+ 46,850
		- 4,364	- 0,398	- 1,150	- 2,298
		+ 4,364	+ 1,254	+ 7,218	- 0,466
		+ 11,252	+ 2,098	+ 2,050	+ 0,466
	3 & 4	725°	825°	925°	625°
		+ 40,158	+ 42,790	+ 34,930	+ 23,470
		- 0,070	- 0,862	+ 0,838	- 7,222
		- 3,514	- 2,674	- 0,838	- 2,666
		+ 2,634	- 1,774	+ 0,838	+ 9,394
	5 & 6	825°	625°	725°	925°
		+ 30,528	+ 28,922	+ 31,290	+ 32,652
		- 5,252	- 8,742	+ 5,058	+ 5,692
		- 2,000	- 1,294	+ 2,842	- 3,160
		- 0,300	+ 5,594	+ 9,026	+ 2,296
	7 & 8	925°	725°	625°	825°
+ 35,368		+ 28,114	+ 22,214	+ 31,544	
+ 1,276		+ 4,914	+ 1,934	- 6,940	
- 2,120		+ 2,782	+ 1,266	- 0,756	
	- 0,444	+ 8,742	+ 7,002	+ 5,312	

Les 4 décompositions en carrés qui ont été indiquées plus haut, peuvent être regroupées sous forme d'une seule analyse de variance donnée au Tableau VI ci-après.

Dans ce tableau, on a opéré 2 regroupements :

$\sigma_1^2 + 8 \sigma_2^2$ - Celui des effets F et G dont le carré moyen a pour espérance $\sigma_1^2 + 8 \sigma_2^2$ avec 7 degrés de liberté.

- Celui des résiduelles calculées à partir de Y_1 (8 ddl) Y_2 (8 ddl), Y_3 (12 ddl) et Y_4 (8 ddl) dont le carré moyen a pour espérance σ_1^2 avec 36 degrés de liberté.

Remarquons enfin que toutes les sommes de carrés ont d'abord été divisées par 4 pour tenir compte du fait que Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 sont des combinaisons linéaires de 4 variables indépendantes. De ce fait, la somme des carrés totale est égale à la somme des carrés des 64 résiliences de départ.

Les résultats sont les suivants :

1/ La dispersion entre plateaux est significativement plus élevée que la dispersion intra-plateaux. On peut estimer :

$$\begin{array}{l} \sigma_1^2 \text{ par } \mathfrak{S}_1^2 = 3,35 \\ \sigma_2^2 \text{ par } \mathfrak{S}_2^2 = 0,70 \quad \frac{(8,9235 - 3,3472)}{8} \end{array}$$

Tableau VI

Source de Variation	Vari- ble Ana- lysée	ddl	Sommes de carrés	Carrés moyens	Espérance du carré moyen	F de Sné- décor	Signi- fica- tion
Moyenne générale	Y_1	1	4440,3898	4440,3898	$M + \sigma_1^2 + 8\sigma_2^2$	X	
F + G = Entre-plateaux	Y_1, Y_3	7	62,4642	8,9235	$\sigma_1^2 + 8\sigma_2^2$	2,67	S
A=Température	Y_1	3	56,1345	18,7115	$A + \sigma_1^2$	5,60	HS
B = 50° C	Y_2	1	4,8323	4,8323	$B + \sigma_1^2$	1,44	NS
AB=C= Linéarité de la température	Y_2	3	35,9672	11,9892	$C + \sigma_1^2$	3,59	S
D=Bord-Milieu	Y_4	1	64,3725	64,3725	$D + \sigma_1^2$	19,3	THS
E'= Centre- Extérieur	Y_1	1	3,3535	3,3535	$E' + \sigma_1^2$	~ 1	NS
AD	Y_4	3	35,0895	11,6964	$AD + \sigma_1^2$	3,50	S
BE'	Y_2	1	6,7405	6,7405	$BE' + \sigma_1^2$	2,02	NS
BF	Y_2	3	3,4710	1,1570	$BF + \sigma_1^2$	< 1	NS
DE'	Y_4	1	0,1375	0,1375	$DE' + \sigma_1^2$	< 1	NS
DF	Y_4	3	2,8592	0,9531	$DF + \sigma_1^2$	< 1	NS
Résidu intra- plateaux	Y_1, Y_2, Y_3, Y_4	36	120,4995	3,3472	σ_1^2		
Total	X_1, X_2, X_3, X_4	64	4836,3112				

avec NS : non signif. au risque 5 %
 S : signif. au risque compris entre 5 et 1 %
 HS : signif. au risque compris entre 1 et 1 %
 THS : significatif au risque 1 %.

