REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

O. DINER
J. ARSONNEAU

Influence de certains facteurs de fabrication sur les propriétés mécaniques finales de fils de cuivre émaillés ∅ 0,32 mm, pour deux qualités différentes de cuivre

Revue de statistique appliquée, tome 10, nº 2 (1962), p. 17-39
<http://www.numdam.org/item?id=RSA_1962__10_2_17_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/

INFLUENCE DE CERTAINS FACTEURS DE FABRICATION SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES FINALES DE FILS DE CUIVRE ÉMAILLÉS ϕ 0,32 mm, POUR DEUX QUALITÉS DIFFÉRENTES DE CUIVRE

O. DINER (1) et J. ARSONNEAU (2)

RESUME

Les trois séries d'essais industriels analysés dans ce texte ont permis d'étudier l'influence de divers facteurs sur les caractéristiques mécaniques finales des fils émaillés de ϕ 0,32 mm :

- allongement à la rupture ;
- résistance à la traction, et en particulier,
- souplesse (angle de retour).

Les facteurs introduits à deux niveaux (3) dans cette étude ont été les suivants :

- qualité de cuivre HC (réf. A et B, destinés spécialement à la fabrication de fils émaillés) ;
- température de laminage (pour le cuivre de qualité B) ;
- recuit intermédiaire au ϕ 1,63 mm ;
- recuit en continu sur Syncro au ϕ 0,32 mm ;
- conditions de cuisson du vernis isolant qui ont pu être introduites à deux niveaux par l'utilisation de deux vernis différents (vernis Polyester P non téréphtalique et vernis Polyuréthane U) (4) .

Pour les essais effectués dans le cadre de cette étude, l'utilisation de cuivre spécial (B) et le laminage de ce dernier à température plus basse n'ont pas conduit à une amélioration appréciable des propriétés mécaniques ; en particulier, la souplesse n'est pas meilleure que pour le cuivre ordinaire (A).

---

(1) Ingénieur-Chef de Service au Centre de Recherches des Tréfileries et Laminoirs du Havre, Antony Seine.

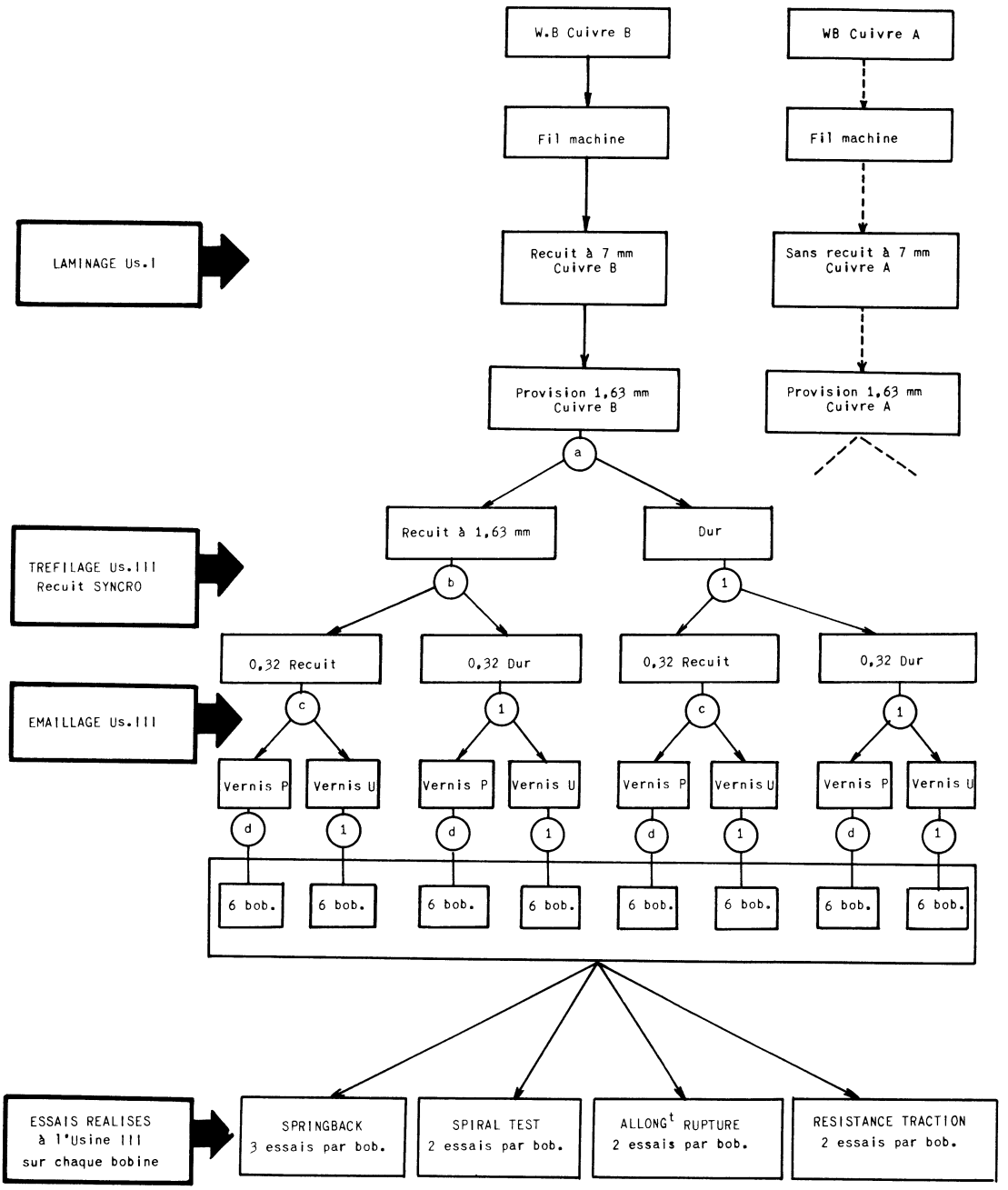
(2) Ingénieur au Centre de Recherches d'Antony, ibid.

(3) Ce texte rend compte de l'analyse statistique des résultats des mesures effectuées sur les fils au stade final (ϕ = 0,32 mm, fils émaillés). Le plan d'expérience factorielle qui introduisait chaque fois 4 des 5 facteurs cités, et à 2 niveaux chacun, a été répété pour 3 séries différentes.
Les considérations fondamentales (mécanismes métallurgiques, structures, etc...) ne sont pas abordées dans ce qui suit : elles font l'objet d'une étude distincte.

(4) Chaque fois que l'on voudra mettre en cause les conditions de cuisson du vernis, on abrégera cette expression par "Vernis" ; mais il faut souligner que ce n'est pas la nature chimique de ce vernis qui interviendra, mais seulement les conditions thermiques de sa polymérisation (température et durée de cuisson, choisies par ailleurs pour les caractéristiques finales conférées à l'isolant).

TABLEAU A

PROCESSUS DE FABRICATION
du fil pour la 1ère série d'essais.



On peut souligner la concordance des résultats sur fils finis de ϕ 0,32 mm (tréfilés de ϕ 1,63 mm au ϕ 0,32 mm à l'usine III, puis émaillés), pour des provisions de fils préparées soit à l'usine I, soit à l'usine II.

