Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 24

Artikel: Schémas électriques équivalents des armures des câbles

Autor: Benoît, B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915474

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Schémas électriques équivalents des armures des câbles

Par B. Benoît

621.315.22.001

L'utilisation de la formule simplifiée, donnant le facteur de réduction des armures des câbles, peut conduire à des erreurs importantes lors des calculs de construction. Après la définition des types d'armures utilisés en pratique, on donne les schémas équivalents et leurs zones de validité. La vérification expérimentale des schémas montre que, pour des fréquences inférieures ou égales à 125 Hz, ces derniers sont vérifiés à 8 %.

Die Anwendung der vereinfachten Formel zur Bestimmung des Reduktionsfaktors von Kabelarmierungen kann anlässlich der Aufbauberechnungen zu erheblichen Fehlern führen. Nach Erklärung der in der Praxis vorkommenden Armierungen werden die entsprechenden elektrischen Ersatzschemas und ihre Gültigkeitsbereiche angegeben. Versuche haben ergeben, dass für Frequenzen bis 125 Hz die berechneten und gemessenen Werte nicht mehr als 8 % voneinander abweichen.

1. Introduction

L'armure[1]) d'un câble se compose généralement d'une gaine d'étanchéité conductrice (Pb), de feuillards (C) et de méplats de traction en acier (F), soit, selon la notation conventionnelle: Pb-CF. Pour le calcul du facteur de réduction de l'armure, on utilise généralement la relation:

$$r_k = \frac{R_g}{\sqrt{R_g^2 + X^2}}$$

avec:

R_g résistance en courant continu de tous les composants de l'armure connectés en parallèle, Ω/km.

X partie inductive de l'impédance tenant compte de la fréquence du courant perturbateur, de l'inductivité de l'armure et du circuit de retour du courant par la terre, Ω/km.

Cependant, si l'on utilise cette relation pour le calcul d'optimisation «prix-performance» d'un câble du type Pb-CF, on constatera une très forte divergence entre le facteur de réduction (r_k) calculé et le facteur de réduction mesuré, l'erreur pouvant atteindre 40 % ou plus.

Le développement du mesureur du facteur de réduction type 7145 nous a permis de vérifier les schémas équivalents des armures des câbles et de définir les câbles à structures simples, dont le schéma équivalent correspond au modèle représenté par la relation précédente, et les câbles à structures générales.

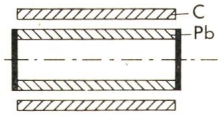
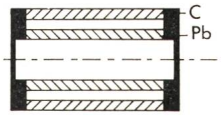
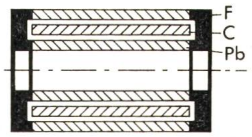
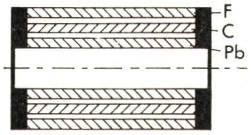
Notons finalement que ces schémas sont utilisés dans les programmes d'optimisation des câbles à bon facteur de réduction.

2. Théorie

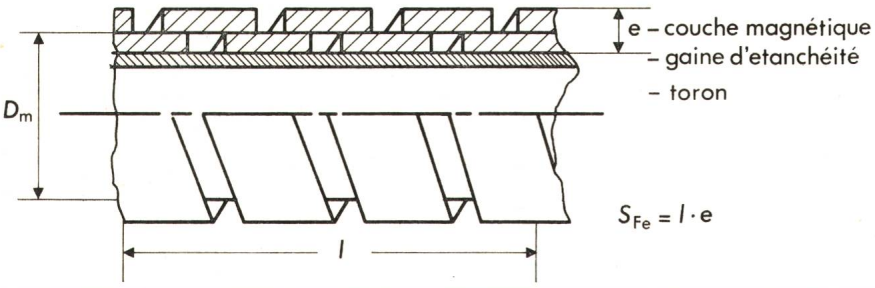
Dans le but de simplifier l'exposé nous ne reporterons que les résultats des développements théoriques. Ces développements, que nous tenons à la disposition du lecteur intéressé, sont basés sur les Directives du CCITT[3]) [1][2]), en particulier le chapitre XII, p. 129 et suivantes.

[1]) définition voir § 2.1.
[2]) voir la bibliographie à la fin de l'article.
[3]) CCITT = Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique.

Tableau I

Structure	Structure générale		Structure simple	
	élémentaire	réelle	élémentaire	réelle
Type	I-1	I-2	II-1	II-2
Exemple	Pb-C	Pb-C	Pb-C-F	Pb-C-F
Schémas de construction				

F couche de fils métalliques méplats appliqués sans déjoint, en hélice à pas long
C deux feuillards d'acier appliqués avec déjoint de 10 à 30 %, en deux couches superposées, le feuillard supérieur recouvrant le déjoint du feuillard inférieur
Pb gaine tubulaire extrudée en plomb



2.1 Définition des armures (Tableau I)

On appellera «système gaine armure» ou «armure» l'ensemble des constituants composant le câble depuis la ceinture posée sur le toron.

On dira qu'une armure est à *structure*:

Simple élémentaire:

si elle se compose d'une couche conductrice (μ_r = cte) sur la ceinture, puis d'une couche magnétique entièrement isolée de la couche conductrice.

Simple réelle:

si elle se compose d'une couche conductrice (μ_r = cte) sur la ceinture, puis d'une couche magnétique isolée sur toute sa longueur sauf à ses extrémités où elle est connectée à la couche conductrice.

Générale élémentaire:

si elle se compose d'une structure simple élémentaire, revêtue d'une couche conductrice (μ_r = cte) isolée sur toute sa longueur, sauf à ses extrémités où elle est connectée à la première couche conductrice.

Générale réelle:

si elle se compose d'une structure simple réelle, revêtue d'une couche conductrice (μ_r = cte) isolée sur toute sa longueur, sauf à ses extrémités où elle est connectée à la première couche conductrice.