2/ Les effets ou interactions significatifs sont par ordre d'importance :

D - Bord-Milieu très hautement significatif	(à 1 %.)
A - Température hautement significative	(à 1 %)
AD - interaction température x bord-milieu significative	(à 5 %)
C=AB - linéarité de la température significative	(à 5 %)
F - Entre-plateaux significatif	(à 5 %)

En clair, cela signifie que la température d'essai influe sur la résistance mais qu'elle n'influe pas de la même manière suivant qu'on se trouve au bord ou au milieu de la tranche et que d'autre part cet effet n'est pas linéaire.

c/ Conclusions.

Les effets et interactions significatifs étant connus, on peut calculer les moyennes qui représentent ces effets et dresser la figure 3 à partir du Tableau VII ci-dessous :

Tableau VII

	Bord	Milieu	Différence Bord-milieu
600 - 650°C	8,82	4,67	+ 4,15
700 - 750°C	10,46	7,85	+ 2,61
800 - 850°C	9,16	8,50	+ 0,66
900 - 950°C	8,89	8,29	+ 0,60
Moyenne	9,33	7,33	

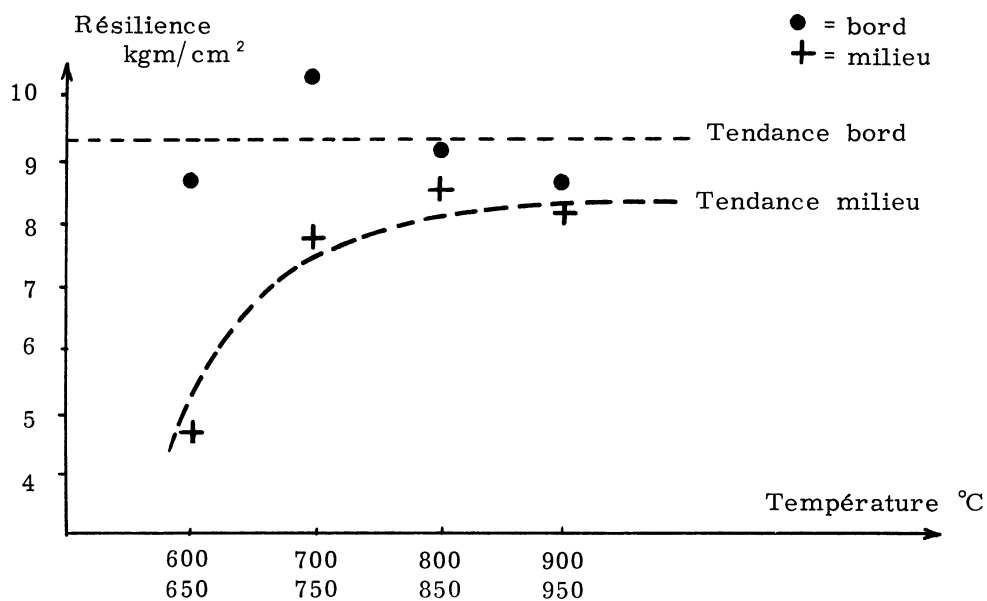


Figure 3

On en déduit que :

La résilience croît avec la température pour des éprouvettes prélevées au milieu des plateaux. Elle est sensiblement constante pour des éprouvettes prélevées au bord du plateau. Même à 900-950°C, la résilience au milieu du plateau n'atteint pas les valeurs obtenues pour le bord.

4 - ANALYSE DES CASSURES -

Nous avons classé les 80 éprouvettes d'après l'aspect du pliage et avons ensuite fait des coupes dans le classement de manière à constituer 6 catégories repérées comme suit :

	Indice de plasticité
P - plastique	5
LD - Légèrement déchiré	4
MD - Moyennement déchiré	3
FD - Fortement déchiré	2
TPD - Très profondément déchiré	1
C - cassé	0

Le repère de la catégorie et l'indice de plasticité figurent pour toutes les éprouvettes au tableau IV.

L'analyse des résiliences ayant montré qu'il fallait prendre en considération les effets Bord-Milieu, température et leur interaction, nous avons calculé les indices de plasticité moyens pour les 8 cases du tableau VII et on a le tableau VIII ci-dessous, illustré par la figure 4.

