

Du fil ordinaire au fil de Litz

Le fil électrique pour le courant qui aime être à fleur de peau

Tous ceux qui bricolent en électronique savent qu'il existe différentes sortes de fil électrique (voir photo 1) : mono-brin (ou à âme massive, qui est relativement rigide), multi-brins (ou à âme divisée, qui est plus souple), de différentes sections, nu, émaillé, étamé, argenté, isolé pour tenir une certaine tension, gainé, etc. Et le fil de Litz c'est quoi au fait? Et il sert à quoi? « Litze » signifiant « cordon » en allemand, certains ont pu penser que « fil de Litz » était simplement dû à une mauvaise traduction, mais il n'en est rien et ce mot est bien à l'origine de l'expression.

Résistivité électrique

ρ de quelques conducteurs en $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ (à 20 °C) :

- argent : 0,016
- cuivre : 0,018
- or : 0,024
- aluminium : 0,028
- laiton : 0,07
- fer : 0,1

Remarquez que l'or est moins bon conducteur que le cuivre (l'or est utilisé uniquement comme bon conducteur pour protéger les contacts de l'oxydation) et que la différence de résistivité entre l'argent et le cuivre est très faible (12 %).

Pour avoir la résistivité ρ en $\Omega \cdot \text{m}$, unités du Système International, il faut multiplier les valeurs par 10^6 .

Voyons d'abord le contexte. Lorsque l'on désire amener un signal électrique d'un endroit à un autre, on utilise généralement du fil ou du câble électrique constitué de fil(s) conducteur(s). Un fil conducteur est un fil dont la résistance est faible par rapport au reste du circuit. En effet, bien qu'idéalement leur résistance devrait être nulle, tous les conducteurs présentent une certaine résistance¹. Cette résistance doit toutefois être suffisamment faible pour ne pas modifier de manière sensible le signal véhiculé et/ou pour éviter une trop grande perte d'énergie. Le courant circulant dans les conducteurs provoque en effet une chute de tension. La valeur acceptable pour cette chute de tension dépend de l'application et notamment de la tension mise en jeu dans le circuit. L'intensité du courant qui va circuler dans le fil a également une grande importance.

**Une règle simple, mais très utile, consiste à admettre que, pour les conducteurs en cuivre, il est possible de faire passer un courant de :
5 A/mm²**

Par exemple, pour les installations électriques, on utilise des conducteurs de 1,5 mm² pour des courants maxima de 10 A (circuits lumières) et des conducteurs de 2,5 mm² pour des courants maxima de 16 A (prises de courant). La règle précédente voudrait qu'on utilise respectivement des sections de 2 et 3 mm² qui sont des valeurs très proches. Sous 230 V, les chutes de tension provoquées sont acceptables. Par exemple pour 20 m de fil (10 m aller et retour) de 1,5 mm², la résistance est de² :

$$R = \rho \cdot l / s = 0,018 \cdot 20 / 1,5 \approx 0,24 \Omega$$

provoquant une chute de tension de :

$$U = R \cdot I = 0,24 \cdot 10 = 2,4 \text{ V sous } 10 \text{ A}$$

Soit une perte d'environ 1 % de la tension et une perte en puissance de :

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 = 2,4 \cdot 10 = 0,24 \cdot 100 = 24 \text{ W}$$

Avouez que ce résultat vous surprend car vous n'avez jamais fait le calcul. Cette perte de puissance de 1 % est toutefois acceptable. Voyons maintenant ce que donne l'utilisation du même fil pour alimenter un émetteur-récepteur consommant 10 A sous 12 V. Pas de mystère, le courant étant le même, la chute de tension est la même, c'est-à-dire 2,4 V. Mais cette fois les pertes sont de 20 %. De plus la consommation n'étant pas constante, la tension d'alimentation variera au niveau de l'émetteur-récepteur! Aussi, pour cette application, il vaudrait mieux utiliser du fil de section plus importante.