2.2 Schéma équivalent des câbles à structure simple élémentaire

Le schéma équivalent, donné sur la fig. 1, correspond aux relations:

$$r_k \equiv \frac{E_{12}}{E_{23}} = \frac{'R}{|Z|} = \frac{R_g}{\sqrt{R_g^2 + [2\pi f (L_g + L_0)]^2}}$$

$$E_{23} = \frac{R_g\, H\, \pi\, D_m}{r_k}$$

avec:

$$L_g = \frac{S_{Fe}\, \xi}{\pi\, D_m}\, \mu_0\, \mu_r$$

$$'R = R_g$$

$$Z = R_g + j\omega\,(L_0 + L_g)$$

r_k facteur de réduction

E_{12} tension perturbatrice induite sur un conducteur protégé, V/km

E_{23} tension perturbatrice induite sur un conducteur non protégé, V/km

$'R$ «résistance de l'armure», Ω/km, ou impédance de transfert

Z impédance de l'armure, Ω/km

R_g résistance en courant continu de l'armure, Ω/km

$X = 2\pi f (L_g + L_0)$

f fréquence du courant perturbateur, Hz

$\omega = 2\pi f$

L_g inductance de l'armure, H/km

L_0 inductance du circuit de retour du courant par la terre ≡ 2 mH/km

S_{Fe} section magnétique (m² par km de câble)

ξ facteur de remplissage de la couche magnétique

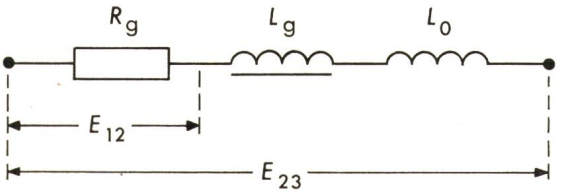


Fig. 1 Schéma équivalent des câbles à structure simple élémentaire

D_m diamètre magnétique, m

μ_0 perméabilité du vide

μ_r perméabilité de l'acier composant l'armure

H champ, A/m

L'influence de la variation des paramètres R_g et X ayant déjà été analysée dans notre précédent article [2], nous rappellerons uniquement que:

si R_g diminue: r_k diminue, E_{23} diminue (à f = cte)
si X diminue: r_k augmente, E_{23} diminue (à f = cte)

2.3 Schéma équivalent des câbles à structure générale élémentaire

Comme une partie du courant ne passe pas par L_g, on aura le schéma, donné sur la fig. 2, correspondant aux relations:

$$r_k \equiv \frac{E_{12}}{E_{23}} = \frac{|'R|}{|Z|} \qquad E_{23} = |Z| \cdot |I_c|$$

$$|'R| = \alpha \sqrt{\beta^2 + X^2}$$

$$|Z| = \delta \sqrt{(R_g - \alpha\beta)^2 + \left(\frac{X_0}{\delta} + \alpha X\right)^2}$$

$$|I_c| = \frac{R_g\, |'R|}{\gamma\alpha}$$

$$I_a = \pi\, H\, D_m$$

$$\beta \equiv R_g + R_F \qquad \alpha \equiv \gamma/(\beta^2 + X^2)$$

$$\gamma \equiv R_g\, R_F \qquad X = 2\pi f\, L_g$$

$$\delta \equiv R_F/R_g \qquad X_0 = 2\pi f\, L_0$$

avec:

R_F résistance en courant continu de la couche conductrice externe (posée sur la couche magnétique) en Ω/km.

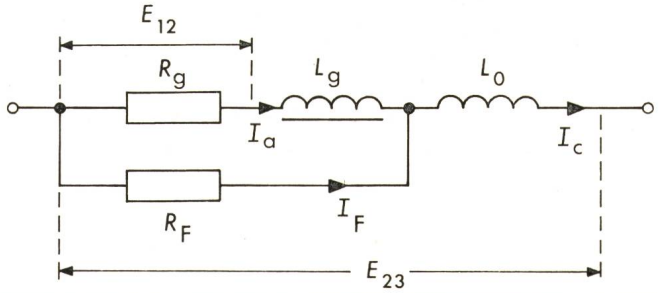


Fig. 2 Schéma équivalent des câbles à structure générale élémentaire

Si l'on varie les paramètres, R_F étant constant, on observera les mêmes déplacements du r_{kmf} [2] (facteur de réduction minimum pour la fréquence f), que pour les câbles à structure simple.

Si l'on varie R_F, on observera le même déplacement du r_{kmf} que si l'on varie le X du câble à structure simple.

Cette propriété, où une résistance se comporte comme une inductance, doit être utilisée dès que la section magnétique du câble à structure simple devient trop importante ou dès que les tensions perturbatrices E_{23} sont trop élevées.

3. Vérifications expérimentales

Les mesures ont été faites avec le mesureur de facteur de réduction 7145[4]) sur des câbles [2] du type ALTFF1,2$_{\text{Aluman}}$ CCT[5]), sur lesquels on a ajouté une couche conductrice simulant les méplats de traction.

[4]) Mesureur automatique développé par SECE.

[5]) ALT = gaine constituée d'un feuillard d'aluminium, posé longitudinalement avec recouvrement, comportant une couche de copolymère collant le feuillard à une gaine extrudée en polyéthylène.

Les caractéristiques principales des échantillons de câbles — Tableau II

Paramètre	Unités	Structure simple		Structure générale	
		élémentaire M 146	réelle M 124	élémentaire M 146 + Cu externe	réelle M 124 + Cu externe
Résistance de la gaine R_g	Ω/km	0,281	0,238	0,281	0,238
Résistance des feuillards R_c	Ω/km	6,8	6,8	6,8	6,8
Résistance $R_g \| R_c$	Ω/km	0,27	0,23	0,27	0,23
Résistance de la couche cond. ext. R_F	Ω/km	∞	∞	0,445	0,169
Résistance totale	Ω/km	0,27	0,23	0,168	0,0974
Section magnétique S_{Fe}	m²	2	2	2	2
Facteur de remplissage ξ		0,738	0,753	0,738	0,753
Section magnétique effective $'S_{Fe} \equiv S_{Fe}\,\xi$	m²	1,476	1,506	1,476	1,506
Diamètre magnétique D_m	m	$40 \cdot 10^{-3}$	$40 \cdot 10^{-3}$	$40 \cdot 10^{-3}$	$40 \cdot 10^{-3}$
Inductivité de terre L_0	H/km	$1{,}72 \cdot 10^{-3}$	$1{,}72 \cdot 10^{-3}$	$1{,}72 \cdot 10^{-3}$	$1{,}72 \cdot 10^{-3}$
Caractéristiques de la couche conductrice externe				2 cordes étamées de cuivre	31 fils de cuivre de 2,04 mm ⌀

3.1 Conditions expérimentales

Les 223 mesures ont été faites en mode automatique (variation continue de E_{23}) à fréquence fixe, sur des échantillons de 1 m de longueur, préparés selon les méthodes mises au point à SECE[6]).

