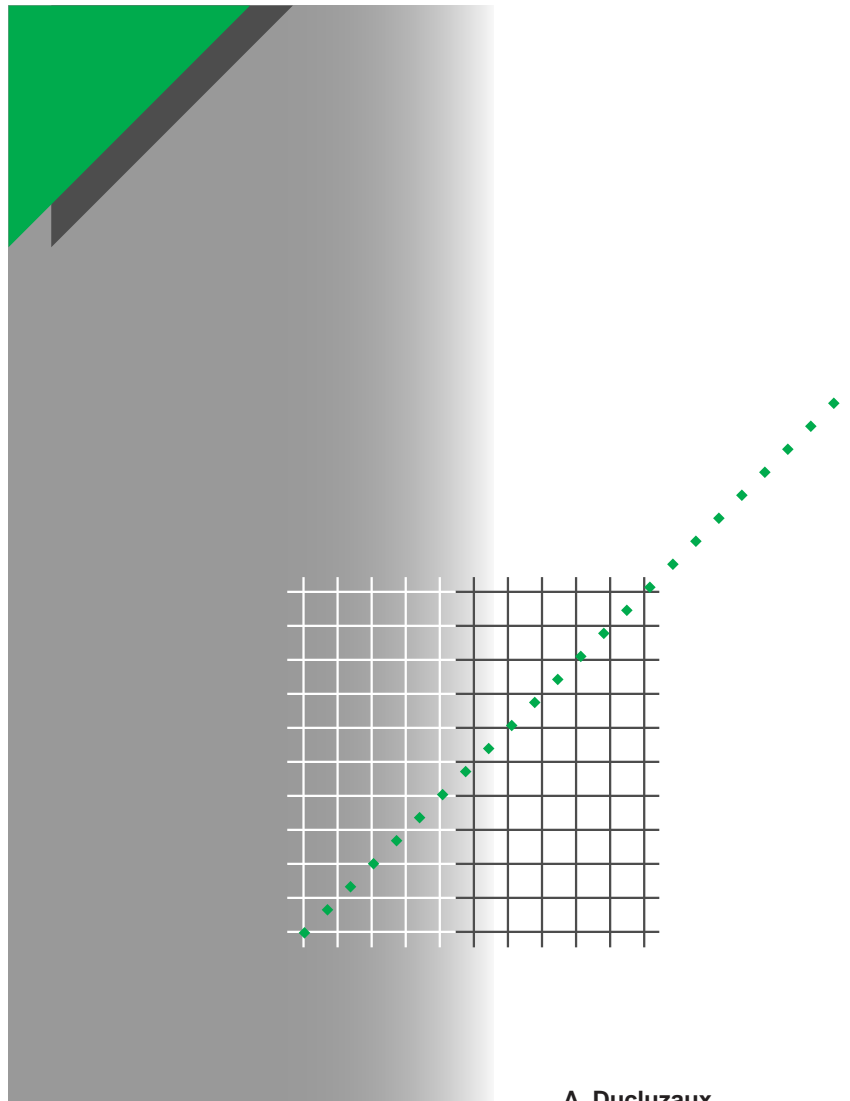


Cahier technique n° 83

Pertes supplémentaires dans les conducteurs pour forte intensité par effet de peau et de proximité



A. Ducluzaux

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

n° 83

Pertes supplémentaires dans les conducteurs pour forte intensité par effet de peau et de proximité

André DUCLUZAUX

Ingénieur ESME en 1950, licencié es-sciences en 1951, est entré aux Etablissements Merlin Gerin en 1952. Il a d'abord participé aux études de tableaux préfabriqués BT, puis à la mise au point des appareillages à la station d'essais en puissance. En 1960, chef du bureau d'études pour les disjoncteurs BT à forte intensité, il a développé les disjoncteurs DA, puis a été chargé de recherches BT. En 1969, il est responsable de projet au département Recherches Générales. C'est pendant qu'il occupait ces fonctions qu'il a fait des études plus poussées sur les effets de peau et de proximité pour le développement d'appareils et de jeux de barres à haute intensité et qu'il a condensé dans un document pratique la plupart des informations essentielles sur ce sujet.

Pertes supplémentaires dans les conducteurs pour forte intensité par effets de peau et de proximité

Toute variation d'intensité d'un courant dans un conducteur modifie la section de passage empruntée. Ce Cahier Technique analyse les conséquences des effets de peau et de proximité dans le cas de canalisations électriques prévues pour forte intensité.

Ces phénomènes devraient être davantage pris en considération lors de la conception de certains jeux de barres car il apparaît que cette particularité, souvent négligée, entraîne un surdimensionnement des conducteurs, des pertes en énergie élevées, donc une mauvaise rentabilité globale d'exploitation.

Sommaire

1 Introduction		p. 4
2 L'effet de peau	2.1 Généralités	p. 5
	2.2 La coque fictive	p. 7
	2.3 Effet de peau dans les conducteurs cylindriques	p. 8
	2.4 Effet de peau dans un conducteur de section rectangulaire	p. 9
3 Les effets de proximité	3.1 L'effet de proximité direct	p. 10
	3.2 L'effet de proximité inverse	p. 12
	3.3 L'effet de proximité induit	p. 12
4 Résistance effective des jeux de barres	4.1 Jeux de barres en méplats	p. 13
	4.2 Echauffement minimal ou pertes supplémentaires réduites ?	p. 14
	4.3 Jeux de barres en profils spéciaux	p. 15
	4.4 Résistivité du métal, cuivre ou aluminium ?	p. 16
	4.5 Influence de la fréquence	p. 16
5 Effet de peau et de proximité en régime transitoire		p. 17
6 Conclusion		p. 18
Bibliographie		p. 19

1 Introduction

Il y a un peu plus d'un siècle (1873) que les électriciens connaissent cette propriété des courants alternatifs de circuler de préférence à la périphérie des conducteurs massifs.

En elle-même, cette propriété ne serait pas gênante si elle ne s'accompagnait de pertes supplémentaires. Dans un conducteur massif, tout se passe pour les pertes et l'échauffement comme si la résistance effective en courant alternatif était supérieure à la résistance réelle en courant continu.

L'augmentation de résistance, de l'ordre de 10 à 20 % pour des conducteurs calibrés pour 2000 A, croit beaucoup plus vite que l'augmentation de section pour le transport d'intensités plus élevées.

Il en résulte deux inconvénients :

- Un gaspillage d'énergie électrique par les pertes supplémentaires, dont les industriels réalisent depuis peu qu'il représente un luxe dépassant le simple aspect financier.
- Un gaspillage de matière première, cuivre ou aluminium, par la quantité plus élevée de métal employé et mal utilisé comme conducteur électrique.

Les pertes d'énergie dans les canalisations électriques relativement courtes des équipements de distribution ne sont généralement prises en compte que pour leurs conséquences physiques : l'échauffement et l'évacuation des calories. L'aspect économique du rendement énergétique d'une liaison est pourtant loin d'être négligeable en basse tension : un simple calcul montre qu'un jeu de

barres de 1000 mm², transportant 2000 A, dissipe en un an d'utilisation permanente une énergie dont le coût est sensiblement égal au prix du cuivre le constituant.

Un taux de pertes supplémentaires par effet de peau de 10 % représente ainsi le prix du cuivre pour la durée de vie de l'installation (20 ans avec facteur de marche 0,5).

La loi de Kelvin rappelle d'ailleurs que la section économique du cuivre (ou de l'aluminium) à utiliser pour un jeu de barres est celle pour laquelle sont égalisés d'une part le coût des pertes Joule annuelles, d'autre part les charges d'amortissement annuelles du cuivre et des autres éléments de construction proportionnels au poids du cuivre.

Il rentre naturellement dans la vocation de Schneider Electric, constructeur d'appareillage et d'équipements de distribution, de bien cerner ces problèmes techniques dans la conception des matériels. Mais le rôle d'un constructeur ne s'arrête pas à la simple fourniture de produits, il se doit d'apporter son expérience technique aux utilisateurs pour leur faciliter l'installation et l'exploitation judicieuse des matériels.