Dans tous les cas examinés ici, le recuit intermédiaire au ϕ 1,63 mm s'est montré favorable (on gagne 10° en moyenne sur l'angle de retour au ϕ final) ; le contraire a été observé pour le recuit Syncro au ϕ 0,32 mm.

De plus, cette étude a confirmé que la mesure de l'angle de retour "Springback" (1) était de nature différente de celles de l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction ; cette détermination est également plus sensible.

1 - REALISATION DES ESSAIS.

En vue de rechercher si l utilisation de cuivre de qualité B au lieu de cuivre de qualité A et si le laminage à température plus basse conduisaient à une amélioration de la souplesse du fil émaillé, trois séries d'essais industriels portant sur 5 tonnes environ chaque fois, ont été effectuées par des Usines I, II et III.

1ère série

L'Usine III a émaillé sur une même machine dite "à grands galets" du cuivre de qualité A et B, chacun d'eux ayant subi divers traitements indiqués sur le Tableau A. Les deux "cuivres" avaient été laminés à l'Usine I (2).

Chaque facteur intervenant à deux niveaux, nous avons repéré le niveau le plus élevé, c'est-à-dire celui conduisant au prix de revient le plus élevé, par une lettre (l'absence de repère se rapporte au niveau le plus bas) :

a : pour le cuivre de qualité B.
b : pour le recuit intermédiaire au ϕ 1,63 mm.
c : pour le recuit effectué en continu, en ϕ final, sur machine multiple de tréfilage (Syncro).
d : pour l'émaillage au vernis Polyester P (3) : ce vernis nécessite une température de cuisson plus élevée que le vernis Polyuréthane (non téréphtalique) lequel est destiné à la fabrication de fils émaillés "soudables à l'étain".

L'émaillage est réalisé en disposant sur la machine alternativement 6 roquettes de fil B et 6 de fil A.

Pour chacune des $2^4 = 16$ catégories de fil émaillé, on disposait ainsi de 6 bobines. Sur chacune d'elles, les mesures suivantes ont été effectuées :

- Springback	3 essais par bobine
- Allongement à la rupture	: 2 - - -
- Résistance à la traction	: 2 - - -
- Spiral-test	: 2 (non analysé ici).

---

(1) L'essai de Springback prévu par les normes américaines NEMA permet de caractériser la souplesse d'un fil en mesurant l'angle de déroulement lent de 3 spires initialement enroulées, sous une charge déterminée, sur un mandrin métallique de diamètre normalisé.

(2) Notons que, pour les 3 séries d'essais, le fil machine B avait subi un recuit au ϕ 7 mm ; de toutes façons nous verrons dans le texte que le Cuivre B ne s'est pas distingué du Cuivre A.

(3) Ces deux vernis seront désignés respectivement Vernis P et Vernis U dans les tableaux.

En résumé, le cycle des opérations a été le suivant :

. Laminage et tréfilage jusqu'au Ø 1,63 mm à l'Usine I. (Cuivre A et Cuivre B).
. Tréfilage jusqu'au Ø 0,32 mm à l'Usine III.
. Emaillage à l'Usine III.
. Mesures effectuées à l'Usine III.

2ème série

. Laminage et tréfilage jusqu'au Ø 1,63 mm à l'usine II. (Cuivre A et Cuivre B).
. Tréfilage jusqu'au Ø 0,32 mm à l'usine III.
. Emaillage à l'usine III.
. Mesures effectuées à l'usine III.

3ème série

. Laminage à l'usine II de cuivre B à deux températures différentes pour les deux dernières passes.

- Dans le 1er cas, la température des wire-bars en début de laminage était de 800°C, la température en fin de laminage était de 650°C.
- Dans le 2ème cas, la température des wire-bars était la même, mais on a laissé refroidir le fil pendant 45 secondes entre la 8ème et la 9ème passe ; la température en fin de laminage était alors < 600° C.

. Tréfilage jusqu'au Ø 1,63 mm à l'usine II.
. Tréfilage jusqu'au Ø 0,32 mm à l'usine III.
. Emaillage à l'usine III.
. Mesures effectuées à l'usine III.

2 - MODE D'ANALYSE (cf. annexe 2)

Chaque facteur intervenant à deux niveaux, il a été possible de procéder à une analyse factorielle qui permet de mettre en évidence et d'évaluer les influences des différents facteurs et des interactions éventuelles.

2.1 - Effet simple.

Le principe de l'analyse consiste à déterminer les écarts moyens dus à l'introduction de chaque facteur.

La variance d'un effet a été estimée à partir de la dispersion entre les 6 bobines d'une même catégorie (s_{IB}). Le nombre de degrés de liberté disponi-

---

N.B. - 1 : Les moyennes observées relatives à chaque groupe de 6 bobines, figurent en annexe 1, dans les tableaux F, G et H.

N.B. - 2 : Notons que le fil machine B avait subi un recuit au Ø 7 mm, mais que de toutes façons nous verrons dans le texte que le Cuivre B ne s'est pas distingué du Cuivre A.

ble était d'ailleurs plus élevé que celui de la variance résiduelle de l'analyse.

L'intervalle de confiance à 95 % d'un effet (ou d'une interaction) pour n facteurs, est :

$$I.C. = \pm 2s_o = \frac{s_{IB}}{\sqrt{6} \times 2^{(\frac{n}{2}-1)}} \qquad \text{(cf. annexe 2)}$$

Pour les trois caractéristiques analysées, on a les intervalles suivants à 95 % :

. Springback = ± 1,30°
. Allongement à la rupture = ± 0,50 %
. Résistance à la traction = ± 0,16 kg/mm²

D'une façon générale, si un facteur n'a pas d'influence significative, compte tenu des fluctuations d'échantillonnage, il y a 95 chances sur 100 pour que l'écart moyen observé par l'introduction de ce facteur soit à l'intérieur de I. C. ; dans le cas contraire, on dira que le facteur a agi de façon significative.

2.2 - Interaction.

Dans le cas où il n'y a pas d'interaction, les effets des différents facteurs sont additifs.

Par contre, s'il y a interaction entre deux facteurs, l'influence de l'un d'eux dépend du niveau auquel intervient l'autre. De plus, l'écart observé par l'introduction de chaque facteur est un écart moyen correspondant aux deux niveaux de l'autre facteur.

L'analyse permet d'estimer directement l'influence de chaque facteur pour les différents niveaux des autres facteurs.

3 - SPRINGBACK α ° (moyenne générale pour les 3 séries : 95°)

- Les résultats des analyses effectuées séparément pour les 3 séries figurent dans le tableau B.
- Les trois séries de mesures correspondent à des fils provision préparés à l'Usine II ou à l'Usine I à des époques différentes. Elles se recoupent d'une manière très satisfaisante, tant pour l'influence des facteurs étudiés que par l'absence presque totale de leurs interactions.

Sur le tableau B nous avons séparé les effets principaux des interactions de 1er, 2ème et 3ème ordre, pour chacune des trois séries.

On note que seule l'interaction "Recuit Syncro x Conditions de cuisson du vernis" est significative.

3.1 - Qualité de cuivre (cf. séries 1 et 2)

. La qualité de cuivre n'a pas d'influence significative : le fait d'utiliser du cuivre B ne diminue en moyenne l'angle de retour que de 1,2° (industriellement inappréciable).