L'inductivité de la terre L_0 était de 1,72 ± 0,03 mH/km.

La reproductibilité des mesures meilleure que 1 %.

La précision des mesures de 5 %.

On a mesuré successivement pour les fréquences de $16^2/_3$–50–125–200–400–800–1000 et 1600 Hz:

– la courbe de perméabilité $\mu_r\ (H)_f$ des feuillards d'un échantillon de câble (directement sur le câble);

– l'inductivité de la boucle L_0;

– puis pour chaque géométrie d'armure: $'R\ (I)$; $Z\ (I)$; $r_k\ (E_{23})$.

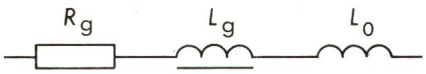
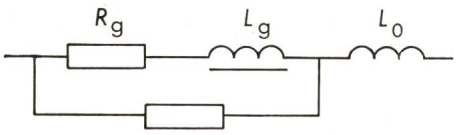
Notons que chaque échantillon initial était démonté couche par couche et mesuré.

[6]) SECE = Société d'Exploitation des Câbles Electriques, Cortaillod.

3.2 Caractéristiques principales des échantillons de câbles

Les caractéristiques initiales des échantillons sont données dans le tableau II.

Tableau III

		Simple Structure Générale			
		Elémentaire	Réelle	Elémentaire	Réelle
Echantillon		M 146	M 124	M 146 + cuivre	M 124 + cuivre
Schéma		 ≧ (par extension)		 ≧ (par extension)	
Courbe de perméabilité		μ_r A007 μ_r M123	μ_r A007 μ_r M123	μ_r A007 μ_r M123	μ_r A007 μ_r M123
$\Delta r_k/r_k$	$16^2/_3$ Hz	— 1,4 %	— 3 %	— 3 %	— 1 % — 4 %
$\Delta E_{23}/E_{23}$	$16^2/_3$ Hz	< 1 %	< 1 %	— 13 %	< 3 % + 9 %
$\Delta'R/'R$	$16^2/_3$ Hz	— 4 %	+ 7 %	+ 13 % + 3 %	— 3 %
$\Delta Z/Z$	$16^2/_3$ Hz	— 7 %	+ 10 %[1])	+ 2 %	+ 3 %
$\Delta r_k/r_k$	50 Hz	— 7 %	< 1 %	— 13 %[1])	+ 6 % 11 %
$\Delta E_{23}/E_{23}$	50 Hz	— 11 %	< 1 %	— 22 %	E_{23}mf non mesurable
$\Delta'R/'R$	50 Hz	— 4 %	+ 20 %[1])	— 13 %[1]) — 18 %[1])	+ 4 % + 6 %
$\Delta Z/Z$	50 Hz	— 3 %	+ 23 %[1])	— 4 %	+ 3 %
$\Delta r_k/r_k$	125 Hz	— 4 % — 20 %[1])	+ 15 %[1]) < 1 %	— 34 %[1]) — 43 %[1])	+ 39 %[1]) + 51 %[1])
$\Delta E_{23}/E_{23}$	125 Hz	+ 6 % — 15 %[1])	< 1 % < 1 %	E_{23}mf non mesurable	E_{23}mf non mesurable
$\Delta'R/'R$	125 Hz	— 4 %	+ 35 %[1])	— 34 %[1]) — 46 %[1])	+ 51 %[1])
$\Delta Z/Z$	125 Hz	— 1 % + 16 %[1])	+ 31 %[1]) + 52 %[1])	— 8 %[1])	+ 3 %

[1]) ie hors tolérance

Variations relativement aux valeurs mesurées avec le 7145 r_{kmf}/E_{23mf}

Le contenu de figures 3 à 14 Tableau IV

Fig. N°	Mesure de référence	Structure	Echantillon	Courbes
3	12–18	Simple élémentaire	M 146	$r_k\,(E_{23})$
4	12			$'R(I)$; $Z(I)$
5	15	Simple réelle	M 124	$r_k\,(E_{23})$
6	8–9–10–11–15			$'R(I)$; $Z(I)$
7	19	Générale élémentaire	M 146 + Cu	$r_k\,(E_{23})$
8	19			$'R(I)$; $Z(I)$
9	13	Générale réelle	M 124 + Cu	$16^2/_3$ Hz $r_k\,(E_{23})$ $'R(I)$; $Z(I)$
10	13			50 Hz $r_k\,(E_{23})$ $'R(I)$; $Z(I)$
11	13			125 Hz $r_k\,(E_{23})$ $'R(I)$; $Z(I)$
12	13	Générale réelle calculée avec structure simple	M 124 + Cu	$16^2/_3$ Hz $r_k\,(E_{23})$ $'R(I)$; $Z(I)$
13	Résumé des mesures avec indication des tolérances *Structure simple*: $\frac{\Delta r_k}{r_k} = \pm 8\,\%$ $\frac{\Delta E_{23}}{E_{23}} = \pm 14\,\%$ $\frac{\Delta' R}{'R} = \pm 7\,\%$ $\frac{\Delta Z}{Z} = \pm 9\,\%$ *Structure générale*: $\frac{\Delta r_k}{r_k} = \pm 11\,\%$ $\frac{\Delta E_{23}}{E_{23}} = \pm 26\,\%$ $\frac{\Delta' R}{'R} = \pm 7\,\%$ $\frac{\Delta Z}{Z} = \pm 4\,\%$			
14	Tableau II Fig. 5–9–11	Comparaison de la structure simple réelle à la structure générale réelle		$r_k\,(E_{23})$

3.3 Méthode d'analyse

Pour chaque type de structure nous disposions des valeurs mesurées suivantes:

a) Géométrie réelle du câble;
b) Résistances électriques de chaque composant;
c) Facteur de réduction et $'R(I)$, $Z(I)$.