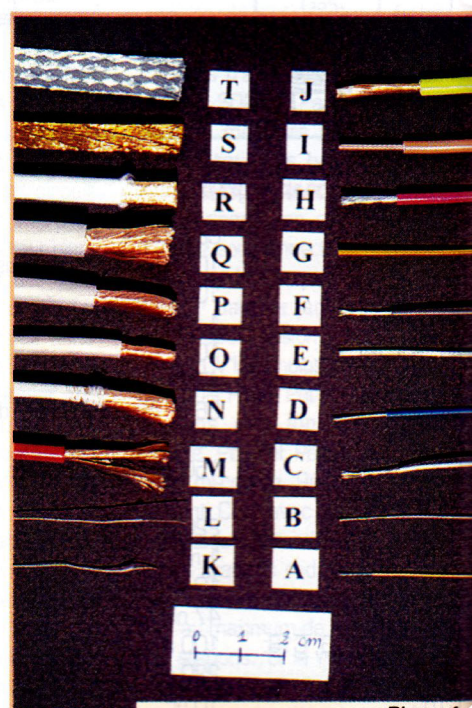


Photo 1.

¹ Exception faite des conditions de supraconductivité obtenues à une température proche du zéro absolu (-273 °C).

² Le détail des calculs est donné pour ceux qui aiment les calculs (si, si, ils ne sont peut-être pas nombreux, mais il y en a) et ceux qui souhaitent vérifier s'ils ont bien compris, voire faire d'autres calculs. Ceux qui n'aiment pas, ne liront que les résultats. A chacun ses goûts.

Astuce

Pour obtenir un fil monobrin nu bien rectiligne pour le câblage, ou par exemple pour en faire une self :

- fixez une extrémité du fil dans un étai,
- supprimez les plus gros défauts comme les points anguleux en passant sur le fil aller-retour sur toute la longueur avec un bout de bois rond, comme un manche d'outil,
- puis tirez sur l'extrémité libre du fil, avec une pince, de manière à allonger légèrement le fil (pas de trop, environ 0,5 %. Il faut pour cela dépasser la limite d'élasticité du fil).

Si vous n'avez jamais essayé, vous serez surpris du résultat.

Autre exemple, considérons cette fois une piste de circuit imprimé (standard avec 35 μ de cuivre) de 1 mm de large et 10 cm de long parcourue par un courant de 1 A. La section de cuivre est égale à :

$$S = 1 \cdot 0,035 = 0,035 \text{ mm}^2$$

et la résistance vaut :

$$R = \rho \cdot l / s = 0,018 \cdot 0,1 / 0,035 \approx 0,05 \Omega$$

La chute de tension est de :

$$U = R \cdot I = 0,05 \cdot 1 = 0,05 \text{ V} = 50 \text{ mV}$$

et la perte de puissance est de 50 mW (1 % sous 5 V). Cette perte peut être tout-à-fait acceptable ou non selon le type de circuit. C'est au concepteur du circuit d'en juger. La règle des 5 A/mm², qui voudrait que le courant dans cette piste soit limité à 200 mA, donne ici aussi une indication pratique valable.

En fait, tout ce que nous venons de voir est vrai en courant continu. Par contre, en courant alternatif, il faut tenir compte de l'**effet de peau** (voir encadré) qui fait que le courant alternatif circule uniquement en périphérie des conducteurs, dont la résistance en H.F. est plus élevée qu'en courant continu. Cet effet est d'autant plus important que la fréquence

est élevée. La profondeur de pénétration du courant est en effet divisée par 10 chaque fois que la fréquence est multipliée par 100.

A 50 Hz cette profondeur de pénétration du courant est encore d'environ 9,5 mm pour le cuivre, ce qui fait que le phénomène est sans effet pour des conducteurs cylindriques de moins de 19 mm de diamètre (correspondant à une section de 284 mm²!). Autant dire que le secteur peut être considéré comme du courant continu. Seul le transport de très, vraiment très, fortes puissances (lignes THT d'EDF) nécessite la prise en compte de l'effet de peau.

L'effet de peau

L'effet de « peau », aussi appelé effet « Kelvin » ou pelliculaire, est un phénomène électromagnétique qui fait que les courants alternatifs se concentrent à la périphérie des conducteurs, et la densité de courant décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface des conducteurs. La profondeur de pénétration classique δ du courant, pour laquelle les champs sont affaiblis au maximum dans un rapport de 1/2,718, est fonction de la fréquence du signal et exprimée en mètres vaut :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}}$$

Où ρ est la résistivité en $\Omega \cdot \text{m}$, μ_0 la perméabilité magnétique du vide qui vaut $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$, μ_r la perméabilité relative du matériau conducteur qui vaut 1 pour les matériaux non ferromagnétiques comme le cuivre (environ 2500 pour le fer) et f la fréquence en Hz.