Tableau VIII

	Bord	Milieu	Différence Bord-Milieu
600 - 650 °C	1,75	0,25	+ 1,5
700 - 750 °C	3	1,25	+ 1,75
800 - 850 °C	2,875	1,75	+ 1,125
900 - 950 °C	4,25	3	+ 1,25
	2,97	1,56	+ 1,41

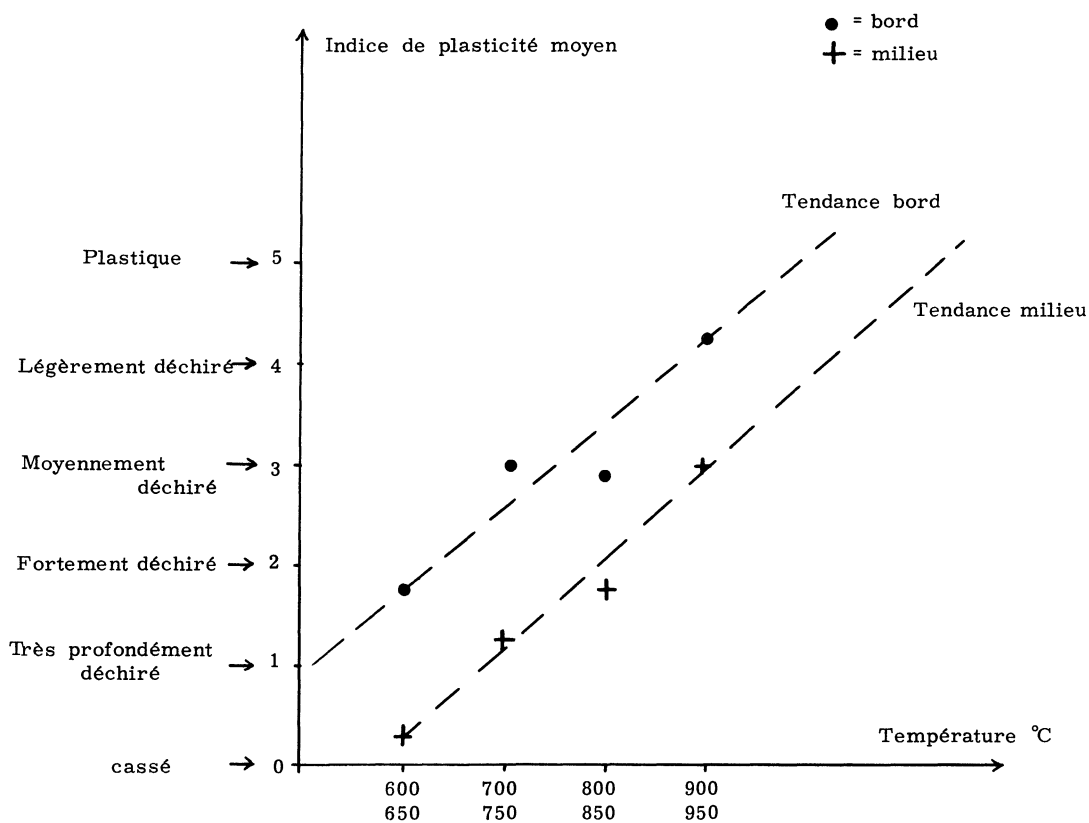


Figure 4

On voit sur la figure 4 que la plasticité augmente avec la température, qu'elle est meilleure pour les éprouvettes bord que pour les éprouvettes milieu, mais que, fait nouveau, l'effet bord-milieu ne dépend pas de la température et est de l'ordre de un indice et demi.

Par ailleurs, pour le bord, alors que la résilience n'augmente pas avec la température, l'indice de plasticité augmente.

A la figure 5, nous donnons la résilience moyenne en fonction de l'indice de plasticité.