L'objectif de cette étude sera donc de rappeler principe et conséquences des effets de peau et de proximité et de rassembler des données pratiques utiles aux installateurs de canalisations électriques à forte intensité. Ces effets commencent à être sensibles pour les sections de conducteurs adoptées pour 1600 - 2000 A, mais ils deviennent très importants à partir de 4000 à 5000 A.

2 L'effet de peau

Le terme adopté d'« effet de peau » est la traduction de l'anglais « skin-effect ». On trouve aussi en français effet pelliculaire ou effet Kelvin.

En allemand il s'agit de « Stromverdrängung », littéralement : déplacement de courant.

2.1 Généralités

L'augmentation de la densité de courant à la périphérie des conducteurs massifs en courant alternatif est l'aspect le plus frappant de l'effet de peau, mais cela n'explique nullement l'augmentation de la résistance effective.

Une explication souvent proposée est que l'inductance du filet de courant central d'un conducteur est plus élevée que celle des filets périphériques, cette inductance étant liée à la variation du flux embrassé, lui-même maximum pour le filet de courant central.

Afin d'équilibrer les chutes de tension inductives entre les divers filets, un courant plus élevé circule dans les filets périphériques. Ces différents courants sont ainsi plus ou moins déphasés et leur somme arithmétique est supérieure au courant total mesuré ; il s'en suivra des pertes supplémentaires par effet Joule ; ce qui revient à dire que la résistance effective est augmentée.

Pour cerner de plus près cet effet de peau quantitativement et avec toutes ses implications, il est nécessaire de passer par les raisonnements mathématiques développés par Lord Kelvin [1] ⁽¹⁾ en 1889 et basés sur les équations de propagation établies par Maxwell quelques années auparavant.

Ces démonstrations figurant notamment dans [3], [9], [13], [14], [20], [24], débordent du cadre de cette étude ; nous nous contenterons de mettre en évidence l'effet de peau et ses conséquences par un raisonnement qualitatif basé sur les courants induits parasites (courants de Foucault ⁽²⁾) avec l'aide de simples diagrammes vectoriels :

Considérons un conducteur rectangulaire massif (cf. **fig. 1**) réduit sur une partie de sa longueur à 3 éléments (1 et 3 à la périphérie, 2 au centre).

En courant continu, l'intensité totale I qui le traverse est la somme des 3 intensités égales dans chaque élément :

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

En courant alternatif, se superposent aux trois courants précédents des courants induits.

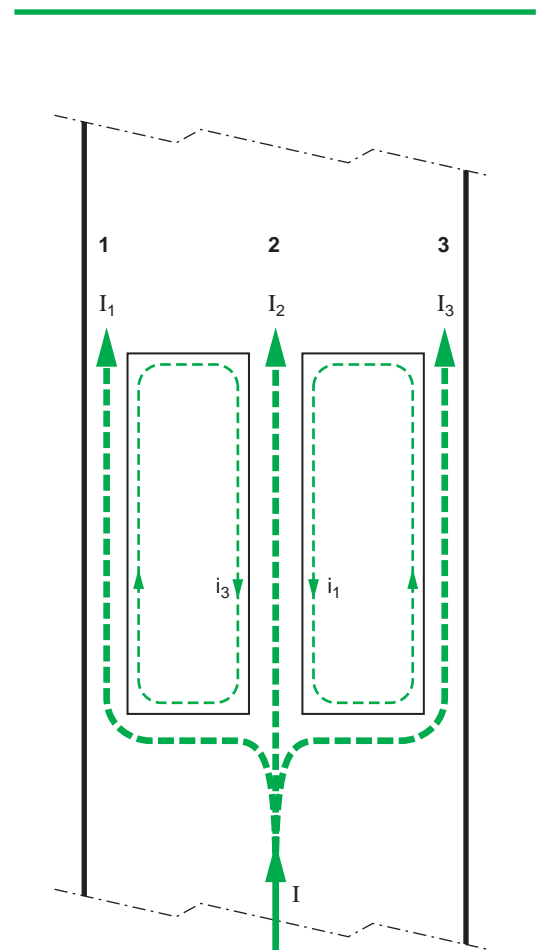


Fig. 1

L'élément 3, parcouru par I_3 , induit dans le rectangle formé par 1 et 2 une fem e_3 engendrant une intensité i_3 déphasée de α (voisin de $\pi/2$).

L'intensité résultante I'_1 dans l'élément 1 est : $\vec{I}'_1 = \vec{I}_1 + \vec{i}_3$

(1) Les chiffres entre [] se rapportent à la bibliographie.

(2) Les électriciens français ont pensé honorer Foucault en donnant son nom aux courants induits

lorsqu'ils sont parasites ; dans les autres pays, ce sont des courants « tourbillonnaires » : eddycurrent ou wirbelstrom.

On constate sur la **figure 2** que I'_1 a une intensité plus grande que I_1 et se trouve déphasé en avant de I_1 , vecteur considéré en phase sur la tension U existant entre les extrémités aux mêmes potentiels, des trois éléments. De la même façon, dans l'élément 3 on aura :

$$\vec{I}'_3 = \vec{I}_3 + \vec{i}_1$$

L'intensité résultante I'_2 dans l'élément central 2 sera par contre diminuée par les 2 courants induits i_1 et i_3 :

$$\vec{I}'_2 = \vec{I}_2 - \vec{i}_3 - \vec{i}_1$$

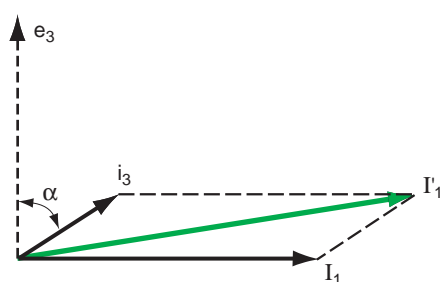


Fig. 2

Le diagramme de la **figure 3** indique que l'intensité résultante I'_2 est bien inférieure en amplitude à I_2 et déphasée en arrière.

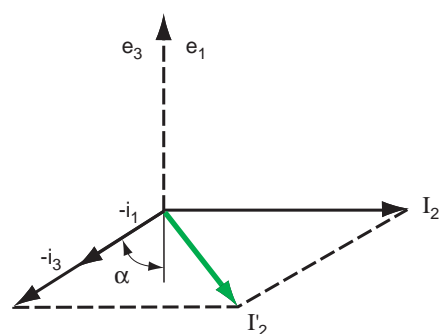


Fig. 3

Sur la **figure 4**, l'intensité totale I dans l'ensemble du conducteur apparaît comme la somme vectorielle des intensités partielles dans les 3 éléments considérés :

$$\vec{I} = \vec{I}'_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3$$

En transposant ce raisonnement à l'ensemble des éléments de courant du conducteur massif et non plus à 3 seulement, l'allure générale du phénomène reste la même ; il y a modification progressive de

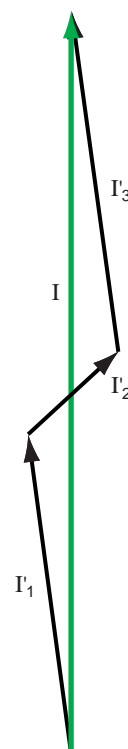


Fig. 4

l'intensité et du déphasage des éléments de courant depuis la périphérie jusqu'au centre. On a mis ainsi en évidence les causes et conséquences de l'effet de peau relatives aux différentes grandeurs électriques et physiques :

■ Densité de courant

La densité à la périphérie est plus élevée que la densité de courant moyenne ($I'_1 > I_1$). La densité de courant au centre est inférieure à cette densité moyenne ($I'_2 < I_2$).

■ Intensité

La somme des amplitudes des intensités dans les différents éléments est plus grande que l'intensité totale (cf. fig. 4).