Pour une utilisation pratique et pour des conducteurs non magnétiques, cette formule peut-être ramenée à :

$$\delta(\text{mm}) = 503 \sqrt{\frac{\rho(\text{mm}^2/\text{m})}{f(\text{Hz})}} \left(= \frac{67,5}{\sqrt{f(\text{Hz})}} \text{ pour le cuivre} \right)$$

En simplifiant, tout se passe comme si seule une sorte de peau superficielle d'épaisseur δ était conductrice.

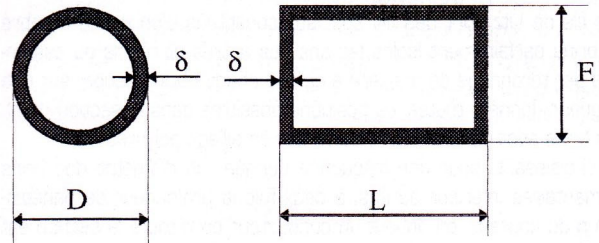


Figure 1. En courant alternatif, la surface utile pour la conduction est réduite. Cela provoque l'accroissement de la résistance des conducteurs par rapport à leur valeur en courant continu. Nous considérerons ici, que les conducteurs pleins se comportent comme des conducteurs creux ayant une épaisseur de paroi δ .

Pour un conducteur cylindrique de diamètre D la section vaut

$$S_{cc} = \pi \cdot D^2 / 4 \text{ et la section utile en courant alternatif vaut :}$$

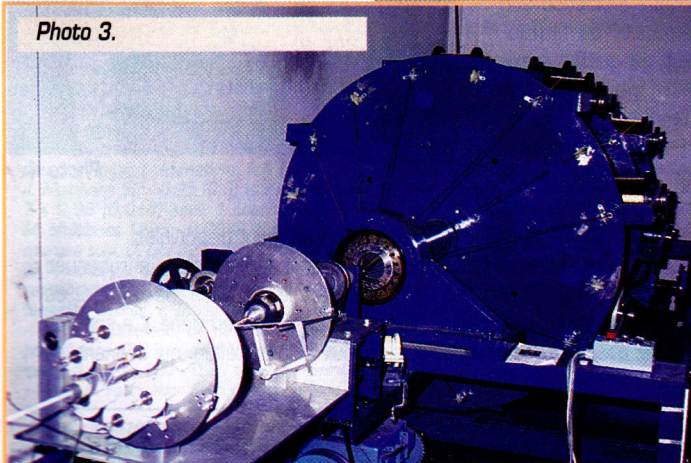
$$S_{ca} = \pi/4 (D^2 - (D - 2\delta)^2) = \pi (\delta D - \delta^2) = \pi \delta (D - \delta)$$

Pour un conducteur plat de largeur L et d'épaisseur E la section vaut

$$S_{cc} = L \cdot E \text{ et la section utile en courant alternatif vaut :}$$

$$S_{ca} = L \cdot E - [(L - 2\delta) \cdot (E - 2\delta)] = 2 \cdot \delta (L + E) - 4 \cdot \delta^2 = 2 \cdot \delta (L + E - 2 \cdot \delta)$$

Par contre, à 50 MHz (= 50 Hz $\cdot 10^3$) la profondeur d de pénétration du courant n'est plus que de 9,5/1000 = 0,0095 mm soit environ 10 μ (microns). A cette fréquence, même la fine couche de cuivre d'un circuit imprimé ne conduit plus sur toute son épaisseur. Comme le laisse entrevoir, de manière un peu simplifiée, la figure 1, la surface utile pour la conduction électrique en courant alternatif est réduite et la résistance des conducteurs augmente en conséquence.