Tableau B

SPRINGBACK α°

Cuivre B et Cuivre A moyennes		Série 1 $\bar{\alpha}$:96,2	Série 2 $\bar{\alpha}$:94,6	Cuivre B laminé à l'Us.II à 2 tp^{res}		Série 3 $\bar{\alpha}$: 93
Effets principaux	Repères	Ecarts moyens E		Effets principaux	Repères	Ecarts moyens
Effet Cuivre B	a	- 1,1	- 1,4	Effet laminage à basse température	l	- 1,7
Effet Recuit à 1,63	b	- 9,0	- 12,4	Effet Recuit à 1,63	b	- 10,8
Effet Recuit Syncro à 0,32	c	+ 11	+ 9,7	Effet Recuit Syncro	c	+ 9,2
Effet Vernis Polyester P	d	- 8,8	- 7,8	Effet Vernis Polyester P	d	- 6,6
Interactions du 1er ordre						
Cuivre B × Recuit à 1,63	ab	- 0,66	+ 1,02	Temp. lam. × Rec. à 1,63	lb	+ 0,60
Cuivre B × Recuit Syncro	ac	- 0,59	- 0,15	Temp. lam. × Rec. Syncro	lc	- 0,30
Cuivre B × Vernis P	ad	+ 0,03	+ 0,75	Temp. lam. × Vernis P	ld	+ 0,48
Rec. 1,63 × Rec. Syncro	bc	+ 0,56	- 1,00	Rec. à 1,63 × Rec. Syncro	bc	- 1,20
Rec. 1,63 × Vernis P	bd	- 0,08	+ 0,85	Rec. à 1,63 × Vernis P	bd	+ 0,82
Rec. Syncro × Vernis P	cd	+ 4,10	+ 3,02	Rec. Syncro × Vernis P	cd	+ 1,82
Interactions du 2e ordre						
Cuivre B × Rec. 1,63 × Rec. Syncro	abc	- 1,14	+ 0,18	T. lam. × Rec. 1,63 × Rec. Syncro	lbc	- 0,38
Cuivre B × Rec. 1,63 × Vernis	abd	- 2,70	- 0,58	T. lam. × Rec. 1,63 × Vernis	lbd	+ 0,55
Cuivre B × Rec. Syncro × Vernis	acd	- 1,41	- 1,65	T. lam. × Rec. Syncro × Vernis	lcd	+ 0,45
Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	bcd	- 0,09	- 0,40	Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	bcd	- 0,35
Interactions du 3e ordre						
Cu B × Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	abcd	+ 0,008	- 0,08	T. lam. × Rec 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	lbcd	+ 0,12

Intervalles de confiance d'un effet ou d une interaction			
à 95 %	:	± 1,30	S ------
99 %	:	± 1,67	HS ———
998 ‰	:	± 2,01	T.H.S ———

. Il n'y a pas d'interaction entre la qualité de cuivre et les autres facteurs.

3.2 - Température de laminage (cf. série 3)

. La température de laminage du cuivre B a, statistiquement, une influence hautement significative, mais négligeable sur le plan pratique pour les deux températures obtenues à l'Usine II, puisque l'on a observé à température plus basse une diminution de l'angle de retour de 1,7° en moyenne seulement.

. L'analyse n'a pas mis en évidence d'interaction entre ce facteur et les autres.

3.3 - Recuit intermédiaire au Ø 1,63 mm (cf. séries 1,2 et 3).

. Son influence est très hautement significative : il permet d'obtenir un angle de retour réduit de 10° en moyenne dans tous les cas et aussi bien pour les deux vernis utilisés dans cette étude (Polyester P - (non téréphtalique)- et Polyuréthane U).

. Il n'y a pas d'interaction entre le recuit au Ø 1,63 mm et les autres facteurs (c'est-à-dire qu'en particulier, il n'existe pas de combinaison des facteurs aux niveaux étudiés, permettant d'éviter le recuit au Ø 1,63mm).

3.4 - Recuit en continu sur Syncro au Ø 0,32 mm (cf. séries 1,2 et 3).

. Le recuit a une influence très hautement significative : il diminue la souplesse du fil : α augmente de 10° "en moyenne", mais l'existence d'une interaction très hautement significative entre le recuit Syncro et les conditions de cuisson du vernis d'émaillage, montre que cette influence défavorable n'est pas la même vis-à-vis des deux vernis d'émaillage.

Cette interaction "cd" est égale à + 3° en moyenne, pour les 3 séries.

Pour les 3 séries confondues, le recuit Syncro accroît en fait l'angle de retour de la quantité :

"c" + "cd" = 13° pour le vernis Polyester P.
"c" - "cd" = 7° pour le vernis Polyuréthane U.

D'une façon générale, l'interaction intervient avec son propre signe, par rapport à l'action moyenne dans les combinaisons où les deux facteurs sont simultanément présents, ou absents.

3.5 - Influence des conditions de cuisson du vernis d'émaillage.("Vernis")

. L'effet de ce facteur, introduit en utilisant 2 vernis à cuissons différentes et estimé dans la ligne "d", n'est qu'une valeur moyenne à laquelle se superpose, comme précédemment, l'interaction "Vernis" - Recuit Syncro.

. Compte tenu de ce que les autres interactions ne sont pas considérées comme significatives, on peut dire qu'il existe en moyenne, pour les deux vernis appliqués sur des fils ayant subi les mêmes traitements, un écart final pour l'angle de retour :

Vernis Polyuréthane - Vernis Polyester P = 4,7° pour des fils recuits sur Syncro.

Vernis Polyuréthane - Vernis Polyester P = 10,7° pour des fils durs sur Syncro.

3.6 - L'interaction Recuit Syncro - Conditions de cuisson du vernis peut se schématiser de la manière suivante (par exemple pour le cuivre A ou B, ayant subi le recuit intermédiaire au ∅ 1,63 mm) : figure 1.