Nous avons introduit les valeurs mesurées (a) et (b) dans les relations données au § 2 et comparé les valeurs de r_k, $'R$ et Z calculées aux valeurs mesurées (c). Nous avons refait les mêmes calculs depuis les valeurs utilisées à priori pour la construction optimale des câbles dans le but de déterminer les sécurités à prendre sur les calculs lors de la construction des câbles.

3.4 Résultats

Pour améliorer la présentation des résultats, les courbes, mesurées avec le 7145, ont été reportées sur les figures 3 à 13 et le tableau III. Le contenu de ces figures est résumé sur le tableau IV.

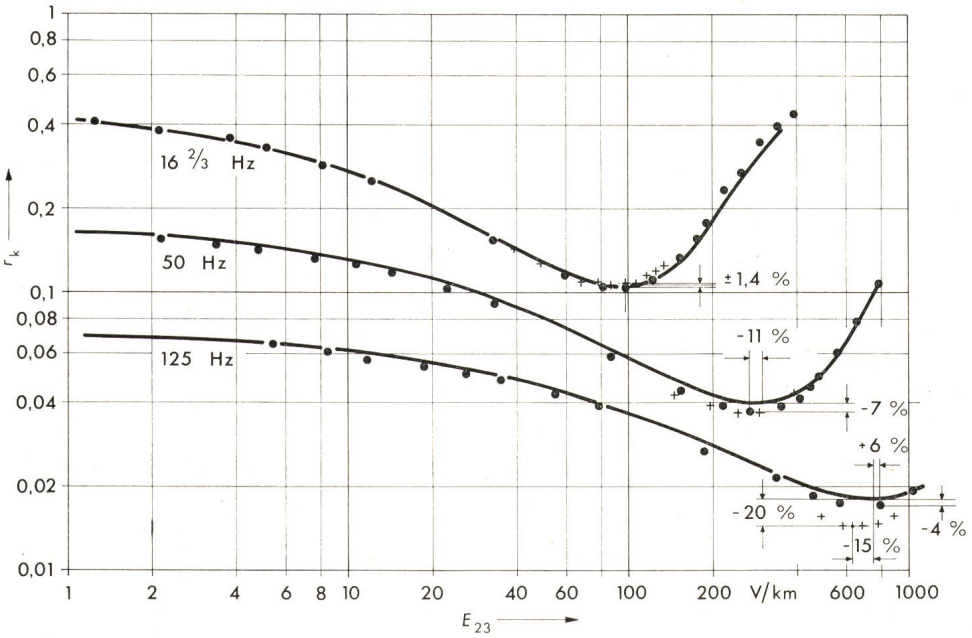


Fig. 3
Structure simple élémentaire
Câble M 146
$R_g = 0{,}27\ \Omega/\text{km}$ $'S_{Fe} = 1{,}476\ \text{m}^2$
$L_o = 1{,}72 \cdot 10^{-3}$ H/km $D_m = 40 \cdot 10^{-3}$ m
● Courbes M 146 calculées avec μ_r A 007
+ Courbes M 146 calculées avec μ_r M 123
— Courbes N° 12–18 mesurées avec le 7145

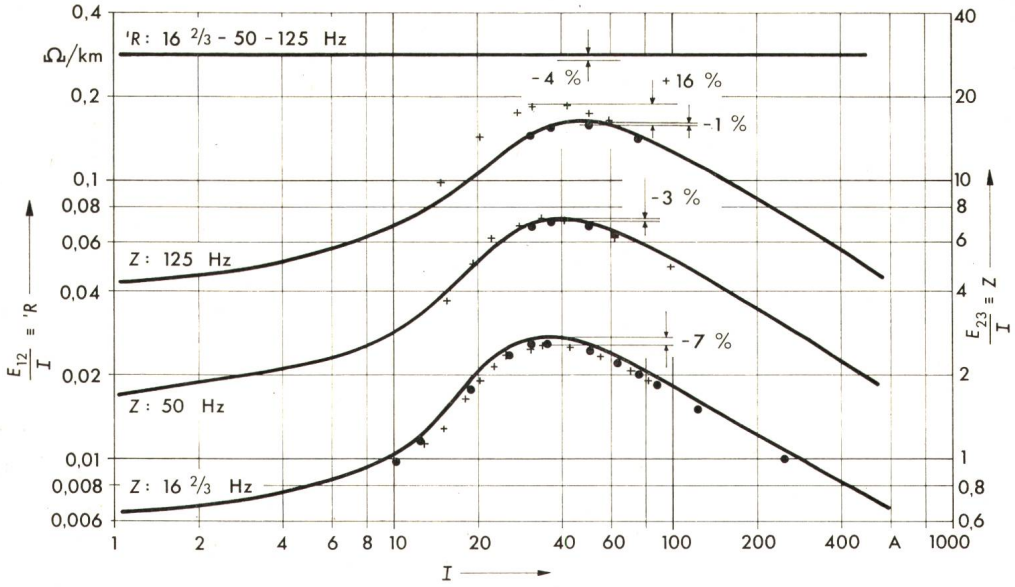


Fig. 4
Structure simple élémentaire
Câble M 146

Le calcul $\left(\frac{'R}{z}\right)_{\text{mesuré}}$ redonne bien le $(r_k)_{\text{mesuré}}$ à − 4 % environ

- ● M 146 depuis μr A 007
- + M 146 depuis μ_r M 123
- — Courbes N° 12–18 mesurées avec le 7145