■ Pertes

Les pertes réelles par effet Joule sont donc plus élevées, ce qu'on exprime en considérant que la résistance effective en courant alternatif R_a est plus grande que la résistance vraie en courant continu R_c d'où ces pertes supplémentaires. En pratique, le taux d'effet de peau ou coefficient d'augmentation de résistance ou de pertes supplémentaires s'exprime par le rapport :

$$K = \frac{R_a}{R_c} \geq 1$$

■ Déphasage

Par rapport à la tension aux bornes du conducteur, l'intensité à la périphérie est déphasée en avant, l'intensité au centre en arrière ; le déphasage au

centre peut atteindre et même dépasser $\pi/2$, au point que l'intensité qui subsiste au centre du conducteur se retranche de l'intensité totale véhiculée, elle devient complètement parasite.

■ Inductance

L'inductance effective d'un conducteur en c. a. se compose de 2 termes :
Le premier L_1 est l'inductance des éléments de circuit extérieurs au conducteur, le second L_2 est l'inductance propre interne, résultant du champ intérieur. L_2 est fonction de la répartition du courant à l'intérieur, comme cette répartition hétérogène consiste en l'augmentation de densité à la périphérie, le terme L_2 diminue. L'effet de peau diminue donc l'inductance effective d'un conducteur.

■ Perméabilité

Le raisonnement précédent repose sur le phénomène d'induction. Donc la perméabilité du milieu y joue son rôle classique ; l'effet de peau est ainsi beaucoup plus prononcé dans les conducteurs magnétiques à forte perméabilité.

■ Fréquence

L'augmentation de l'effet de peau avec la fréquence résulte aussi de son origine liée à un phénomène d'induction, proportionnel à la variation de flux.

■ Résistivité

Une résistivité plus élevée du milieu conducteur entraîne une diminution des courants induits, donc un effet de peau moins prononcé.

2.2 La coque fictive

Cherchant à faciliter l'interprétation de l'effet de peau, Boucherot [2] proposa en 1905 la notion de « coque fictive » dénommée aussi « épaisseur de peau » ou « profondeur de pénétration ».

Sur le plan de l'effet Joule, tout se passe dans le conducteur comme si la totalité du courant véhiculé l'était dans une couche périphérique ou coque, d'épaisseur δ , la densité de courant étant uniforme dans cette coque et nulle à l'intérieur :

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10\rho}{\mu f}} \text{ avec :}$$

δ : épaisseur de la coque est exprimée en m
 ρ : la résistivité est exprimée en Ω/m
 μ : la perméabilité valant $4\pi 10^{-7}$ pour le vide
 f : la fréquence est exprimée en Hz.

En réalité, la densité décroît suivant une loi exponentielle depuis la périphérie jusqu'au

centre du conducteur. A la profondeur δ , la densité est encore de $\frac{1}{e} = 0,367$ comme le montre la **figure 5**.

La notion de coque fictive suppose que la densité moyenne dans la coque est égale à $\frac{1}{\sqrt{2}}$ fois la densité périphérique.

Sur le plan pratique, la coque ou profondeur de pénétration permet de se rendre compte très rapidement si le métal d'un conducteur est correctement utilisé, connaissant les trois grandeurs ρ , μ et f .

A 50 Hz, le cuivre a une peau de 8,5 mm, l'aluminium de 10,5 mm : ce serait un gaspillage de matière d'utiliser une épaisseur de barre ou un diamètre de rond supérieurs à 16 mm en cuivre ou 20 mm en aluminium.

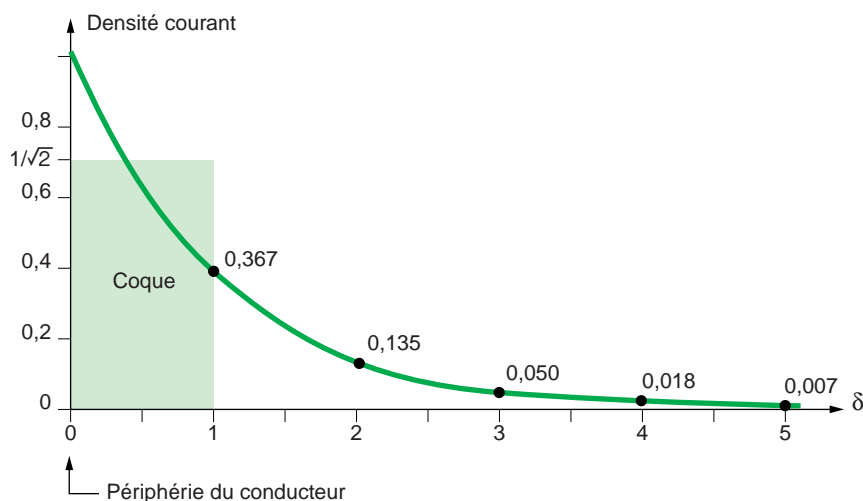


Fig. 5 : décroissance de la densité de courant à l'intérieur d'un conducteur.

Pour l'acier, la peau est de l'ordre du millimètre lorsqu'il n'est pas saturé, ce qui démontre l'inutilité d'employer des pièces en acier conductrices d'épaisseur supérieure à 2 mm, sauf pour des raisons mécaniques.

A noter qu'une saturation progressive fait pénétrer plus profondément le courant dans les conducteurs en acier, ce qui a permis certaines utilisations originales comme résistance variable [7].

2.3 Effet de peau dans les conducteurs cylindriques

Pour cette forme particulière, les calculs sont moins complexes et les résultats plus précis. Le seul paramètre dont on se préoccupe en

général est le rapport $K = \frac{Ra}{Rc}$ ou coefficient de

pertes supplémentaires qui met en évidence, lorsqu'il dépasse trop l'unité, la géométrie inadéquate d'un conducteur. Plusieurs formules empiriques ont été proposées, celle de Levasseur [6] est particulièrement simple et conduit à des erreurs inférieures à 2 % :

$$K = 6 \sqrt{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + \left(\frac{S}{p\delta}\right)^6} + 0,25$$

Avec S la section du conducteur, p son périmètre, δ l'épaisseur de peau.

Parmi les tableaux et abaques publiés, nous donnons en **figure 6** des résultats interprétés d'après les travaux originaux de Dwight [3].

Pour chaque géométrie caractérisée par le rapport de l'épaisseur au diamètre, on trouve la valeur de K en fonction de la résistance Rc en courant continu. Les courbes sont ainsi valables quelque soit la résistivité du métal (amagnétique). La fréquence de référence est 50 Hz ; pour toute autre fréquence f, il suffit de remplacer la valeur de Rc par $Rc \frac{50}{f}$.