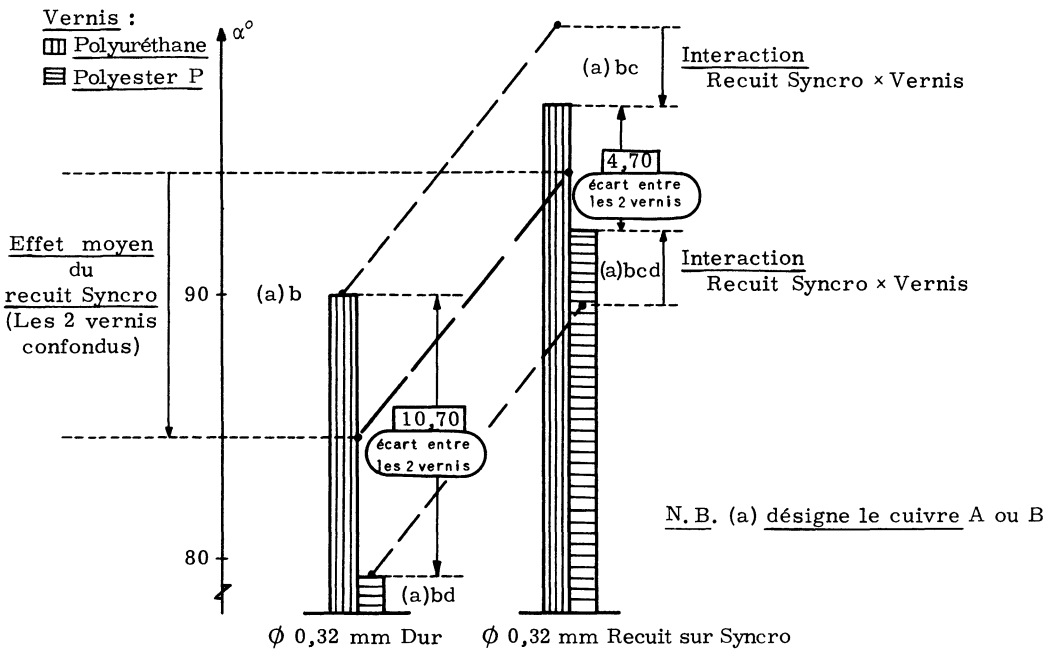


Figure 1 - Interaction "Recuit Syncro × Conditions de cuisson du vernis d'émaillage" sur le Springback (α°) de fils de cuivre A ou B de ∅ 0,32 mm ayant subi le recuit intermédiaire au ∅ 1,63 mm.

4 - ALLONGEMENT A LA RUPTURE A % (moyenne générale : 28,3 %)

Les trois analyses factorielles sont résumées dans le tableau C.

La seule interaction significative est celle existant entre le recuit au ∅ 1,63 mm et les conditions de cuisson du vernis.

4.1 - Qualité de cuivre (séries 1 et 2)

Ce facteur ne s'est pas montré significatif : le cuivre B ne conduit pas à un allongement à la rupture plus élevé que celui du cuivre ordinaire.

4.2 - Température de laminage (série 3)

Dans ces expériences la diminution de température de laminage essayée à usine II n'a augmenté l'allongement à la rupture que de 1 %, donc d'une quantité qui nous paraît sans intérêt sur le plan industriel.

Tableau C

ALLONGEMENT A LA RUPTURE A%

Cuivre B et Cuivre A moyennes		série 1 $\bar{A}$:28,2	série 2 $\bar{A}$:28,25	Cuivre B laminé à l'Us. II à 2 tp^{res}		série 3 $\bar{A}$:28,6
Effets principaux	Repères	Ecarts moyens E		Effets principaux	Repères	Ecarts moyens
Effet Cuivre B	a	- 0,22	- 0,42	Effet laminage à basse température	l	+ 1,05
Effet Recuit à 1,63	b	+ 5,45	+ 4,00	Effet Recuit à 1,63	b	+ 3,88
Effet Recuit Syncro à 0,32	c	- 0,62	- 1,18	Effet Recuit Syncro	c	- 0,78
Effet Vernis Polyester P	d	+ 5,65	+ 3,62	Effet Vernis Polyester P	d	+ 3,28
Interactions du 1er ordre						
Cuivre B × Recuit à 1,63	ab	- 0,22	- 0,58	Temp. lam × Rec. à 1,63	lb	+ 0,45
Cuivre B × Recuit Syncro	ac	+ 0,40	- 0,10	Temp. lam × Rec. Syncro	lc	- 0,50
Cuivre B × Vernis	ad	+ 0,08	- 0,30	Temp. lam × Vernis	ld	- 0,05
Rec. 1,63 × Rec. Syncro	bc	+ 0,78	- 0,32	Rec. à 1,63 × Rec. Syncro	bc	- 0,22
Rec. 1,63 × Vernis P	bd	- 0,45	- 1,12	Rec. à 1,63 × Vernis P	bd	- 0,78
Rec. Syncro × Vernis P	cd	- 0,28	- 0,05	Rec. Syncro × Vernis P	cd	- 0,18
Interactions du 2e ordre						
Cuivre B × Rec. 1,63 × Rec. Syncro	abc	+ 0,25	+ 0,10	T. lam. × Rec. 1,63 × Rec. Syncro	lbc	0
Cuivre B × Rec. 1,63 × Vernis	abd	+ 0,42	+ 0,30	T. lam. × Rec. 1,63 × Vernis	lbd	+ 0,05
Cuivre B × Rec. Syncro × Vernis	acd	+ 0,50	+ 0,02	T. lam × Rec. Syncro × Vernis	lcd	- 0,15
Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	bcd	- 0,22	- 0,45	Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	bcd	- 0,32
Interactions du 3e ordre						
Cu B × Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	abcd	- 0,05	- 0,02	T. lam × Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	lbcd	+ 0,15

Intervalles de confiance d'un effet ou d'une interaction			
à 95 %	:	± 0,50	S
99 %	:	± 0,64	HS
998 ‰	:	± 0,77	T.H.S.