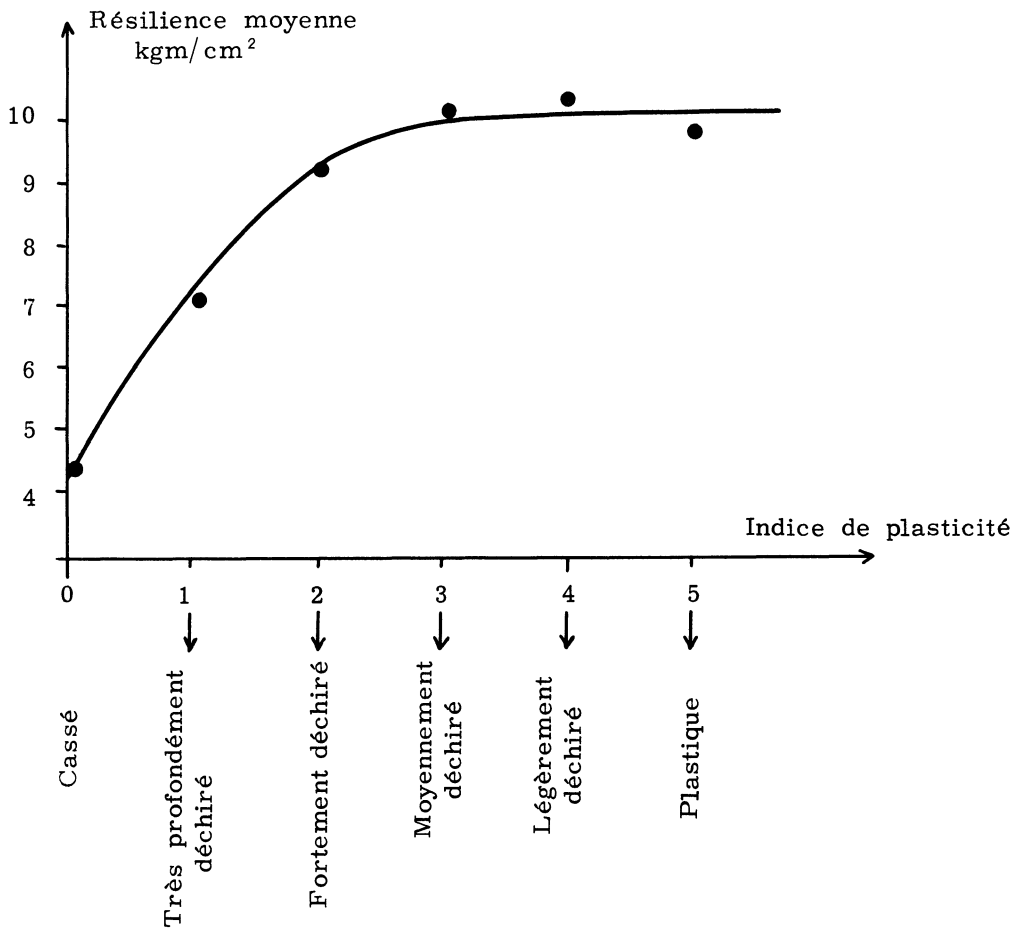


Figure 5

On voit qu'il existe deux zones distinctes :

Une zone de plasticité 0, 1, 2, où la plasticité et la résilience croissent en même temps.

Une zone de plasticité 3, 4, 5 où la plasticité continue à augmenter alors que la résilience reste constante. C'est ce qui explique que dans le cas des éprouvettes bord, la résilience reste constante lorsque la température varie et qu'en même temps la plasticité augmente.

5 - CONCLUSIONS GENERALES -

L'examen de la figure 4 montre que, aussi bien pour la région à cristallisation basaltique (bord), que pour la région centrale à grains équiaxes de petites dimensions, et à nombreuses porosités, la plasticité augmente avec la température entre 600 et 950°C.

Pour la région basaltique, la plasticité est complètement atteinte pour 950°C. Par contre, pour la région centrale, la plasticité n'est pas atteinte pour la température d'essai la plus élevée. En extrapolant les résultats obtenus il faudrait pour atteindre une plasticité complète faire l'essai aux environs de 1100°C, en supposant que la linéarité de l'indice de plasticité en fonction de la température reste valable au-dessus de 900 - 950°C.

La figure 3 et surtout la figure 5 montrent qu'à partir d'un indice de plasticité de l'ordre de 3 (éprouvettes moyennement déchirées), la résilience reste constante et voisine de 10 kgm/cm². De ce point de vue il n'y a donc aucun inconvénient à augmenter la température de laminage à chaud.

Si on postule qu'il faut laminier à une température telle que l'essai conduise en tout point de la tranche à un pliage plastique, on est donc conduit à préconiser une température de laminage aussi élevée que possible compte tenu des autres impératifs de la fabrication.

Si l'on ne s'intéressait qu'à la zone basaltique du plateau on pourrait se contenter d'une température de l'ordre de 950°C.

Nous notons enfin que l'estimation \mathfrak{S}_1^2 de la dispersion intra plateaux, σ_1^2 est égale à 3,35 ce qui représente une erreur inférieure dans 95 % des cas à

$$\pm 2 \sqrt{3,35} \text{ soit } \pm 3,7 \text{ kgm/cm}^2$$

ce qui est très élevé en comparaison de ce que nous avons obtenu à l'occasion d'autres études, en particulier pour du cuivre désoxydé au phosphore pour lequel l'erreur à 95 % était inférieure à $\pm 0,72$ kgm/cm².

Une des raisons de cette dispersion élevée dans le cas du 92/6/2 peut résider dans le fait qu'il s'agit d'un alliage biphasé.