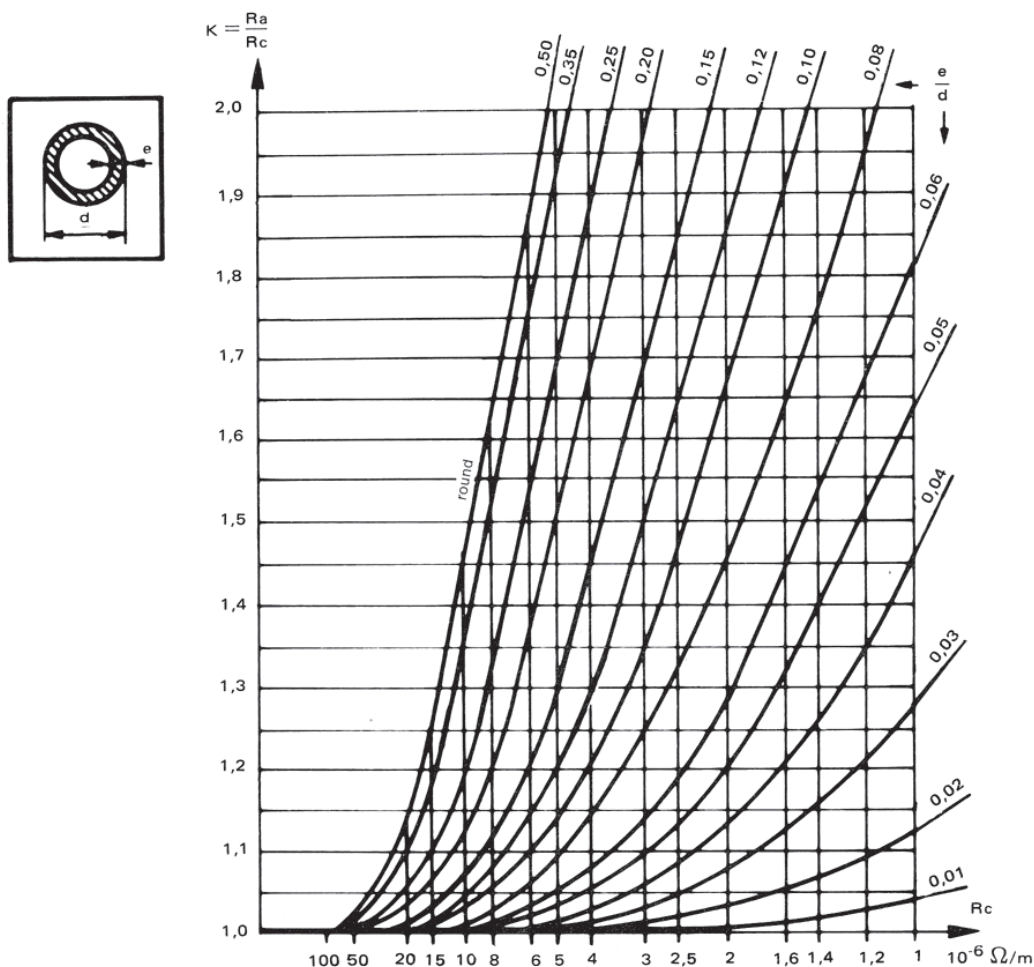


Fig. 6 : coefficient de pertes supplémentaires par effet de peau dans les conducteurs cylindriques.

Les conducteurs cylindriques de forte section rencontrés en pratique sont des tubes ou des câbles.

Dans un câble, la division en brins pour des raisons de souplesse ne modifie en rien l'effet de peau, comme on pourrait le penser par analogie avec le fractionnement en tôles fines des circuits magnétiques en acier. Dans les tôles, les courants de Foucault sont transversaux, mais

longitudinaux dans un câble. La division en brins multiples d'un câble de forte section pourrait être exploitée pour réduire son coefficient K, si les brins étaient régulièrement permutés, c'est-à-dire enroulés tantôt à la périphérie, tantôt au centre. Mais on utilise rarement des sections supérieures à 400 mm² en cuivre ou 500 mm² en aluminium pour lesquelles le métal est encore utilisé à 95 %.

2.4 Effet de peau dans un conducteur de section rectangulaire

Les calculs sont dans ce cas beaucoup plus complexes et restent imprécis, compte tenu des hypothèses sur la répartition du champ magnétique. Les auteurs qui s'y sont livrés (voir bibliographie) ont le plus souvent complété leurs résultats par des expérimentations, elles aussi délicates.

D'une façon qualitative, la **figure 7** extraite de l'importante étude de Schwenkhagen [5] et confirmée par Renaud [13], illustre l'importance du phénomène dans une barre de cuivre de 100 x 10 mm à 50 Hz.

Les courbes indiquent, pour chaque point intérieur situé dans l'axe, la densité de courant relative par rapport à la densité moyenne et le déphasage par rapport à la tension.

La détermination par le calcul ou l'expérience du coefficient K de pertes supplémentaires reste cependant sujette à caution, vues les quelques valeurs proposées pour la barre de 100 x 10 en cuivre : 1,19 - 1,18 - 1,15 - 1,14 - 1,05 - 1,008. D'après nos propres recoupements le coefficient 1,15 serait le plus probable.

La **figure 8** résultant d'un programme de calcul proposé par Silvester [19] permet d'obtenir un ordre de grandeur satisfaisant du coefficient K pour un conducteur rectangulaire quelconque.

Comme pour la figure 6, les courbes sont établies en fonction de la résistance Rc en courant continu et pour 50 Hz.

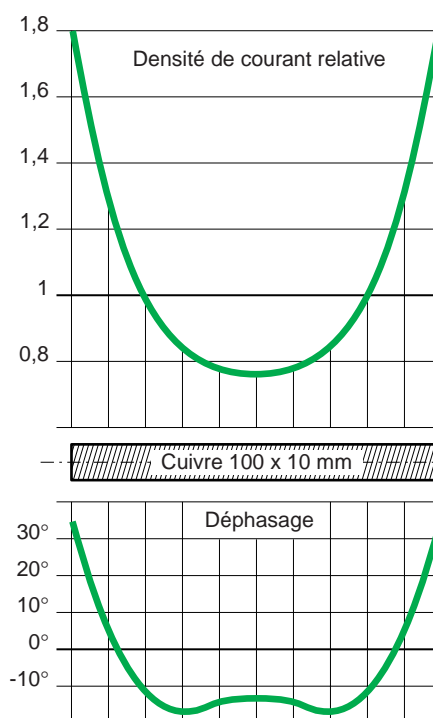


Fig. 7 : densité de courant et déphasage dans une barre rectangulaire.

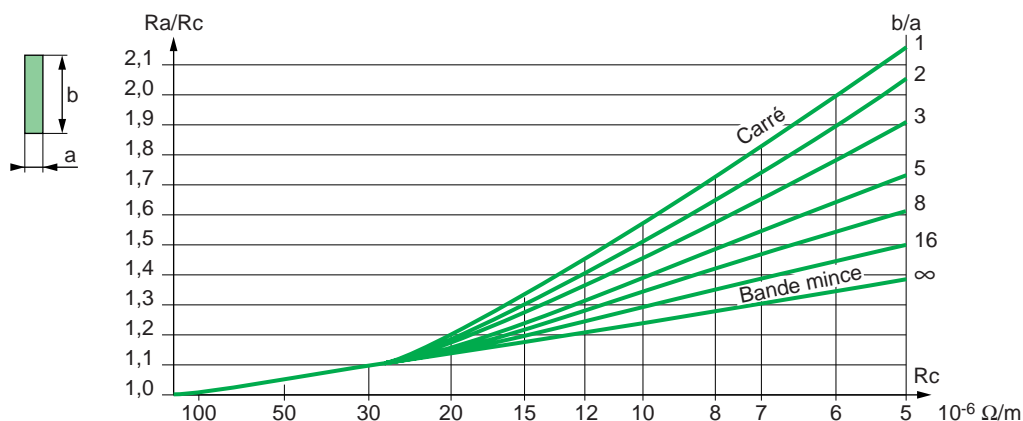


Fig. 8 : coefficient de pertes supplémentaires par effet de peau dans les conducteurs rectangulaires.

3 Les effets de proximité

Dans ce qui précède, le conducteur soumis à l'effet de peau était isolé, hors de l'influence de toute autre champ magnétique que son champ propre. L'hypothèse n'est plus valable dès qu'un autre conducteur se trouve à proximité du précédent ; le champ de chacun perturbe la répartition du courant dans l'autre par « effet de proximité ».

On englobe, sous l'expression d'effet de proximité, trois phénomènes voisins qu'il nous paraît nécessaire de dissocier pour plus de clarté malgré leurs similitudes :

■ Effet de proximité direct

Influence mutuelle sur les densités de courant respectives dans des conducteurs rapprochés, parcourus par des courants de même sens.

■ Effet de proximité inverse

Influence mutuelle sur les densités de courant respectives, dans des conducteurs rapprochés, parcourus par des courants de sens inverse.

■ Effet de proximité induit

Caractérise les phénomènes associés entre le courant circulant dans un conducteur et les courants de circulation qu'il induit dans des pièces métalliques situées à proximité.

En réalité, dans un jeu de barres triphasé avec plusieurs barres par phase, ces effets sont imbriqués comme le montre l'essai d'échauffement rapporté à la **figure 9** : le jeu de barres en question a, par phase, 4 barres de 80 x 6 mm en cuivre espacées de 6 mm ; une distance de 60 mm sépare les phases.

Un point à la verticale de chacune des 12 barres représente son échauffement au-dessus de l'ambiante, pour une intensité de 2500 A.