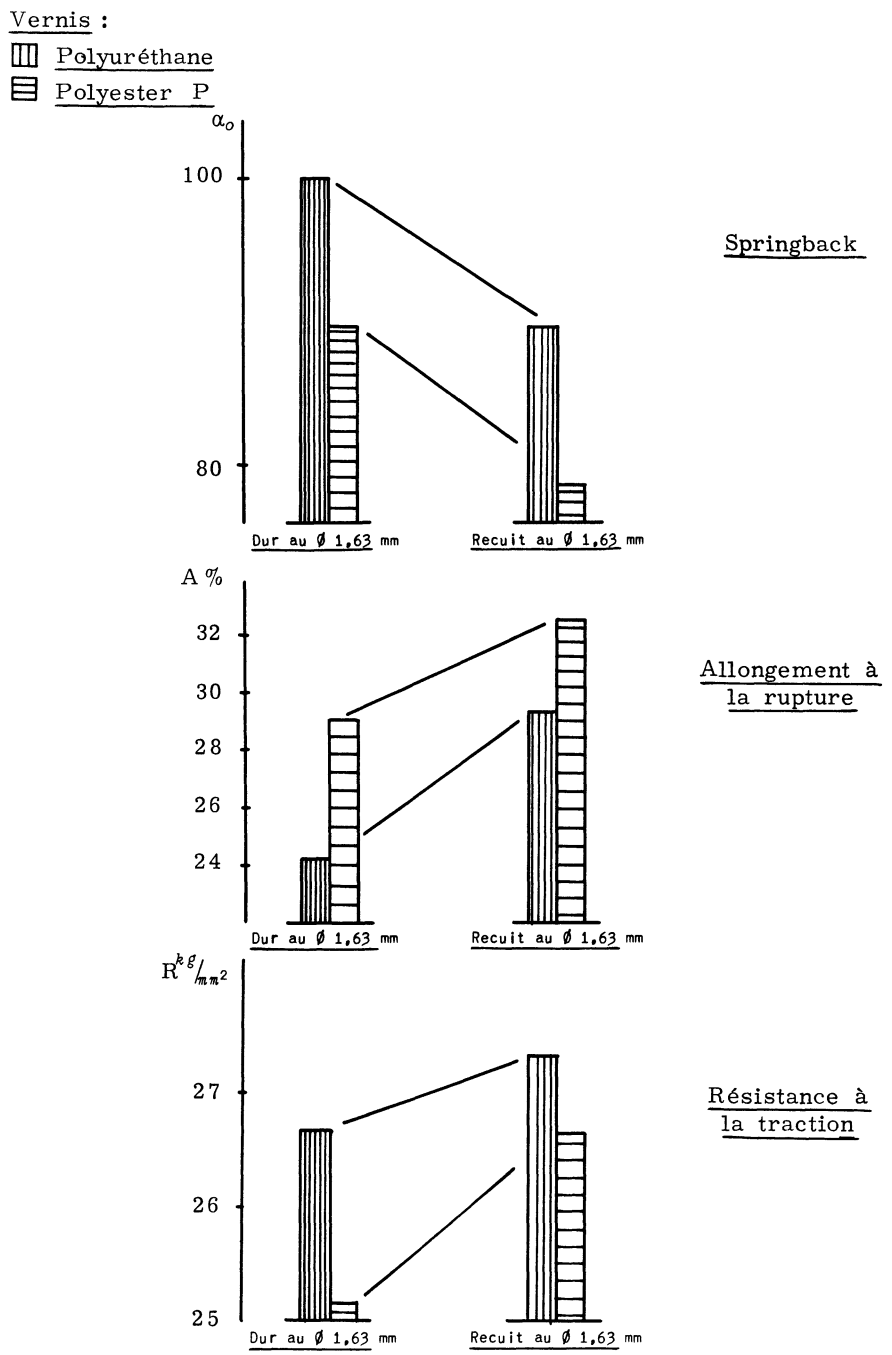


Figure 2 - Effet du recuit au Ø 1,63 mm sur les propriétés de fils émaillés à l'état dur au Ø 0,32 mm (cuivre de qualité A ou B). Vernis Polyuréthane et Polyester P .

4.3 - Recuit intermédiaire au Ø 1,63 mm (séries 1,2 et 3)

Le recuit a une influence très hautement significative : il accroît l'allongement à la rupture de 4 à 5 % (donc dans le sens attendu à partir des essais SPRINGBACK).

Mais on note que l'influence de ce recuit n'est pas la même pour les deux vernis d'émaillage : il y aurait interaction entre le recuit au Ø 1,63mm et le "vernis" (cette interaction n'est pas apparue pour l'angle de retour).

Le recuit intermédiaire au 1,63 mm accroît l'allongement à la rupture de :

+ 3,6 % si le fil est émaillé au vernis Polyester P.
+ 5,8 % si le fil est émaillé au vernis Polyuréthane.

4.4 - Recuit en continu sur Syncro au Ø 0,32 mm.

Ce recuit diminue l'allongement à la rupture de 0,9 % quel que soit le vernis d'émaillage (Polyester P ou Polyuréthane) ; il n'y a pas d'interaction entre le recuit Syncro et les conditions de cuisson de l'isolant.

Son influence est donc défavorable, mais il convient de remarquer que l'allongement est très peu sensible à ce recuit, alors que dans le cas du Springback, son effet était aussi marqué que celui du recuit à 1,63 mm (mais en sens inverse).

4.5 - Influence des conditions de cuisson du vernis.

Compte tenu de l'interaction signalée au paragraphe 4.3, le fait d'utiliser le vernis Polyester P au lieu du vernis Polyuréthane "améliore" l'allongement du fil fini de :

. 3,4 % pour des fils recuits au Ø 1,63 mm,
. 4,9 % pour des fils durs au Ø 1,63 mm,

toutes choses égales par ailleurs.

4.6 - Comparaison des résultats relatifs au Springback et à l'allongement à la rupture.

On remarque que le recuit intermédiaire au Ø 1,63 mm a une influence favorable sur les deux caractéristiques : il diminue le Springback et accroît l'allongement à la rupture.

Le recuit sur Syncro agit en sens inverse, mais son influence est surtout marquée dans le cas du Springback ; il ne diminue l'allongement à la rupture que de 1 %, alors que le recuit au Ø 1,63 mm l'accroît de 4 à 5 %.

En outre, pour l'allongement, l'interaction a lieu entre le recuit au Ø 1,63 mm et les conditions de cuisson du vernis et non pas entre le recuit Syncro et le "Vernis", comme dans le cas du Springback.

Ces résultats confirment bien que l'allongement à la rupture ne permet pas de caractériser la souplesse d'un fil d'une manière aussi sûre que l'angle de retour. Cette dernière mesure est beaucoup plus fine puisqu'elle met en évidence le "souvenir" des traitements antérieurs conservé par le fil, alors que l'allongement à la rupture ne les décèle que grossièrement.

5 - RESISTANCE A LA TRACTION R kg/mm² (moyenne générale : 26,500 kg/mm²) - cf. tableau D)

La seule interaction significative est celle existant entre le recuit au Ø 1,63 mm et le "vernis d'émaillage".

5.1 - Qualité de cuivre (séries 1 et 2)

Pas de différence significative entre les deux qualités de cuivre utilisées, A et B.

5.2 - Température de laminage (série 3)

La résistance à la traction s'est montrée inférieure de 0,240 kg/mm² pour le cuivre B laminé à température plus basse. Cette diminution est faible et pratiquement négligeable.

5.3 - Recuit intermédiaire au Ø 1,63 mm (séries 1, 2 et 3)

Le recuit au Ø 1,63 mm a une influence hautement significative, mais il y a interaction entre ce recuit et les conditions de cuisson du vernis.

Pratiquer le recuit intermédiaire au Ø 1,63 mm accroît la résistance à la traction de :

1,570 kg/mm² si le fil est émaillé au vernis Polyester P.
0,620 kg/mm² si le fil est émaillé au vernis Polyuréthane.

5.4 - Recuit en continu sur Syncro (séries 1, 2 et 3)

La résistance à la traction ne se trouve pas modifiée de façon significative par le recuit Syncro.

5.5 - Influence des conditions de cuisson du vernis d'émaillage (séries 1, 2 et 3)

Compte tenu de l'interaction existant entre le recuit intermédiaire au Ø 1,63 mm et les "conditions de cuisson du vernis", utiliser le vernis Polyester P au lieu du vernis Polyuréthane entraîne une diminution de la résistance à la traction de :

. 0,610 kg/mm² pour du fil recuit au Ø 1,63 mm
. 1,560 kg/mm² pour du fil dur au Ø 1,63 mm.

5.6 - Comparaison des résultats relatifs aux trois caractéristiques α ° - A % et R.

- La caractéristique R kg/mm² n'est pas sensible au recuit Syncro contrairement à A % et surtout α°.
- Alors que pour α ° et A % le recuit au Ø 1,63 mm et l'émaillage au vernis Polyester P jouaient dans le même sens pour chacune des deux caractéristiques prises séparément (diminution de α ° et accroissement de A %), dans le cas de la résistance à la traction au niveau des fils de Ø 0,32 mm, on note des chiffres plus élevés pour R lorsqu'il y a eu recuit au Ø 1,63 mm (toutes choses égales par ailleurs), mais les chiffres les plus faibles correspondent toujours au vernis Polyester P (et non au vernis Polyuréthane).