Caractéristiques voir fig. 3

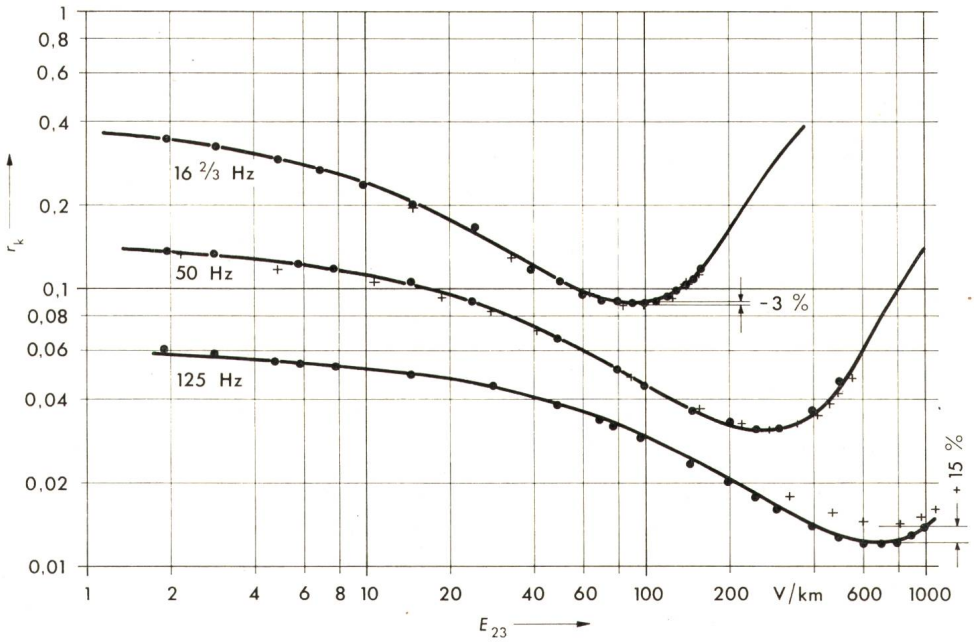


Fig. 5
Structure simple réelle
Câble M 124

$R_g = 0{,}23\ \Omega/\text{km}$ $\quad$ $'S_{Fe} = 1{,}506\ \text{m}^2$
$L_o = 1{,}72 \cdot 10^{-3}\ \text{H/km}$ $\quad$ $D_m = 40 \cdot 10^{-3}\ \text{m}$

- ● Courbes M 124 calculées depuis μ_r M 123
- + Courbes M 124 calculées depuis μ_r A 007
- — Courbes N° 15 mesurées avec 7145

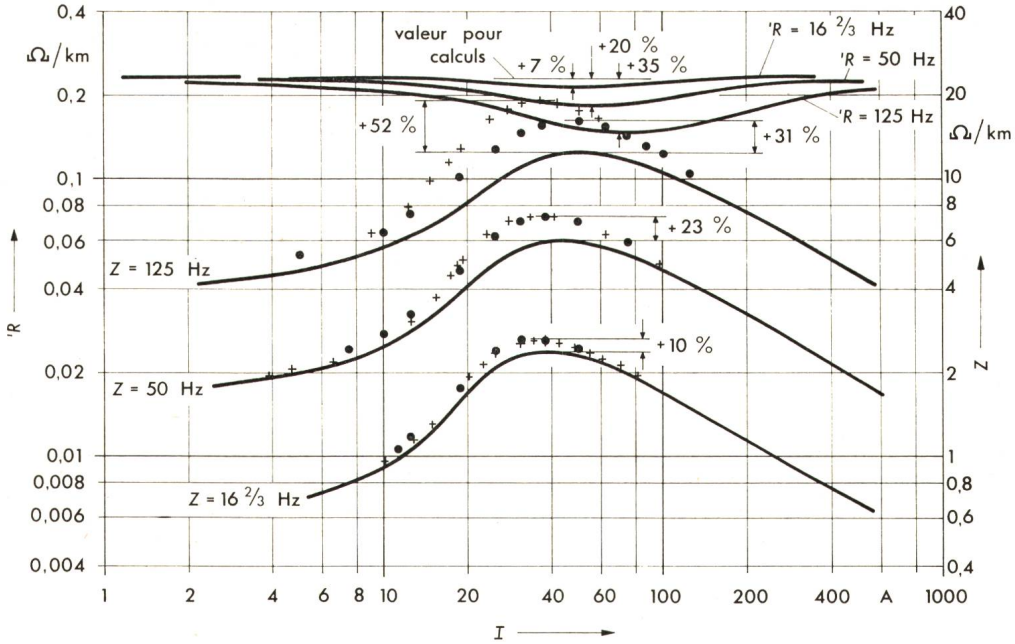


Fig. 6
Structure simple réelle
Câble M 124

Le calcul $\left(\frac{'R}{z}\right)_{\text{mesuré}}$ redonne bien le $(r_k)_{\text{mesuré}}$ on a «compensation» de la variation de $'R$

- ● M 124 depuis μ_r A 007
- + M 124 depuis μ_r M 123
- — Courbe N° 8-9-10-11-15 mesurée avec 7145

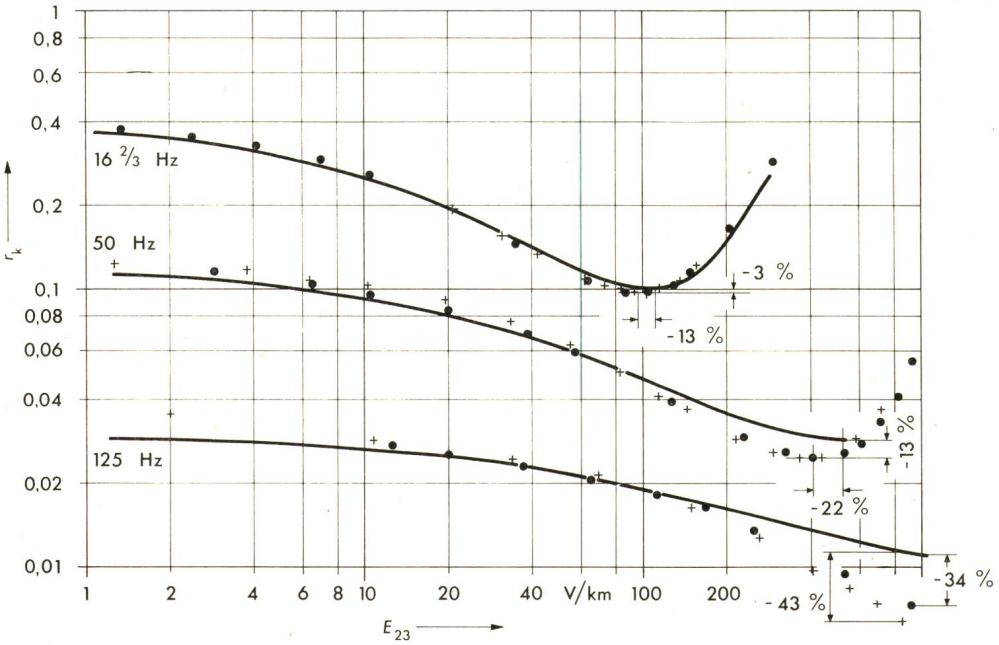
(Caractéristiques voir fig. 5)

Fig. 7
Structure générale élémentaire
Câble M 146 + Cu

R_g = 0,27 Ω/km R_F = 0,445 Ω/km
$'S_{Fe}$ = 1,476 m² D_m = 40 · 10⁻³ m
L_o = 1,72 · 10⁻³ H/km.