Plusieurs aspects des effets évoqués se retrouvent sur ce graphique, bien que les échauffements ne représentent pas exactement les densités de courant correspondantes.

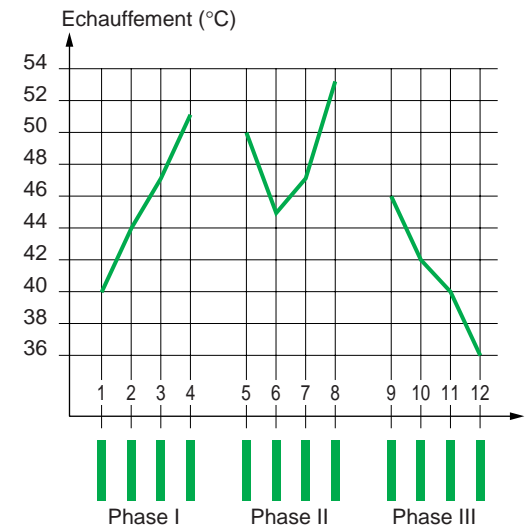


Fig. 9 : échauffement d'un jeu de barres triphasé.

En particulier, on remarque que :

- les 2 barres intérieures 6 et 7 de la phase centrale chauffent moins que les barres extérieures pourtant mieux refroidies,
- l'effet de proximité dissymétrique résultant du déphasage de 120° en triphasé, a lieu entre les barres 4 et 5 d'une part, 8 et 9 d'autre part.

Cet essai montre de plus l'ambiguïté de la notion d'échauffement moyen d'un jeu de barres sur lequel on relève des valeurs aussi disparates que 36° et 53°, dépassant de loin les erreurs de mesure.

Analysons maintenant les 3 effets de proximité séparément avant de chiffrer dans les cas réels les 2 premiers qui nous intéressent particulièrement quand ils se conjuguent avec l'effet de peau.

3.1 L'effet de proximité direct

Considérons un conducteur massif de section carrée (cf. **fig. 10** page suivante). La densité de courant est plus élevée (a) sur la périphérie par effet de peau.

Partageons longitudinalement le conducteur en deux moitiés (b), aucune modification n'apparaît dans la répartition du courant. Eloignons progressivement chacune des moitiés (c), à mesure que leur distance augmente, le champ

magnétique de chacune se modifie et la densité de courant sur les faces en regard va croître, jusqu'à devenir égale à celles des faces opposées pour une distance de 2 à 3 fois le côté du carré.

Cet effet se manifeste, superposé à l'effet de peau, dans les jeux de barres dont chaque phase est constituée de plusieurs méplats en parallèle électriquement et spatialement.

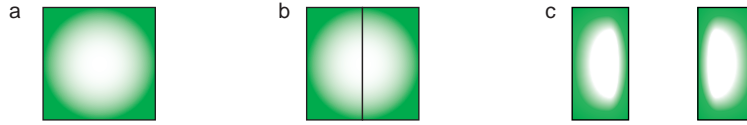


Fig. 10

La **figure 11**, extraite de [5] se rapporte à un groupe de 4 barres de 100 x 10 mm en cuivre, espacées de 10 mm. Les courbes supérieures donnent la densité de courant relative en chaque point de l'axe, les courbes inférieures le déphasage relatif avant ou arrière par rapport à la tension aux extrémités. Dans chaque cas,

une courbe se rapporte aux barres extérieures, l'autre aux barres intérieures.

Il est assez surprenant de constater l'importante disparité des densités de courant, dans le rapport 8 à 1, ainsi que le déphasage dépassant 90° au centre des barres internes.

La **figure 12** se rapporte à un groupe de 5 barres de 80 x 10 espacées de 10 mm [13] ; les courbes tracées sur la coupe sont des lignes d'équi-densité de courant.

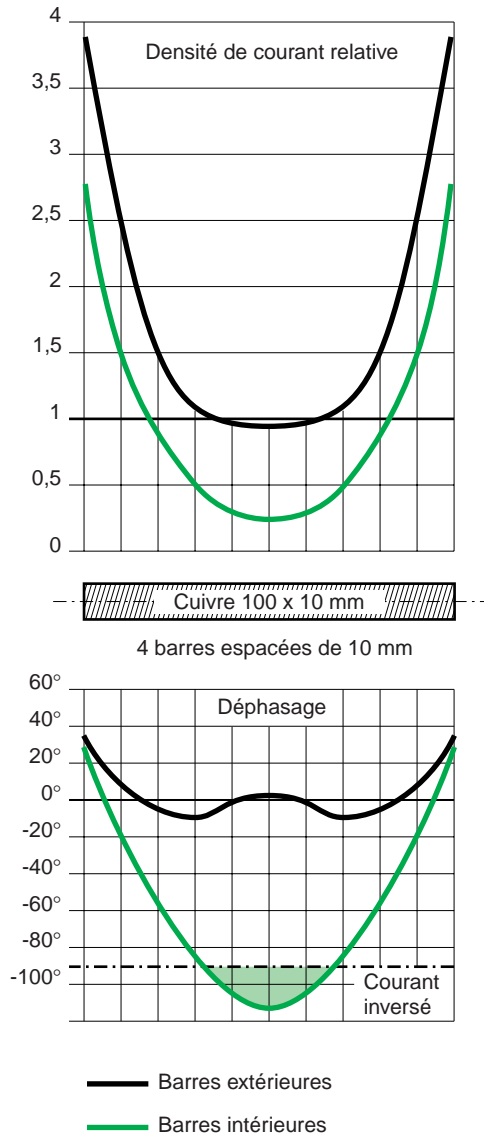


Fig. 11 : densité de courant et déphasage dans un groupe de 4 barres.

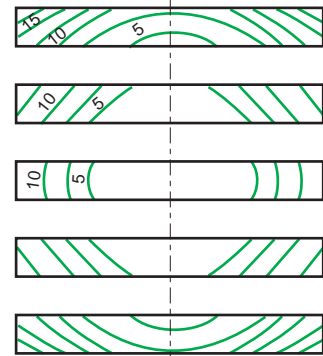


Fig. 12 : densité de courant dans un groupe de 5 barres.

On remarque comment, dans un paquet de barres rapprochées, la répartition du courant diffère peu de ce que l'on obtiendrait par simple effet de peau dans un conducteur massif de dimensions extérieures identiques.

Plus le nombre de barres en parallèle augmente, moins les barres internes sont chargées par rapport aux barres externes. Cette inégale répartition du courant, donc des échauffements, est partiellement compensée (cf. fig. 9) par le meilleur refroidissement des barres externes les plus chargées.

Pour un écartement suffisant des barres, de l'ordre de 3 fois leur plus grande dimension, l'effet de proximité disparaît totalement mais, pour des distances intermédiaires, une appréciable diminution du coefficient de pertes K se manifeste ainsi que le montrent les essais et calculs effectués sur 4 barres de 80 x 10 espacées de 10 à 40 mm :

Ecartement en mm	10	20	40
$K = \frac{Ra}{Rc}$	1,65	1,53	1,38

3.2 L'effet de proximité inverse

Cet effet, très analogue mais inversé par rapport au précédent, se manifeste entre deux conducteurs voisins parcourus par des courants inverses (cf. **fig. 13**) ; il se produit une augmentation de la densité de courant sur les faces en regard qui sont les parties des conducteurs pour lesquelles l'inductance est minimale.

Dans le raccordement des appareillages à forte intensité, cet effet se rencontre dès que les conducteurs d'une même phase forment une boucle. Les barres A intérieures à la boucle formée par l'appareil schématisé sur la **figure 14** sont plus chargées que les barres C extérieures.

Dans les jeux de barres triphasés, l'effet de proximité inverse est sensible en BT, lorsque les phases sont rapprochées ; quelque soit l'ordre des phases, il se trouve toujours 2 phases voisines parcourues par une intensité inverse pendant une fraction de période.