Tableau D

RESISTANCE A LA TRACTION R kg/mm²

Cuivre B et Cuivre A moyennes		série 1 $\bar{R}$:26,540	série 2 $\bar{R}$:26,620	Cuivre B laminé à l'Us.II à 2tp res		série 3 $\bar{R}$:26,440
Effets principaux	Repères	Ecarts moyens E		Effets principaux	Repères	Ecarts moyens
Effet Cuivre B	a	+ 0,100	- 0,112	Effet laminage à basse température	l	- 0,238
Effet Recuit à 1,63	b	+ 1,375	+ 0,962	Effet Recuit à 1,63	b	+ 0,938
Effet Recuit Syncro à 0,32	c	+ 0,050	- 0,162	Effet Recuit Syncro	c	- 0,088
Effet Vernis Polyester P	d	- 0,775	- 1,112	Effet Vernis Polyester P	d	- 1,362
Interactions du 1er ordre						
Cuivre B × Recuit à 1,63	ab	+ 0,15	- 0,138	Temp. lam. × Rec. à 1,63	lb	+ 0,062
Cuivre B × Recuit Syncro	ac	+ 0,075	- 0,062	Temp. lam. × Rec. Syncro	lc	+ 0,138
Cuivre B × Vernis P	ad	0	- 0,362	Temp. lam × Vernis P	ld	+ 0,112
Rec. 1,63 × Rec. Syncro	bc	0	- 0,338	Rec. à 1,63 × Rec. Syncro	bc	- 0,238
Rec. 1,63 × Vernis P	bd	+ 0,175	+ 0,612	Rec. à 1,63 × Vernis P	bd	+ 0,638
Rec. Syncro × Vernis P	cd	- 0,150	+ 0,138	Rec. Syncro × Vernis P	cd	+ 0,062
Interactions du 2e ordre						
Cuivre B × Rec. Syncro	abc	- 0,225	- 0,088	T. lam. × Rec. 1,63 × Rec. Syncro	lbc	+ 0,138
Cuivre B × Rec 1,63 × Vernis	abd	+ 0,100	+ 0,212	T. lam. × Rec. 1,63 × Vernis	lbd	- 0,238
Cuivre B × Rec. Syncro × Vernis	acd	- 0,075	+ 0,038	T. lam. × Rec. Syncro × Vernis	lcd	- 0,112
Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	bcd	- 0,150	+ 0,262	Rec. 1.63 × Rec. Syncro × Vernis	bcd	+ 0,162
Interactions du 3e ordre						
Cu B × Rec. 1,63 × Rec. Syncro Vernis	abcd	- 0,125	- 0,088	T. lam. × Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	lbcd	+ 0,062

Intervalles de confiance d'un effet ou d'une interaction

à 95 %	:	± 0,160	S ------
99 %	:	± 0,206	HS ———
998 ‰	:	± 0,247	T.H.S ▬▬▬

L'effet du recuit au ϕ 1,63 mm pour les trois caractéristiques et les deux vernis est schématisé sur le graphique de la figure 2 (cuivre A ou B durs sur Syncro) en échelles sensiblement accordées (l'écart-type inter-bobines est représenté par $\approx$ 8 mm pour $\alpha°$ - A % et R).

6 - CONCLUSIONS.

Pour les deux qualités de cuivre considérées - Qualités A et B - les trois séries d'essais industriels effectués à partir de provisions préparées à l'usine I et à l'usine II, puis tréfilées et émaillées à l'usine III au ϕ 0,32 mm, peuvent se résumer ainsi (voir tableau E).

Tableau E

RESUME DES ANALYSES PARTIELLES

FACTEURS	SPRINGBACK $\alpha°$		ALLONGEMENT A LA RUPTURE A %		RESISTANCE A LA TRACTION R kg/mm²	
Moy. générales pour les 3 séries confondues	95°		28,3 %		26,500 kg/mm²	
Effet du (qualité cuivre (A ou B	P.S (+)		P.S. (+)		P.S (+)	
Laminage à basse température pour le cuivre B	- 1,7°		+ 1 %		- 0,240	
Effet du recuit au ϕ 1,63 mm	- 11°		Vernis P	Vernis U	Vernis P	Vernis U
			+ 3,6 %	+ 5,1%	+ 1,560	+ 0,620
Effet du recuit Syncro au O 0,32 mm	Vernis P	Vernis U	- 0,9 %		P.S (+)	
	+ 13°	+ 7°				
Vernis Polyester P (au lieu de Polyuréthane U)	Recuit Syncro	Dur Syncro	Recuit au ϕ 1,63	Dur au ϕ 1,63	Recuit au ϕ 1,63	Dur au ϕ 1,63
	- 4,7°	- 10,7°	+ 3,4 %	+ 4,9 %	- 0,610	- 1,560
Interactions	Recuit Syncro x "Vernis"		Recuit ϕ 1,63 x "Vernis"		Recuit ϕ 1,63 x "Vernis"	

(+) P.S signifie : statistiquement Pas Significatif au niveau 95 %.

N.B. - Les valeurs requises par les normes pour les fils émaillés synthétiques de ϕ 0,32 mm, sont :

. angle de retour : (NEMA MW-15) $\alpha° \leqslant 104°$
. allongement à la rupture : (NF C 31 420) A% > 20 %.

6.1 - Qualité de cuivre.

L'utilisation de cuivre B ne conduit pas à une amélioration significative des caractéristiques mécaniques $\alpha°$, A % et R kg/mm².

6.2 - Température de laminage.

L'influence de la température de laminage examinée par l'usine II à deux niveaux sur le cuivre B, bien que statistiquement significative, est pratiquement négligeable sur le plan industriel. Le faible gain de souplesse (< 2° sur l'angle de retour) obtenu en laminant à température plus basse ne justifie pas le coût de cette opération.

6.3 - Recuit intermédiaire au Ø 1,63 mm.

Le recuit au Ø 1,63 mm s'est montré avoir une influence favorable dans tous les cas.

Il accroît la souplesse du fil, l'allongement à la rupture (on a trouvé aussi une augmentation de la résistance à la traction) ; pour A % et R, son effet dépend du vernis d'émaillage utilisé : il y a interaction avec les conditions de cuisson du vernis. En ce qui concerne l'allongement à la rupture, son influence est plus marquée pour le fil émaillé au vernis Polyester P, tandis que dans le cas de la résistance à la traction, son influence est plus sensible pour le fil émaillé au vernis Polyuréthane.

6.4 - Recuit en continu sur Syncro au Ø 0,32 mm.

Le recuit Syncro a une influence défavorable sur la souplesse du fil et son allongement à la rupture. Il n'affecte pas la résistance à la traction. Son action est plus sensible sur le "springback" du fil émaillé au vernis Polyester P que sur celui émaillé au vernis Polyuréthane (interaction avec le "vernis"). On peut dire que dans le cas de l'émaillage au vernis Polyester P, le recuit Syncro annule l'effet favorable du recuit au Ø 1,63 mm.

6.5 - Comparaison des deux vernis : Polyester P et Polyuréthane.

Dans tous les cas, pour des traitements identiques, un fil émaillé au vernis Polyester P présente des caractéristiques de souplesse meilleures que celles relatives à un fil émaillé au vernis Polyuréthane (angle de retour diminué de 5 à 10°).