Couche complémentaire:
2 cordes Cu soudées sur l'armure

- ● Courbes M 146 + Cu calculées avec μ_r A 007
- + Courbes M 146 + Cu calculées avec μ_r M 123
- —— Courbes N° 19 mesurées avec 7145



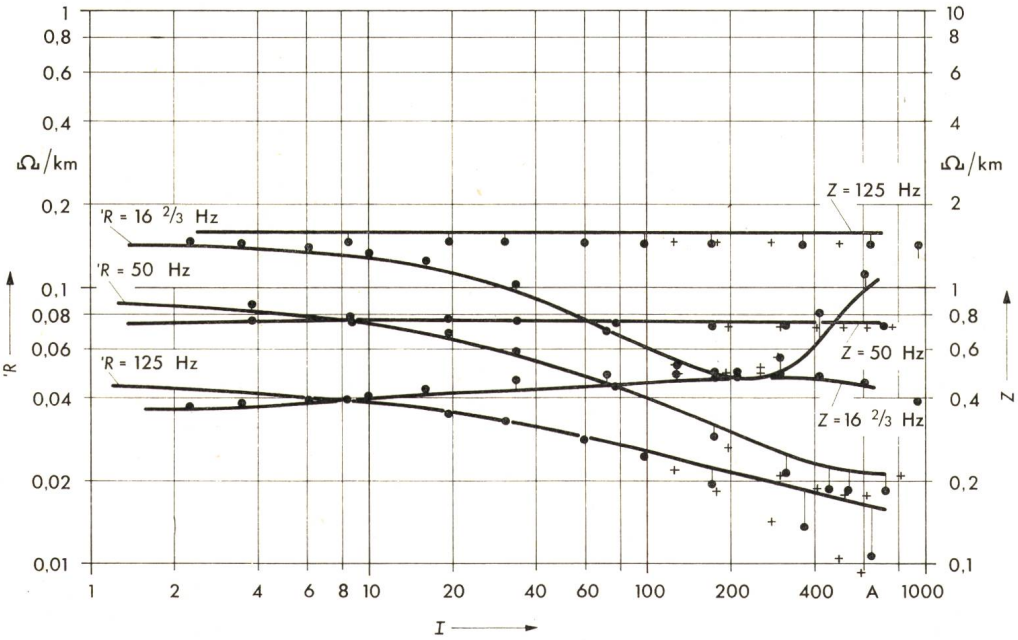


Fig. 8
Structure générale élémentaire
Câble M 146 + Cu

- ● Courbes M 146 + Cu calculées avec μ_r A 007
- + Courbes M 146 + Cu calculées avec μ_r M 123
- —— Courbes N° 19 mesurées avec 7145

(Caractéristiques du câble voir fig. 7)

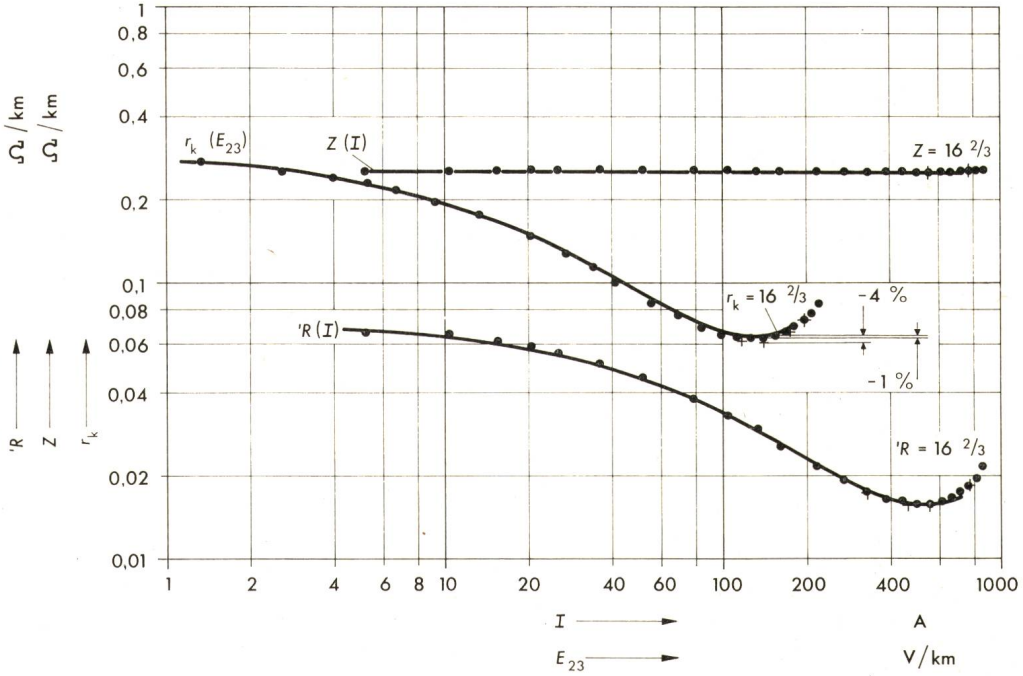


Fig. 9
Structure générale réelle
Câble M 123 + Cu 16²/₃ Hz

R_g = 0,23 Ω/km R_F = 0,169 Ω/km
$'S_{Fe}$ = 1,506 m² D_m = 40 · 10⁻³ m
L_o = 1,72 · 10⁻³ H/km.