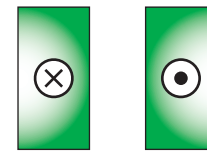


Fig. 13

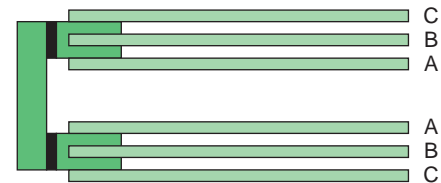


Fig. 14

3.3 L'effet de proximité induit

Les pièces métalliques, situées à proximité des conducteurs traversés par une intensité alternative élevée, sont le siège de courants induits entraînant des pertes supplémentaires, d'où augmentation indirecte de la résistance effective du circuit inducteur. Simultanément, l'inductance de celui-ci décroît.

Quand la pièce est en acier, les pertes internes sont encore majorées des pertes par hystérésis. C'est la raison pour laquelle on ne peut entourer d'une protection en acier un conducteur monophasé au-delà d'une centaine d'ampères sous risque de porter cette gaine à plus de 100° C.

Quelques données chiffrées figurant dans [15], [18] et [22] se rapportent à des cas typiques de pièces métalliques acier ou aluminium, placées à proximité des conducteurs.

Les courants induits évoqués ne sont pas toujours parasites, le champ qu'ils développent

s'oppose par définition au champ principal inducteur. Ainsi une plaque d'aluminium proche d'un jeu de barres joue le rôle d'écran magnétique, réduisant le champ au-delà à peu de chose.

Cet effet est particulièrement accusé lorsque chaque phase d'une liaison à forte intensité (5000 à 30000 A) est enfermée dans une gaine tubulaire en aluminium ; si les gaines sont reliées entre elles, il y circule un courant presque égal au courant principal. Il en résulte une suppression du champ à l'extérieur et par conséquent des efforts électrodynamiques entre phases.

La conception des jeux de barres sous gaine dépasse l'objet de cette étude, le lecteur pourra se référer aux nombreuses publications s'y rapportant [15] et [16].

4 Résistance effective des jeux de barres

4.1 Jeux de barres en méplates

La construction des jeux de barres passe le plus souvent par la juxtaposition de plusieurs barres méplates en parallèle sur chaque phase. Pour des raisons pratiques, on adopte alors un espacement entre barres égal à leur épaisseur, d'où effets de peau et de proximité illustrés précédemment.

Si l'on se réfère aux résultats publiés, l'appréciation chiffrée de ces effets conjugués est assez imprécise. Un ordre de grandeur du coefficient K de pertes supplémentaires est donné en **figure 15** pour deux sections de barres de cuivre : 100 x 5 et 100 x 10 mm.

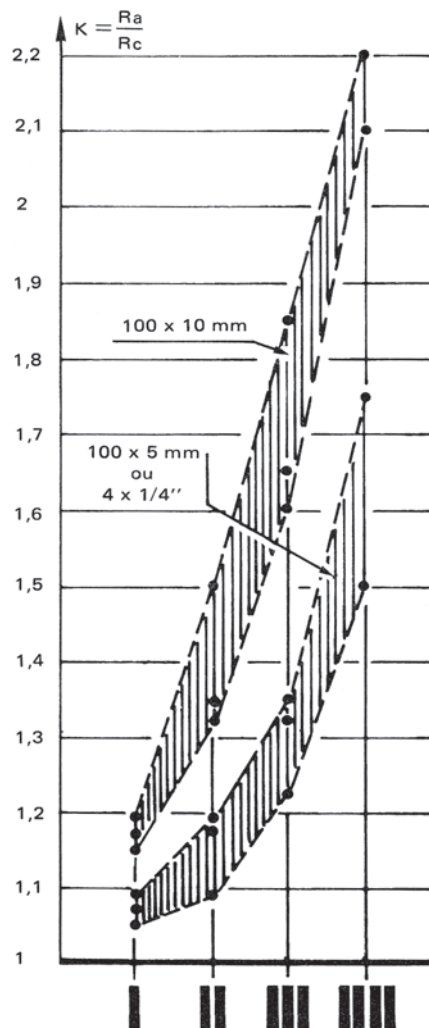


Fig. 15 : coefficient de pertes supplémentaires dans les groupes de barres méplates.

Pour chaque groupe de 1, 2, 3 ou 4 barres, des points correspondant chacun à un résultat publié délimitent une zone hachurée où se situe la valeur probable K.

A défaut d'autres documents plus précis, la recherche du coefficient K d'un paquet de barres de dimensions quelconques peut se faire à partir des courbes de la figure 8, en l'assimilant à une barre unique de même hauteur mais de largeur égale à celle hors tout du paquet. La résistance R_c est alors équivalente à celle de l'ensemble des barres en parallèle.

Le coefficient K trouvé par cette méthode l'est par excès, mais cette extrapolation n'est valable que pour des barres espacées au plus d'une distance égale à leur épaisseur.

En effet, un écartement notable et une disposition judicieuse conduit à une réduction du coefficient de pertes ; ainsi sur la **figure 16** [22] sont indiqués les coefficients K pour des groupes de 3, 4, 6 et 8 barres de 100 x 6 ; les barres proches sont séparées de 6 mm, les barres les plus éloignées de 60 mm.

Le gain relatif sur les pertes est de 20 % pour 3 barres, de 40 % pour 4 barres suivant qu'elles sont en un seul ou deux paquets.

L'utilisation de 5 barres groupées est rarement envisagée en raison du coefficient de pertes élevé, lié à la mauvaise utilisation de la barre centrale.

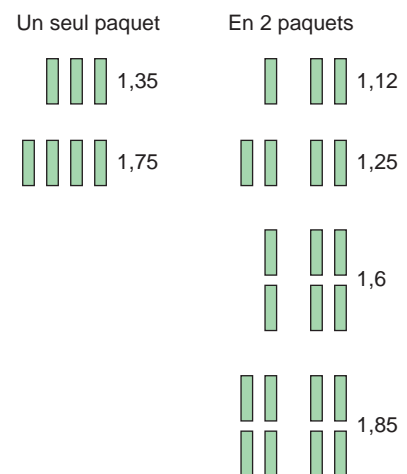


Fig. 16 : coefficient de pertes supplémentaires dans les groupes de 3 à 8 barres méplates suivant leur disposition.

Il a été aussi proposé de disposer les 4 barres d'une phase suivant les côtés d'un carré, solution permettant de retrouver l'avantage du conducteur tubulaire, mais les supports et dérivations s'en trouvent considérablement compliqués.

Toutes ces indications concernent l'effet de peau conjugué avec l'effet de proximité direct qui se manifestent dans un groupe de plusieurs barres d'une même phase ; en triphasé, si la distance entre les barres les plus proches de 2 phases différentes est inférieure à 2 fois la hauteur de ces barres, un effet de proximité inverse se superpose aux effets précédents.

Pour connaître le coefficient K exprimant l'augmentation de pertes correspondantes, on pourra se reporter soit à la norme DIN 43.671 [23] indiquant un coefficient K4 pour barres de 5 ou 10 mm d'épaisseur, soit à la référence [24] où les distances moyennes géométriques de diverses formes de conducteurs permettent le calcul en question.

Une disposition particulièrement intéressante en triphasé est le jeu de barres « sandwich », entrelacé ou permuté [11] ; les barres de chacune des phases ne sont pas disposées en groupes indépendants par phase, mais au contraire intercalées.

Un jeu de barres à 2 barres par phase (J, R, V) se présente alors suivant la **figure 17**, il y a

annulation des effets de proximité, la densité de courant dans chaque barre est presque identique et le coefficient K peu supérieur à 1.

Deux inconvénients restreignent la généralisation du procédé : une certaine complexité des raccordements et éclissages, un isolement difficile à réaliser entre phases, même en basse tension.

Un avantage supplémentaire est la réduction des efforts électrodynamiques, auquel s'ajoute une diminution de l'inductance par phase dans un rapport de 10 ; cette dernière propriété des jeux de barres sandwichés a un effet favorable sur la chute de tension inductive en service normal, mais entraîne un accroissement de la valeur du courant de court-circuit.