Les conséquences finales des traitements intermédiaires du cuivre (recuit au Ø 1,63 mm ou sur Syncro au Ø 0,32 mm) ne sont pas les mêmes avec les deux vernis d'émaillage essayés en raison des conditions thermiques différentes de polymérisation (température et durée de cuisson). On a noté les interactions suivantes :

- "Vernis" × Recuit Syncro pour l'angle de retour α °.
- "Vernis" × Recuit au Ø 1,63 mm pour A % et R.

6.6 - Comparaison de l'évolution des trois caractéristiques α °, A % et R kg/mm^2.

Cette étude a confirmé que la mesure de l'angle de retour est de nature différente de la mesure de l'allongement à la rupture.

L'effet défavorable du recuit Syncro est :

. très bien mis en évidence par l'angle de retour (+ 10°)
. à peine signalé par la mesure d'A % (- 1%)
. pratiquement inappréciable sur R.

ANNEXES

- Les moyennes relatives à 6 bobines d'une même catégorie, c'est-à-dire pour les fils ayant subi les mêmes traitements, pour les trois séries de mesures analysées et pour les trois caractéristiques :

  - Springback : $\alpha°$
  - Allongement à la rupture : A %
  - Résistance à la traction : R kg/mm^2,

  figurent dans les tableaux F, G et H ci-après.

- Le mode d'analyse utilisé est détaillé dans l'annexe 2 et la conduite des calculs exposée dans l'annexe 3.

ANNEXE I

Tableau F

Essais de la 1e série (moyennes relatives à 6 bobines)

SPRINGBACK : $\alpha°$

Moyenne générale : 96,2°

		cuivre B		cuivre A	
Provision ↓	Sortie Syncro ↓	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane
1,63 Recuit	0,32 Recuit	91,3	100,2	98,8	99,6
	0,32 Dur	78,8	92,9	80,1	91,7
1,63 Dur	0,32 Recuit	104,3	107,5	102,9	108,7
	0,32 Dur	90,6	99,3	87,4	104,4

ALLONGEMENT A LA RUPTURE : A %

Moyenne générale : 28,2 %

		cuivre B		cuivre A	
Provision ↓	Sortie Syncro ↓	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane
1,63 Recuit	0,32 Recuit	33,7	28,5	33	28,8
	0,32 Dur	33,4	27,2	34	28,8
1,63 Dur	0,32 Recuit	28,2	21,5	27,4	22
	0,32 Dur	28,5	23,7	30	22,5

RESISTANCE A LA TRACTION : R kg/mm²

Moyenne générale : 26,540kg/mm²

		cuivre B		cuivre A	
Provision ↓	Sortie Syncro ↓	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane
1,63 Recuit	0,32 Recuit	26,8	27,8	26,8	27,6
	0,32 Dur	27,4	27,4	26,7	27,3
1,63 Dur	0,32 Recuit	25,5	26,5	25,3	26,2
	0,32 Dur	25,1	26,2	25,6	26,4

Tableau G

Essais de la 2e série (Moyennes relatives à 6 bobines)

SPRINGBACK : $\alpha°$

Moyenne générale : 94,6°

		Cuivre B		Cuivre A	
Provision ↓	Sortie Syncro ↓	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane
1,63 Recuit	0,32 Recuit	89,6	95,5	91,5	94,3
	0,32 Dur	80	87,7	78,5	90
1,63 Dur	0,32 Recuit	102	107,5	105	110
	0,32 Dur	89,8	99	89	104

ALLONGEMENT A LA RUPTURE : A %

Moyenne générale : 28,25%

		Cuivre B		Cuivre A	
Provision ↓	Sortie Syncro ↓	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane
1,63 Recuit	0,32 Recuit	30	28	31	29
	0,32 Dur	32	29	33	30
1,63 Dur	0,32 Recuit	28,1	23,5	28,7	23
	0,32 Dur	28,7	25	29	24

RESISTANCE A LA TRACTION : R kg/mm²

Moyenne générale : 26,620 kg/mm²

		Cuivre B		Cuivre A	
Provision ↓	Sortie Syncro ↓	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane
1,63 Recuit	0,32 Recuit	26,5	26,8	27,1	27
	0,32 Dur	26,8	27,8	27	27,8
1,63 Dur	0,32 Recuit	25,1	27,4	25,5	26,9
	0,32 Dur	24,9	27,2	25,6	26,5

Tableau H

Essais de la 3e série (Moyennes relatives à 6 bobines)

SPRINGBACK : α°

Moyenne générale : 93°

		Cuivre B laminé à température plus basse		Cuivre B laminé à température normale	
Provision ↓	Sortie Syncro ↓	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane
1,63 Recuit	0,32 Recuit	89,4	92,1	89,6	95,5
	0,32 Dur	80	86,8	80	87,7
1,63 Dur	0,32 Recuit	100	105	102	107,5
	0,32 Dur	87	97	89,8	99

ALLONGEMENT A LA RUPTURE : A %

Moyenne générale : 28,6 %

		Cuivre B laminé à température plus basse		Cuivre B laminé à température normale	
Provision ↓	Sortie Syncro ↓	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane
1,63 Recuit	0,32 Recuit	32	30	30	28
	0,32 Dur	33	30	32	29
1,63 Dur	0,32 Recuit	28,8	25	28,1	23,5
	0,32 Dur	29	24,9	28,7	25

RESISTANCE A LA TRACTION : R kg/mm²

Moyenne générale : 26,440 kg/mm²

		Cuivre B laminé à température plus basse		Cuivre B laminé à température normale	
Provision ↓	Sortie Syncro ↓	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane	vernis Polyester P	vernis Polyuréthane
1,63 Recuit	0,32 Recuit	26,5	27,2	26,5	26,8
	0,32 Dur	26,4	27,3	26,8	27,8
1,63 Dur	0,32 Recuit	24,9	26,8	25,1	27,4
	0,32 Dur	25	26,5	24,9	27,2

ANNEXE 2

MODE D'ANALYSE UTILISÉ

Dans notre cas, où chaque facteur intervient à deux niveaux, il existe une méthode simplifiée d'analyse de variance qui permet d'évaluer directement l'effet de chaque facteur et des interactions. On examine la signification de ces effets en les comparant à l'écart-type d'un effet à l'aide du test "t" de Student.

L'analyse de variance classique consisterait à comparer chacun des carrés moyens (connus ici avec 1 degré de liberté) à la variance de référence (que l'on peut admettre être connue ici avec une infinité de degrés de liberté).

Dans ce cas, la limite du rapport F (avec 1 et ∞ degrés de liberté) au seuil de probabilité α est égale au carré de la limite de "t" (avec ∞ degrés de liberté), mais au seuil unilatéral $\alpha/2$.

L'analyse a porté sur les moyennes de 6 bobines pour chacune des 2^n combinaisons des n facteurs.