Couche conductrice externe constituée de 31 fils de Cu de ⌀ 2,04 mm

- ● Courbes M 124 + Cu calculées avec μ_r M 123
- + Courbes M 124 + Cu calculées avec μ_r A 007
- —— Courbes N° 13 mesurées 7145

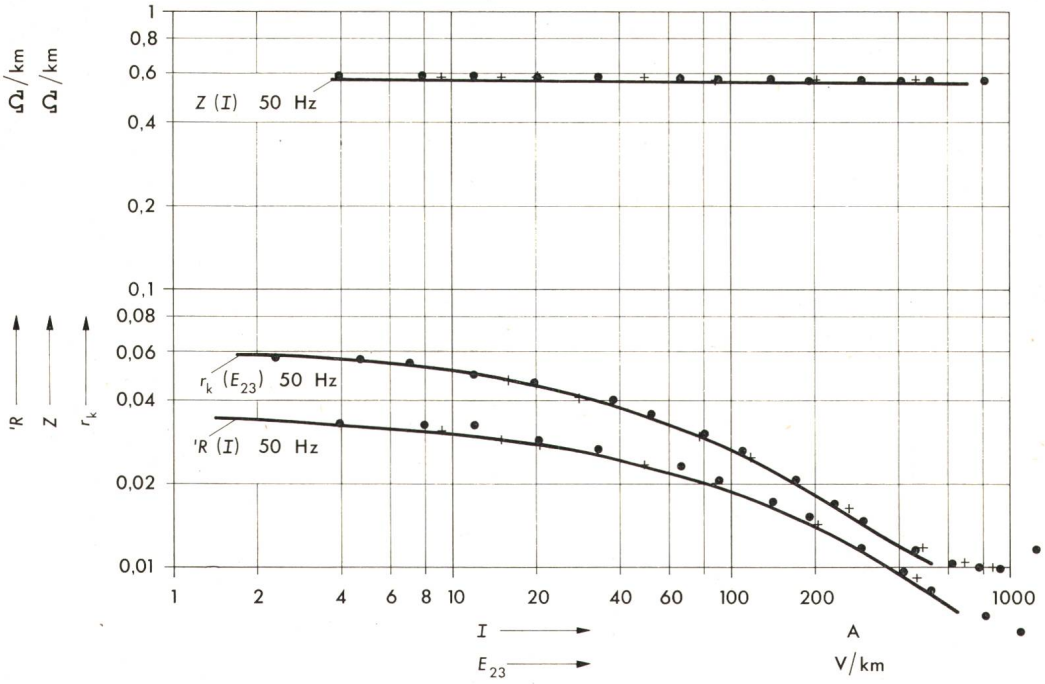


Fig. 10
Structure générale réelle
Câble M 123 + Cu – 50 Hz
● Courbes M 124 + Cu calculées avec μ_r M 123
+ Courbes M 124 + Cu calculées avec μ_r A 007
—— Courbes N° 13 mesurées 7145
(Caractéristiques du câble voir fig. 9)

4. Conclusions

Les schémas équivalents sont vérifiés, pour les fréquences de $16^2/_3$ et 50 Hz avec une précision de 8 % pour la structure simple et de 11 % pour la structure générale. A 125 Hz seule la structure simple est vérifiée à 8 %.

Bien que les structures réelles des câbles ne correspondent pas strictement aux schémas utilisés, on peut les appliquer dans les limites précitées.

Etant donné la précision des calculs de construction, il ne nous semble pas justifié d'effectuer une vérification plus fine des schémas.

Bien que nous ayons mesuré nos câbles jusqu'à des fréquences de 1600 Hz, nous n'avons pas jugé utile de développer des schémas permettant de calculer avec précision des câbles prévus pour des fréquences perturbatrices supérieures à 125 Hz, car seules les fréquences inférieures à 125 Hz nécessitent des armures spéciales.

Nous avons montré [2] que la protection la plus économique est obtenue pour les câbles à structures simples; cette structure d'armure devrait être utilisée de façon générale sauf si:

– la section magnétique devient trop importante;
– les conditions de pose nécessitent une couche supplémentaire de traction externe;
– le câble doit être protégé contre des tensions élevées.

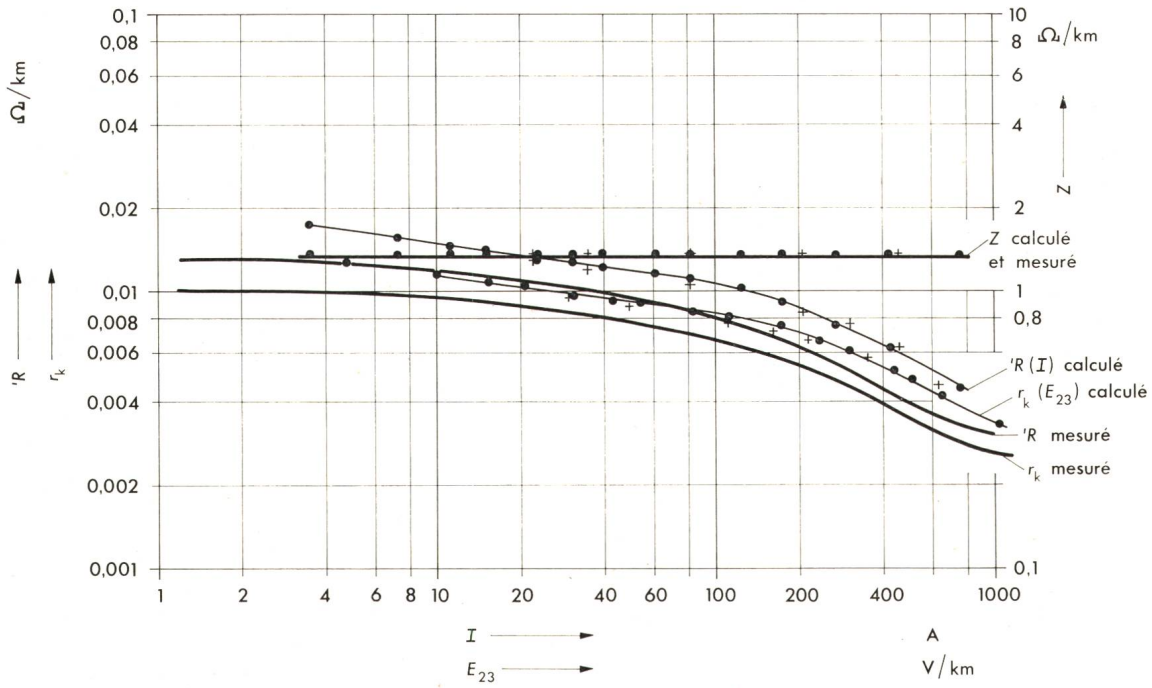


Fig. 11 **Structure générale réelle**
Câble M 123 + Cu – 125 Hz
● Courbes M 124 + Cu calculées avec μ_r M 123
+ Courbes M 124 + Cu calculées avec μ_r A 007
—— Courbes M 124 + Cu mesurées 7145
—— Courbes M 124 + Cu calculées avec μ_r M 123
(Caractéristiques du câble voir fig. 9)