Reprenons l'exemple des 20 m de fil de 1,5 mm² dont la résistance en courant continu (ou à 50 Hz) est de 0,24 Ω. Si nous considérons un conducteur monobrin son diamètre est d'environ 1,4 mm. Par exemple à 130 kHz, l'épaisseur de peau n'est déjà plus que de 0,19 mm et la section utile passe à :

$$S_{ca} = \pi \cdot 0,19 \cdot (1,4 - 0,19) \approx 0,7 \text{ mm}^2$$

Soit 2,1 fois moins. La résistance à cette fréquence sera donc 2,1 fois plus grande (0,51 Ω). Pour avoir un conducteur de résistance égale à 0,24 Ω il faudrait utiliser un fil monobrin environ 2,1 fois plus gros (2,8 mm de diamètre!). Une autre solution consiste à utiliser un conducteur plat (ruban) de cuivre d'épaisseur 2δ = 0,38 mm et de 1,5/0,38 ≈ 4 mm de large, ce qui peut-être une solution intéressante dans certains cas. Sinon il reste une autre solution : **utiliser du fil de Litz** (voir encadré et photo 2).

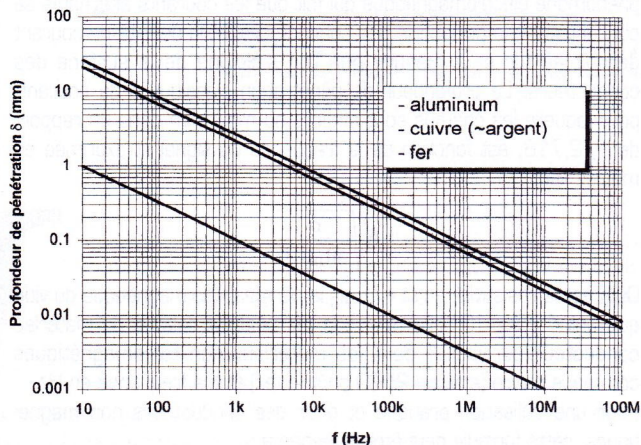


Figure 2. Profondeur de pénétration du courant en fonction de la fréquence. La courbe correspondante à l'argent étant quasi confondue avec celle du cuivre, seule cette dernière a été représentée.

Le fil de Litz

Les fils de Litz sont des fils spéciaux constitués d'un grand nombre de brins parfaitement isolés les uns des autres et réunis ou assemblés par toronnage de manière à ce que chaque brin occupe, sur une longueur donnée, toutes les positions possibles dans la section du fil. Les brins sont généralement isolés par émailage polyuréthane.

En choisissant, pour une fréquence donnée, un diamètre des brins élémentaires inférieur ou égal à deux fois la profondeur de pénétration d du courant, on obtient un conducteur dont toute la section est quasiment utile (conductrice).

Attention, le fil de Litz est souple, même généralement très souple, mais il ne faut pas le confondre avec du simple fil multibrins souple (voir photos 1 et 2), car l'isolant, qui est généralement constitué d'une fine couche d'émail soudable (avec un fer assez chaud : 375 °C), est presque invisible.

L'utilisation de fil de Litz en H.F. permet, à sections égales, de réduire la résistance des conducteurs et donc de réduire les pertes dans les fils et transformateurs, d'augmenter le facteur de qualité (Etant donné que : $Q = |X| / R = L\omega / R$, en divisant R par 2, on multiplie Q par 2) des selfs et par là le coefficient de surtension Q_0 des circuits accordés, de réduire le diamètre des fils, etc.

Il ne s'agit pas de quelque chose de nouveau puisque du fil de Litz était déjà utilisé (autrefois) pour réaliser les transformateurs moyenne fréquence (ou FI = Fréquence Intermédiaire) dans les postes de T.S.F.

Les capacités entre les différents brins et les pertes dans les isolants des brins limitent généralement l'utilisation du fil de Litz aux fréquences inférieures à environ 5 MHz.

Les principales applications se situent dans les domaines de l'électronique à découpage et du chauffage H.F., là où les impédances sont (doivent être) faibles.

Diamètre brins (mm)	0,4	0,28	0,20	0,10	0,071	0,063	0,050	0,040	0,032
Section brin (mm ²)	0,126	0,0616	0,0314	0,00785	0,00396	0,00312	0,00196	0,00126	0,00080
Épaisseur émail (μ) *	25	20	16	11	9	8	7	6	5
Fréquence limite (Hz)**	110 k	230 k	450 k	1,8 M	3,6 M	4,5 M	7,2 M	11 M	17 M
Nombre min brins	5	8	3	10	3	4	5	6	10
Nombre max brins	250	1350	550	1275	3360	560	3060	320	320
Section min fil (mm ²)	0,63	0,49	0,094	0,078	0,012	0,012	0,0098	0,0075	0,0082
Section max fil (mm ²)	31	83	17	10	6,5	1,7	5,8	0,4	0,25

* Épaisseur moyenne pour le grade 2.