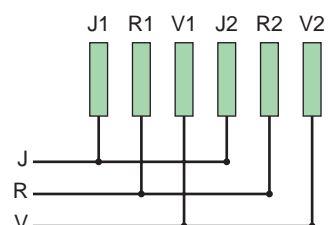


Fig. 17

4.2 Echauffement minimal ou pertes supplémentaires réduites ?

Jusqu'à présent, les effets mentionnés ont été analysés sous le seul aspect de l'accroissement de la résistance effective en courant alternatif, soit des pertes supplémentaires par effet Joule. La conséquence normale est un échauffement accru des conducteurs, mais celui-ci se trouve parfois compensé par une disposition favorisant le refroidissement par convection ou rayonnement.

Or l'échauffement est actuellement le seul critère important, retenu pour le dimensionnement d'une canalisation à forte intensité, mais un échauffement minimal n'est pas toujours lié au coefficient de pertes le plus faible : en se référant à la figure 15, le coefficient K est sensiblement équivalent pour une barre de 100 x 10 ou 2 barres de 100 x 5, mais une surface de

refroidissement plus grande autorise dans ce dernier cas, à échauffement égal, une intensité plus élevée de 10 % donc des pertes 20 % supérieures. Un autre exemple caractéristique est le conducteur tubulaire dont la forme optimale garantit un coefficient K proche de 1 ; mais ce tube a la surface de refroidissement la plus réduite (sans ventilation forcée à l'intérieur) et l'on constate sur la **figure 18** qu'il est loin d'être le profil véhiculant l'intensité la plus élevée, à échauffement et section identique à d'autres configurations.

Le concepteur d'une canalisation à forte intensité aura parfois intérêt à choisir une technologie non seulement d'après l'échauffement, mais aussi d'après les pertes totales.



I	1	1,18	1,25	1,28	1,50	1,54	1,57	1,71
K	1,75	1,25	1,05	1,1	1,08	1,15	1,3	1,1
P	1,75	1,75	1,65	1,8	2,4	2,7	3,2	3,2

Fig. 18 : comparaison de profils de même section totale.

4.3 Jeux de barres en profils spéciaux

Quand l'intensité à transporter dépasse 4 à 5000 A, les jeux de barres en méplats deviennent mal adaptés à moins d'adopter les espacements indiqués figure 16. On utilise alors des profils spéciaux satisfaisant mieux et simultanément aux deux critères :

- refroidissement efficace,
- pertes réduites.

Il faut en plus que ces profils aient une bonne résistance aux efforts électrodynamiques de court-circuit et soient pratiques à installer.

■ Le profil en U jumelés très employé répond correctement, dans l'ensemble, à ces conditions (cf. **fig. 19**).

■ Le profil en cornières jumelées, plus efficace encore sur les plans électriques et thermiques, est un peu moins pratique.

■ On rencontre aussi, en particulier aux U.S.A. où il est normalisé [21], un profil carré à angles arrondis dont le coefficient de pertes est presque égal à celui du tube dont le refroidissement est très amélioré par des trous disposés en quinconce sur les deux faces horizontales.

■ Un constructeur européen utilise aussi un profil en forme de V d'angle intérieur à 120°, assemblé par groupe de 2, 3 ou 4 par phase [17].

Le choix parmi ces différents profils est un compromis entre :

- l'échauffement (à section égale),
- la tenue électrodynamique,
- l'encombrement,
- la facilité de raccordement,
- la simplicité des supports isolants,
- les pertes,
- le coût du métal utilisé.

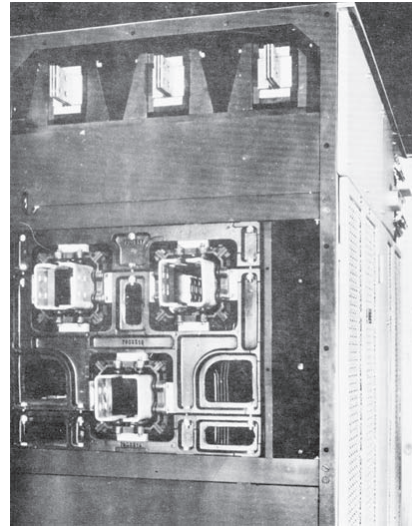


Fig. 19 : jeu de barres triphasé 5000 A, tenue électrodynamique 250 kA crête du paquebot Norway.

La figure 18 (cf. [25]) donne un classement basé sur le critère le plus important, l'échauffement. Tous ces profils ou assemblages ont la même section totale : 4 in² ou 2 850 mm² de cuivre. Pour un échauffement identique, le chiffre 1 indique pour chacun l'intensité relative admissible par rapport au cas le plus défavorable des 4 barres rapprochées ; Le classement change si l'on se base sur le coefficient K de pertes supplémentaires ou encore sur le taux de pertes totales P obtenu par multiplication de K par 12. Les conclusions découlent d'elles-mêmes de la comparaison de ces trois critères.

Un paradoxe de l'électromagnétisme ?

Des lois de l'électromagnétisme, on déduit que deux conducteurs proches, parcourus par des courants de même sens, s'attirent ; par contre, l'effet de proximité direct implique une densité de courant plus élevée dans les parties des 2 conducteurs les plus éloignées, comme si les filets de courant élémentaires se « repoussaient ».

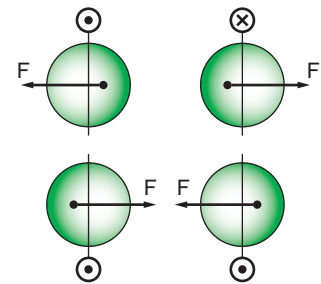
La même contradiction se retrouve entre l'effet de proximité inverse qui fait, semble-t-il, « s'attirer » les filets de courant et les forces répulsives entre courants inverses. Le paradoxe n'est qu'apparent car les deux phénomènes sont de nature très différente :

L'effet de proximité entraîne une surdensité de courant dans la zone d'inductance minimale, embrassant le flux minimum ; par contre, les efforts électrodynamiques s'exercent de façon à augmenter l'énergie électromagnétique accumulée dans le circuit par l'inductance qui croît en proportion.

D'autres caractères différencient encore ces deux phénomènes :

L'effet de proximité est indépendant de la valeur du courant et ne se manifeste qu'en régime variable, il dépend de la résistivité de la fréquence - c'est le contraire pour les efforts électrodynamiques. Une conséquence de cette analogie est cependant à signaler :

Le point d'application des forces de répulsion ou d'attraction n'est pas le centre géométrique des conducteurs soumis aux effets de proximité, mais il se déplace vers les zones de densité de courant maximum ; il faut en tenir compte dans les calculs d'efforts électrodynamiques entre conducteurs très proches.



4.4 Résistivité du métal, cuivre ou aluminium ?

L'ensemble des considérations précédentes supposait que le métal employé était le cuivre, or les effets de peau et de proximité sont d'autant plus accentués que la résistivité est faible.

Un conducteur cuivre aura donc un coefficient de pertes plus élevé que le même conducteur en aluminium, mais ce dernier, devant avoir une section multipliée par 1,6 pour atteindre la même résistance (en courant continu), perd alors son avantage sur le conducteur cuivre car, à géométrie et résistance R_c identiques, les 2 conducteurs ont le même coefficient K (cf. fig. 6 et 8).

En pratique, le remplacement du cuivre par l'aluminium ne se fait pas à résistance ou chute

de tension identique, mais à égalité d'échauffement, ce qui revient à multiplier la section par 1,4 à 1,5 seulement pour tenir compte d'un refroidissement meilleur par des surfaces plus étendues.

En résumé, à échauffement égal, le conducteur aluminium a un coefficient de pertes meilleur que le conducteur cuivre équivalent, mais ceci, ne l'oublions pas, entraîne des pertes totales plus élevées qu'il faudra évacuer et aussi payer.

Le prix au kilogramme et la densité beaucoup plus faibles de l'aluminium sont les facteurs déterminants qui entraînent le choix préférentiel de ce métal pour les canalisations à forte intensité.

4.5 Influence de la fréquence

La fréquence industrielle de 50 Hz a été seule prise en compte dans les données précédentes, leur précision assez relative permet de les étendre au 60 Hz.