Fig. 12

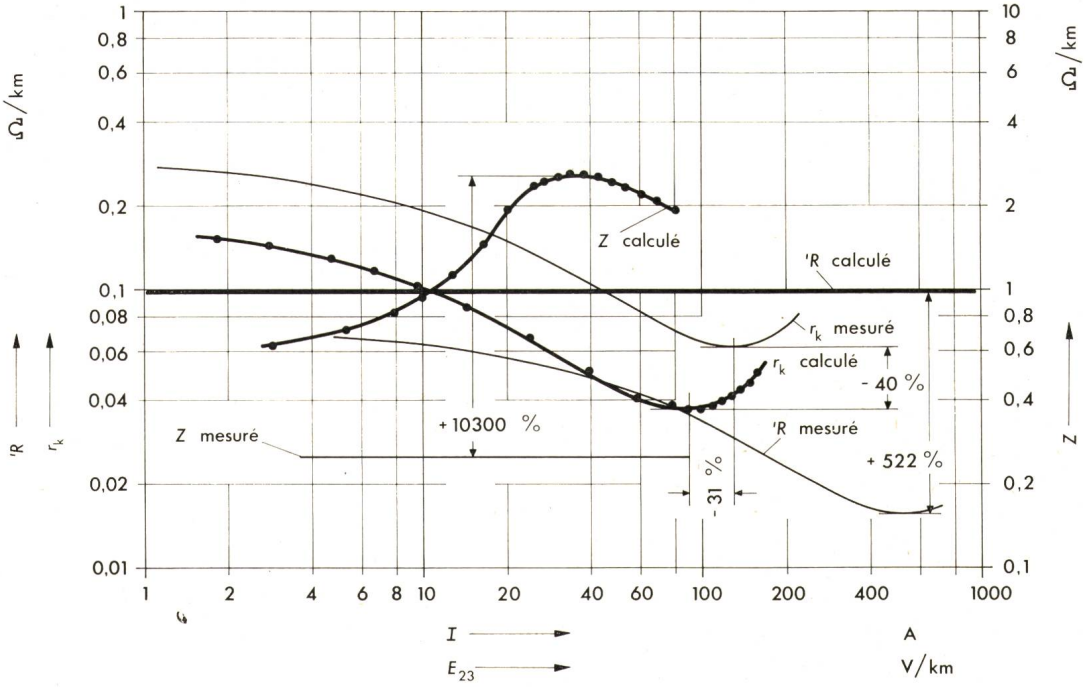
Structure générale réelle calculée avec les formules de la structure simple

Câbles M 123 + Cu – $16^2/_3$ Hz

— Courbes M 124 + Cu calculées avec μ_r M 123 + structure simple

— Courbes M 124 + Cu mesurées 7145 (N° 13)

(Caractéristiques du câble voir fig. 9)



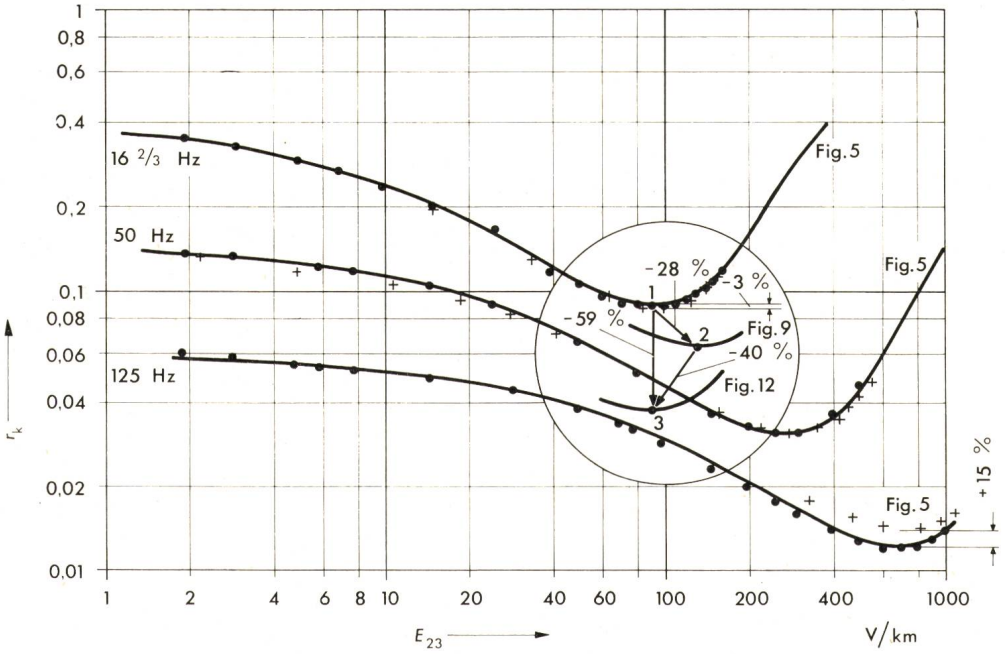


Fig. 13

Structures simples réelles comparées à la structure générale réelle

R_g = 0,23 Ω/km $'S_{Fe}$ = 1,506 m²

L_o = 1,72 · 10⁻³ H/km

D_m = 40 · 10⁻³ m

● Courbes M 124 calculées depuis μ_r M 123

+ Courbes M 124 calculées depuis μ_r A 007

— Courbes N° 15 mesurées avec 7145

Bibliographie

[1] Directives concernant la protection des lignes de télécommunication contre les actions nuisibles des lignes électriques. Genève, CCITT, 1963.

[2] *P. Benoît:* Protection des câbles de télécommunication contre les perturbations électromagnétiques. Câbles, Bulletin des Câbleries de Brugg, Cortaillod et Cossonay -(1973)1, p. 13...18.

Adresse de l'auteur:

P. Benoît, Service de Recherche, Société d'Exploitation des Câbles Electriques Système Berthoud, Borel & Cie, 2016 Cortaillod.