Nous disposions des moyennes de chaque bobine, ce qui nous a permis d'estimer l'écart-type inter-bobines d'une même combinaison de facteurs:

$$s_{IB}$$

d'où l'écart-type d'une moyenne relative à 6 bobines :

$$s_m = \frac{s_{IB}}{\sqrt{6}}$$

L'effet d'un facteur étant obtenu à partir d'une somme algébrique des 2^n valeurs disponibles, et chaque facteur intervenant à son niveau le plus élevé dans la moitié des combinaisons, la variance d'un effet est :

$$s_o^2 = \frac{2^n s_m^2}{[2^{n-1}]^2} = \frac{s_m^2}{2^{n-2}} = \frac{s_{IB}^2}{6 \times 2^{n-2}}$$

Si "e" désigne l'écart observé correspondant à l'introduction d'un facteur ou d'une interaction, on juge de la signification de cet écart à l'aide du test "t" de Student :

On peut comparer aussi l'écart observé à l'intervalle de confiance au seuil de probabilité α fixé :

$$I.C = \pm t_\alpha \; s_o$$

Par exemple, l'intervalle de confiance à 95 % sera :

$$I.C = \pm 2s_o = \pm 2 \; \frac{s_{IB}}{\sqrt{6} \times 2^{(\frac{n}{2}-1)}}$$

Dans le tableau 1, figurent les valeurs de :

- l'écart-type inter-bobines : s_{IB}
- l'écart-type d'une moyenne relative à 6 bobines : s_m
- l'écart-type estimé à partir des carrés moyens relatifs aux interactions du 2ème et du 3ème ordre.
- l'écart-type d'un effet : s_o pour n = 4 facteurs.
- des intervalles de confiance à 95 %, 99 % et 99,8 ‰.

Tableau I

Dispersions et intervalles de confiance pour α °, A % et R kg/mm².

		SPRINGBACK α°	ALLONGEMENT A LA RUPTURE A %	RESISTANCE A LA TRACTION R kg/mm²
Ecart-type inter-bobines	s_{IB}	3,1	1,2	0,400
Ecart-type d'une moyenne relative à 6 bobines	$s_m = \frac{s_{IB}}{\sqrt{6}}$	1,26	0,5	0,160
Ecart-type estimé à partir des interactions du 2e et 3e ordre	s_R	1,97	0,58	0,306
Ecart-type d'un effet (pour n = 4)	s_o	0,65	0,25	0,08
INTERVALLES DE CONFIANCE à 95 %	$\pm 2s_o$	± 1,30	± 0,50	± 0,160
99 %	$\pm 2{,}58 s_o$	± 1,67	± 0,64	± 0,206
998 ‰	$\pm 3s_o$	± 2,01	± 0,77	± 0,247

ANNEXE 3

CONDUITE DES CALCULS (CF. EXEMPLE TRAITÉ SUR LE TABLEAU J.)

Dans la colonne 0 figure, vis-à-vis de chaque combinaison des facteurs, la moyenne des 6 bobines correspondantes.

Dans la moitié supérieure de la colonne 1 (huit premières lignes) figurent les sommes de deux termes successifs de la colonne 0 (1 terme n'intervenant qu'une fois dans une somme) et dans la moitié inférieure, les différences des couples des valeurs de la colonne 1 (valeur inférieure - valeur supérieure, par exemple b - a ; abcd - bcd).

On procède ainsi de proche en proche jusqu'à la 4ème colonne (autant de colonnes que de facteurs ; ici n = 4).

Chaque facteur intervenant à son niveau le plus élevé dans la moitié des combinaisons des facteurs, les nombres S figurant dans la colonne 4 représentent 2^{4-1} fois l'écart moyen dû à l'introduction du facteur ou de l'interaction correspondants ; d'où les écarts moyens E (colonne 5).

Les carrés moyens (connus chacun avec 1 degré de liberté) ont pour expression :

$$C.M. = \frac{S^2}{2^4}$$

Leurs valeurs figurent dans la dernière colonne.

Remarque

On peut estimer les .valeurs théoriques correspondant à chacune des 2^n combinaisons des n facteurs, à partir de la moyenne générale m et des écarts moyens E_i dus à chacun des effets significatifs (facteurs principaux et interactions).

Chacun de ces effets est caractérisé par l'écart moyen E que l'on a calculé dans la colonne 5.

Supposons que l'analyse ait mis en évidence une action significative des facteurs b, c et d et de l'interaction cd.

Si l'on veut estimer la combinaison acd par exemple, la valeur théorique sera :

$$(acd) = m - E_B + E_c + E_D + E_{cd}$$

Chacun des écarts E intervient avec son propre signe si l'on retrouve dans le symbole de la combinaison des facteurs (ici acd) les lettres repérant l'écart E, ou si le nombre de lettres absentes dans la combinaison est pair.

- Tableau J

Mesures de Springback $\alpha°$ sur le fil émaillé obtenu à partir de cuivre B laminé à l'Usine II à 2 températures (3ème série d'essais).

Combinaisons des 4 facteurs	Moyennes observées (0)	(1)	(2)	(3)	$S = 2^{4-1} E$ (4)	Ecarts moyens $E = \frac{S}{2^{4-1}}$ (5)	Facteurs principaux et interactions	carrés moyens $C.M = \frac{S^2}{2^4}$
1	99	196	370,5	770,6	1.488,4			
a	97	174,5	400,1	717,8	-13,8	- 1,72	laminage à température plus basse	11,90
b	87,7	212,5	336,8	- 8,8	-86,2	-10,78	Recuit à 1,63 mm	464,40
ab	86,8	187,6	381,0	- 5,0	+ 4,8	+ 0,60	Interaction Temp. laminage × Rec. 1,63	1,44
c	107,5	176,8	- 2,9	-46,4	+73,8	+ 9,22	Recuit Syncro	340,40
ac	105	160,0	- 5,9	-39,8	- 2,4	- 0,30	Interaction : Temp. laminage × Rec. Syncro	0,36
bc	95,5	202,0	- 2,8	+ 0,2	- 9,6	- 1,20	Interaction : Recuit 1,63 × Recuit Syncro	5,76
abc	92,1	179,0	- 2,2	+ 4,6	- 3,0	- 0,38	Interaction : Temp. lam. × Rec. 1,63 × Rec. Syncro	0,56
d	89,8	- 2,0	-21,5	+29,6	-52,8	- 6,60	Vernis	174,24
ad	87	- 0,9	-24,9	+44,2	+ 3,8	+ 0,48	Interaction : Temp. laminage × Vernis	0,90
bd	80	- 2,5	-16,8	- 3,0	+ 6,6	+ 0,82	Interaction : Recuit 1,63 × Vernis	2,72
abd	80	- 3,4	-23,0	+ 0,6	+ 4,4	+ 0,55	Interaction : Temp. laminage × Rec. 1,63 × Vernis	1,21
cd	102	- 2,8	+ 1,1	- 3,4	+14,6	+ 1,82	Interaction : Recuit Syncro × Vernis	13,32
acd	100	0	- 0,9	- 6,2	+ 3,6	+ 0,45	Interaction : Temp. lam. × Rec. Syncro × Vernis	0,81
bcd	89,6	- 2,0	+ 2,8	- 2,0	- 2,8	- 0,35	Interaction : Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	0,49
abcd	89,4	- 0,2	+ 1,8	- 1,0	+ 1,0	+ 0,12	Interaction : Temp. lam. × Rec. 1,63 × Rec. Syncro × Vernis	0,06
	colonne 0	col. 1	col. 2	col. 3	col. 4	col. 5	col. 6	col. 7

Série 3 Cu B laminé à l'Us. II à 2 tpres