** Définie pour un fil de diamètre 2xδ, pour des signaux sinusoïdaux. Pour des signaux différents, il faut trouver un compromis fonction des différentes composantes spectrales (harmoniques) du signal.

Tableau 1. Aperçu des constitutions possibles de fil de Litz

L'effet de peau en audio

À 20 kHz la profondeur de pénétration du courant est de 0,48 mm. L'effet de peau est donc sans incidence pour tout conducteur jusqu'à 1 mm de diamètre (0,7 mm²).

L'utilisation de fil de Litz n'est donc généralement ni nécessaire ni même utile en audio, ou alors uniquement pour profiter de la souplesse du fil (et à condition de le trouver à un prix raisonnable, c'est-à-dire voisin de celui d'un fil ordinaire très souple).

Exemple : Pour 20 m de câble (10 m aller et retour) de 1,5 mm², la résistance passe de 0,24 Ω à 20 Hz à 0,265 Ω à 20 kHz. Ce qui, avec une charge de 8 Ω, correspond à une atténuation de 0,6 % de la puissance du signal à 20 kHz, soit 0,03 dB. Pour du câble de 4 mm² l'atténuation passe à 1 % du signal, ou 0,043 dB! Si vous n'êtes pas convaincu, mesurez la précision du réglage médian (position à mi course) du contrôle des aigus de votre chaîne ou la courbe de réponse en fréquence de vos enceintes!

Il existe une grande variété de fils de Litz³. Ces fils ont principalement 3 caractéristiques :

- le diamètre des brins élémentaires qui définit la fréquence d'utilisation,
- le nombre de brins ou la section qui définissent le courant admissible,
- le revêtement isolant qui définit la protection extérieure tout en ayant une grande incidence sur la qualité du fil (facteur de qualité maximum pouvant être obtenu).

Le tableau 1 ci-dessus donne un aperçu rapide des principales

valeurs de diamètres de brins les plus couramment disponibles.

Les fils de Litz peuvent être fournis sans enrobage extérieur, enrubannés de une ou plusieurs couches de coton, de soie, de nylon, de kevlar, ... ou isolés par extrusion de téflon, de silicone ou de polyéthylène. Ce sont les fils finis avec deux couches soie, ou mieux isolé au téflon, qui donnent les meilleurs résultats.

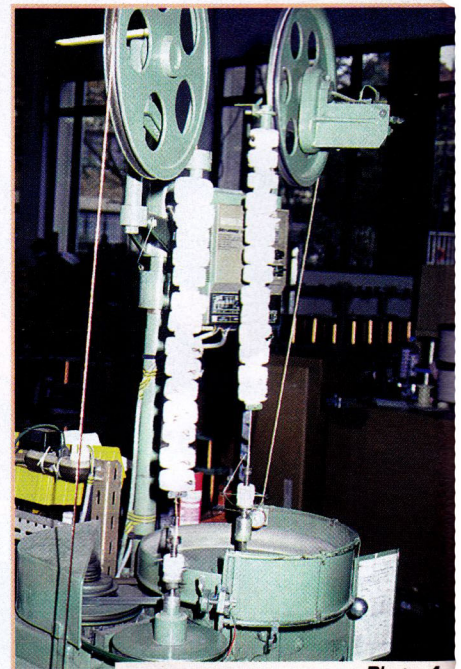


Photo 4.

³ Une grande variété de fils et câbles divisés (Litz) et/ou guipés et/ou argentés sont disponibles chez : Le Guipage Moderne, 5, rue de Bicêtre, 94247 L'Hay les Roses. Tél. 01.46.75.96.96, Fax : 01.46.75.34.84. Un minimum de commande est demandé.



Photo 5.

Aux environs de 15 MHz la profondeur de pénétration est de 17,5 μ , soit la moitié de l'épaisseur du cuivre d'un circuit imprimé. Une bande de cuivre de 2,5 mm de large, utilisée par exemple pour réaliser une self sur un circuit imprimé, sera ainsi équivalente à un fil de 1,6 mm de diamètre si la fréquence est supérieure à 15 MHz (0,24 mm de diamètre en courant continu). En effet, le périmètre d'un tel fil est de deux fois la largeur de la piste : 5 mm.