Les courbes des figures 6 et 8 donnant le coefficient d'effet de peau pour les tubes et méplats à 50 ou 60 Hz sont exploitables à toute autre fréquence avec la correction indiquée.

Parmi les autres fréquences, le 25 Hz n'existe pratiquement plus ; quant au 16 2/3 Hz, il peut être assimilé au courant continu.

La fréquence 400 Hz adoptée pour des réseaux particuliers (marine, aviation) pose de sérieux problèmes d'effets de peau dès que l'intensité dépasse quelques centaines d'ampères : la peau du cuivre est réduite à 3 mm à cette fréquence.

Dans les réseaux industriels, peuvent se superposer à la fréquence fondamentale des courants harmoniques de fréquence multiple de 50 Hz, (les harmoniques 3 à 11 sont les plus gênants). La résistance effective accrue que rencontrent ces courants engendre des pertes et échauffements non négligeables.

5 Effets de peau et de proximité en régime transitoire

Conséquences d'une variation rapide du courant, donc du flux, dans un conducteur, ces effets se manifestent autant lors d'une variation périodique, cas du courant alternatif en régime établi, que lors d'une variation transitoire, cas de l'apparition brusque d'un courant de court-circuit élevé.

Sans trop approfondir cette question particulière, rappelons que l'effet de peau a une action défavorable sur l'établissement d'un courant continu.

Le taux de croissance, exprimé par le $\frac{di}{dt}$ est inversement proportionnel à la constante de temps $\frac{L}{R}$ du circuit. L'effet de peau se traduit par une diminution de L et une augmentation de R, d'où une constante de temps transitoire plus faible et une croissance plus rapide du courant de court-circuit.

Il faut s'en préoccuper dans les installations à forte intensité continue (électrochimie) qui utilisent des conducteurs massifs de forte section où l'effet de peau transitoire peut être important.

Dans les réseaux à courant alternatif, l'établissement d'un court-circuit se traduit par un régime asymétrique sur certaines phases, en raison d'une composante continue dont

l'amortissement proportionnel à $\frac{L}{R}$ sera dans ce cas plus rapide.

Découverte de l'effet de peau transitoire

L'anecdote rapportée par Arago se situe vers 1880 : un opérateur isolé du sol, tient en mains une grosse barre de fer ; il va l'utiliser pour provoquer un essai de court-circuit entre deux bornes d'une dynamo Gramme à forte intensité pour la galvanoplastie.

A l'instant même d'établissement du contact, il lâche brusquement la barre qui, affirme-t-il après, lui a brûlé les mains ; on ramasse aussitôt la barre avec précautions, surprise, elle est presque froide.

Que s'est-il passé en réalité ?

Nous le savons maintenant : l'effet de peau dans l'acier localise un courant rapidement variable dans une couche périphérique très mince qui, seule, s'est échauffée instantanément brûlant réellement les mains de l'opérateur.

Moins d'une minute après, la chaleur avait diffusé dans la masse de la barre qui n'était plus que tiède.

6 Conclusion

Les effets de peau et de proximité dans les canalisations électriques pour forte intensité sont des phénomènes complexes dont on sous-estime ou néglige parfois les répercussions, devant la difficulté de les chiffrer avec une bonne précision.

Cette étude a volontairement privilégié les données et résultats pratiques par rapport aux aspects théoriques des phénomènes ; elle fait ainsi ressortir indirectement deux points importants :

- La relative imprécision des données publiées sur la résistance effective de quelques types de jeux de barres d'emploi fréquent. Une meilleure précision devrait être obtenue si certains calculateurs et expérimentateurs pouvaient

reprendre des travaux, datant pour la plupart de plusieurs dizaines d'années, avec les puissants moyens actuels que sont les ordinateurs et appareils de mesures électroniques.

- La prise en compte du coût des pertes totales : pertes normales et pertes supplémentaires en courant alternatif pour évaluer la rentabilité du jeu de barres à utiliser. Cette approche technico-économique peut amener des exploitants d'installation, fonctionnant presque en permanence au voisinage de leur intensité nominale, à investir plus au départ dans un jeu de barres mieux étudié et dimensionné, afin de gaspiller moins en pertes d'énergie pendant des années de fonctionnement.

Bibliographie

- [1] Mathématiques et physique.
Vol. 3, p. 491, 1889. Lord KELVIN.
- [2] Effet de peau.
Bull. S.I.E. 4/1905 et 11/1908. P. BOUCHEROT.
- [3] Effet de peau dans les conducteurs tubulaires et rectangulaires.
Trans. AIEE, vol. 37, p. 1379, 1918 et 3/1922.
H.B. DWIGHT.
- [4] Effet de proximité dans les barres et tubes.
Trans. AIEE, vol. 42, p. 830, 1923.
H.B. DWIGHT.
- [5] Recherches sur la répartition du courant dans les barres rectangulaires.
Arch. Elektr. XVII, p. 537, 1927.
H. SCHWENKHAGEN.
- [6] Calcul rapide de l'effet Kelvin par une nouvelle formule...
RGE 12/1929, p. 963. A. LEVASSEUR.
- [7] Courants de Foucault.
Edit. J.B. Baillière, 1933. P. BUNET.
- [8] Effet de peau dans les conducteurs rectangulaires.
Electr. Eng., p. 6369/1933. H.C. FORBES.
- [9] Sur les méthodes de calcul des pertes supplémentaires...
Bull. SFE, p. 237, 3/1939. S. KOHN.
- [10] Distribution du courant dans un conducteur rectangulaire.
Trans. AIEE, vol. 58, p. 687, 1939. J.L. DALEY.
- [11] Jeux de barres à phases permutées pour forts courants.
Electr. Eng, n° 2, p. 71, 1943, Trad. MG n° 3689.
L.E. FISHER.
- [12] Résistance effective des conducteurs rectangulaires...
Trans. AIEE, vol. 66, p. 549, 1947.
H.B. DWIGHT.
- [13] Méthode rapide de mesure..., application à l'effet pelliculaire.
RGE, p. 5, 1/1948. J. RENAUD.
- [14] Leçons d'électrotechnique.
Vol. II, p. 833, Ed. Gauthier-Villars, 1949.
J. FALLOU.
- [15] Courants induits dans les gaines de barres.
Trans. AIEE, Vol. 69, 1950, Trad. MG n° 3681.
S.C. KILLIAN.
- [16] Formules pour l'effet de proximité dans les gaines de barres.
IEEE, Trans., p. 1167, 12, 1964. H.B. DWIGHT.
- [17] Nouvelles liaisons à forte intensité.
BBC Nachr., p. 7Q, 2/1964, Trad. MG n° 4851.
K. KEIPER.
- [18] Echauffement des pièces en acier au voisinage des barres à forte intensité.
BBC Mitt., 2/1967. P. KLUGE.
- [19] Résistance et réactance des conducteurs rectangulaires.
IEEE, Trans. Pow, appar. n° 6, p. 770, 1967.
P. SILVESTER.
- [20] L'effet de peau.
Techniques Philips 1, 1968. H.B. CASIMIR.
- [21] Standard Handbook for electrical engineers.
10^e éd., sect. 2, 4, 10, 12, Mc Graw Hill, 1969.
D.G. FINK.
- [22] Champ magnétique dans les structures métalliques au voisinage des conducteurs et pertes associées.
IEEE trans. Pow, appar., p. 45, 2, 1974.
P. REECE.
- [23] Conducteurs en aluminium, en cuivre.
Normes DIN 43670 et 42671, 1964 et 1973.
- [24] Répartition des courants dans les conducteurs massifs. Correction de l'effet de proximité.
Technique de l'ingénieur, D. 673, D. 130.
- [25] Barres omnibus en cuivre.
Centre information du cuivre.
- [26] Conducteurs et enroulements électriques.
Edit. Mc Graw-Hill 1945, reprod. 1976.
H.B. DWIGHT.

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : 33 (0)4 76 57 98 60
E-mail : fr-tech-com@mail.schneider.fr

Réalisation : AXESS - Valence (26).
Edition : Schneider Electric
- 20 € -