La faible pénétration du courant aux hautes fréquences explique aussi

l'intérêt d'utiliser du fil de cuivre argenté pour réaliser des selfs. Seule une partie de la pellicule d'argent est conductrice.

Qu'en est-il de l'utilisation de fil de Litz pour réaliser des antennes filaires ? Prenons un exemple : une antenne doublet sur 7 MHz. La résistance de 20 m de fil de 2,5 mm de diamètre est de 0,073 Ω . A 7 MHz la résistance est de 1,8 Ω , ce qui représente un peu moins de 2,5 % par rapport aux 73 Ω de la résistance de rayonnement de l'antenne. Soit, dans le pire des cas, une atténuation de 0,2 dB (0,3 dB si la résistance de l'antenne est de 50 Ω). En fait, plus on grimpe en fréquence plus cette atténuation liée à l'effet de peau sera faible, car l'incidence de la longueur du fil (qui diminue) est plus importante que celle de la fréquence (qui augmente). Ainsi pour un doublet 28 MHz, l'atténuation ne serait plus que de 0,1 dB. A 1,8 MHz, elle monte à 0,4 dB (0,6 dB pour 50 Ω), ce qui est toujours insignifiant (moins de 1/10 de point sur le S mètre). Aussi, l'utilisation de fil de Litz semble sans intérêt dans ces cas.

Par contre, pour réaliser des selfs ou des antennes cadre avec des coefficients de surtension élevés, l'utilisation de fil de Litz peut apporter une amélioration sensible. Voyons un dernier exemple pour l'illustrer : un fil de Litz de 720 \times 0,07, ayant une section de 2,85 mm² et un diamètre de 2,7 mm, sera moins résistif à 3,65 MHz qu'un conducteur cylindrique (plein ou creux) de cuivre de 20 mm de diamètre, puisque la profondeur de pénétration du courant, à cette fréquence, n'est plus que de 0,035 mm. A 136 kHz, ce même fil est équivalent à un conducteur de 5 mm de diamètre.

Jean-Paul GENDNER, F5BU

- Photo 1. Différents fils. Les diamètres des conducteurs sont en mm (les sections sont indiquées en mm² entre parenthèses) :

A. Monobrin 0,25 (0,05) argenté isolé PVC pour mini-connexions enroulées, B. Monobrin 0,35 (0,1) argenté isolé téflon, C. Multibrins 17 \times 0,05 (0,033) argentés isolé téflon, D. Monobrin 0,5 (0,2) argenté isolé PVC pour connexions enroulées, E. Monobrin 1,2 (1,1) argenté non isolé, F. Multibrin 7 \times 0,2 (0,2) étamés isolés PVC pour câblage, G. Monobrin 1,3 (1,3) émaillé pour transformateurs, H. Multibrins 19 \times 0,2 (0,6) étamés isolés PVC pour câblage, I. Monobrin 1,4 (1,5) isolé PVC pour le secteur (circuits lumières), J. Multibrins 50 \times 0,25 (2,5) isolés PVC pour le secteur (circuits prises de courant), K. Litz 7 \times 0,05 (0,014) sous 1 couche soie, L. Litz 1 \times 0,15 (0,02) sous 1 couche nylon, M. Multibrins 1275 \times 0,05 (2,5) isolés silicone (extra souple), N. Litz 648 \times 0,1 (5) avec 2 couches soie, O. Litz 320 \times 0,1 (2,5) isolés par une extrusion polyéthylène, P. Litz 855 \times 0,1 (6,7) isolés par une extrusion polyéthylène, Q. Litz 1275 \times 0,1 (10) isolés par une extrusion polyéthylène, R. Litz avec fils torsadés laminés et isolés par enrubannage, S. Litz avec fils torsadés laminés, T. Tresse de masse 130 \times 0,15 (2,3) étamés.

- Photo 2. Différents fils de Litz. De gauche à droite : 1275 \times 0,1 isolé par une extrusion polyéthylène, 7,3 mm de diamètre extérieur ; 855 \times 0,1 sous guipage 2 couches soie, diamètre 5,4 mm ; 100 \times 0,28 torsadés laminés.

- Photo 3. Fabrication de fil de Litz par une câbleuse à détorsion avec deux têtes de guipage en ligne.

- Photo 4. Guipage de fil de Litz.

- Photo 5. Réserve de fils émaillés.